



ПРОБЛЕМЫ
ОПТИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ
И
БИОФОТОНИКИ

SFM- 2020

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И БИОФОТОНИКИ SFM-2020

Материалы 8-го Международного симпозиума и
24-ой Международной молодежной научной школы
Saratov Fall Meeting 2020

Под редакцией Г. В. Симоненко, В. В. Тучина

29 сентября по 2 октября 2020 года

Саратов



Саратов
НОВЫЙ ВЕТЕР
2020

Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2020: материалы Международного симпозиума и Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2020 / под ред. Г. В. Симоненко, В. В. Тучина. – Саратов : Изд - во «Новый ветер», 2020. – 114с. : ил. ISBN 978-5-98116-259-6

В сборник вошли приглашенные лекции и доклады участников 8-го Международного симпозиума по оптике и биофотонике и 24-ой Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике, организованных и проведенных в Саратове с 29 сентября по 2 октября 2020 года.

Для научных работников, аспирантов и студентов старших курсов физических факультетов университетов, специализирующихся в области оптики, лазерной физики, оптических технологий в биофизике и медицине, спектроскопии и оптоэлектроники.

Международный симпозиум по оптике и биофотонике и Международная научная школа для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофотонике проведена при финансовой поддержке РФФИ проект № 20-02-22044

УДК 535(068)
ББК 22.343.43

Научное издание

ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И БИОФОТОНИКИ
SFM-2020

Материалы 8-го Международного симпозиума по оптике и биофотонике и 24-й Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике

Под редакцией Г. В. Симоненко, В. В. Тучина

Оригинал-макет подготовила Н.А. Лакодина

Подписано в печать 01.12.2018. Формат 60×84 1/8.

Тираж 50. Заказ 12

Издательство «Новый ветер»
410012, Саратов, Астраханская, 79.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОСИСТЕМ	15
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛИЦ	15
М.А. Репьёв, Ю.А.Бродская	
НЕИНВАЗИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА МОЛЕКУЛ В НАСЕКОМЫХ-ГАЛООБРАЗОВАТЕЛЯХ МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА	19
М. И. Никельшпарг, Э. И. Никельшпарг, В. В. Аникин, Д. Н. Браташов	
СПЕКТРОСКОПИЯ	24
ПРИМЕНЕНИЕ ДВУМЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ЯМР В АНАЛИЗЕ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ 1,3-ДИПОЛЯРНОГО ЦИКЛОПРИСОЕДИНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ АЗОМЕТИН-ИЛИДОВ И 3-ФЕНИЛ-1-(ПИРРОЛ-2-ИЛ)ПРОПЕН-2-ОНОВ	24
С.В. Борисова, Э.И. Киселева, В.В. Сорокин, И.Н. Клочкова	
ЯМР-СПЕКТРОСКОПИЯ В УСТАНОВЛЕНИИ СТРОЕНИЯ ПОЛИЗАМЕЩЁННЫХ ПИРИДИНОВ И ТИАЗОЛОПИРИМИДИНОВ	28
А.А. Мещерякова, Н.О. Василькова, Е.С. Васильева, В.В. Сорокин, А.П. Кривенько	
ЭКСИТОННЫЕ СЕРИИ В СПЕКТРАХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ РЬС С РАЗЛИЧНЫМ РАЗМЕРОМ КРИСТАЛЛИТОВ	34
М.И. Шишкин, Н.Б. Трофимова, А.А. Сердобинцев, Д.Ю. Постнов, А.Г. Роках	
ОПТИКА ВОЛНОВОДОВ	39
МИКРОРЕЗОНАТОРЫ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СВЕТОВОДОВ КАК ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	39
И.С. Белоножкина, Д.С. Животков, Е.А. Романова	
ЭЛЕКТОРОМАГНИТНО ИНДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ МОЩНЫХ ПРОБНЫХ ИМПУЛЬСОВ	45
О.М. Паршков, А.А. Маковейчук	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ	53
ЭФФЕКТ ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА В СХЕМЕ ГЕТЕРОМАГНИТНОГО АВТОГЕНЕРАТОРА	53
М.Г. Инкин, А.А. Игнатъев	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ	56
А.В. Калинин, А.Л. Хвалин	
ПРИМЕНЕНИЕ ТРОИЧНОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ И ТРОИЧНОЙ ЛОГИКИ В МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ	60
А.С. Дронкин	
ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ФИЗИКИ	68
БОЛЬШАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ АУДИТОРИЯ СГУ КАК МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР	68
В. М. Аникин	
ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРЕПОДАВАНИЯ ОПТИКИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ И СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ	75
Л.А. Романченко	
КРУГЛЫЙ СТОЛ «ЧЕЛОВЕК И СВЕТ В ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ И ХУДОЖЕСТВЕННОЙ КАРТИНЕ МИРА» модератор Б.А. Медведев	78
ТЕЗЕСЫ КОНФЕРЕНЦИИ ТОМТГ'20 (TOWARDS OPTICAL AND MULTIMODALITY TRANSLATIONAL IMAGING)	96

ПРЕДИСЛОВИЕ

Особенностью проведения традиционного симпозиума и ежегодной школы для молодых ученых и студентов Saratov Fall Meeting 2020 (SFM' 20) стало их форма проведения – в основном в он-лайн режиме с использованием интернет технологий. Стоит отметить, что использование интернет технологий для проведения конференций было использовано организаторами SFM – конференций ещё в далеких 2000-х годах. Это было совершенно новое в организации подобных мероприятий, так как уже в те времена организаторы использовали он-лайн лекции и чаты для обсуждения интернет - докладов. Поэтому в этом году особая форма проведения подобных мероприятий для организаторов симпозиума не стала неожиданностью.

В 2020 году в рамках Международного симпозиума «Оптика и биофотоника - VIII», являющегося частью SFM'20, прошли 14 продолжающихся конференций и семинаров «Оптические технологии в биофизике и медицине XXII», «Лазерная физика и фотоника XXII», «Спектроскопия и молекулярное моделирование XXI», «Электромагнетизм микроволн, субмиллиметровых и оптических волн XX», «Нанобиофотоника XVI», «Микроскопические и низкокогерентные методы в биомедицинских и других приложениях XIII», «Интернет биофотоника XIII», «Нелинейная динамика XI», «Низкоразмерные структуры X», «Биомедицинская спектроскопия VII», «Передовые поляризационные и корреляционные технологии в биомедицине и материаловедении VII» и «Компьютерная биофизика и анализ биомедицинских данных VII», «ТГц оптика и биофотоника III» и «Перспективные материалы оптики и биофотоники III». В этом году впервые были организованы семинары: «Нейрофотоника: Физика мозга. От физиологии к вычислениям и сложным системам» и «Квантовая наука и технологии». Одновременно с симпозиумом в рамках SFM'20 была организована XXIV Международная школа для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофотонике, которая включала краткие курсы лекций SPIE и OSA, а также следующие семинары: «Современная оптика XIX», «Английский язык как средство коммуникации в научном сообществе XIX» и «История, методология и философия оптического образования XIII». В этом году совместно с SFM'20 проходили Китайско-российский семинар и международный семинар “Towards optical and multimodality translational imaging” – ТОМТИ'20 («На пути к оптической и мультимодальной трансляционной визуализации»). Отличительной чертой нынешнего симпозиума и сопутствующих мероприятий явилось то, что для обеспечения предписанных мер безопасности устные заседания проходили частично в дистанционном режиме. Стендовая сессия также прошла в комбинированном режиме: часть участников представило стендовые доклады лично, а часть – через интернет.

Часть докладов представляло результаты исследований, поддержанных РФФИ, а другая часть докладов являла собой результаты научных исследований, проводимых рамках РФ, Мега-грантов, грантов Президента.

За время работы симпозиума на сайте зарегистрировано 1024 визита, 527 посетителей и 5122 просмотров страниц. В SFM'20 приняли участие (включая слушателей) более 500 человек из 27 стран, среди которых: Россия, США, Канада, Куба, Великобритания, Германия, Франция, Нидерланды, Испания, Португалия, Италия, Швейцария, Бельгия, Финляндия, Польша, Болгария, Венгрия, Украина, Латвия, Казахстан, Египет, Иран, Израиль, Китай, Тайвань, Япония и Сингапур. Российская часть авторов докладов представлена учеными из ведущих ВУЗов и научно-исследовательских центров Москвы и Московской области, Санкт-Петербурга, Самары, Нижнего Новгорода, Казани, Саратова, Волгограда, Астрахани, Ростова-на-Дону, Орла, Новосибирска и других. Часть устных презентаций от имени своих научных групп была сделана молодыми учеными, подготовившими к защите свои кандидатские диссертации. Участниками Симпозиума было представлено 24 пленарных лекции, 88 приглашенных лекций, 102 устных докладов, 247 стендовых и 14 приглашённых интернет-лекций и 27 интернет-докладов.

Научная программа мероприятия открылась 28 сентября Китайско-российским семинаром и продолжилась кратким курсом **Евгения А. Ширшина (МГУ, Москва)**, посвященным вопросам флуоресцентной визуализация с использованием эндогенных хромофоров для биомедицинской диагностики. 29 сентября состоялся курс лекций профессора **Дмитрия А. Горина (Сколтех, Москва)**. Участникам конференции представилась возможность услышать о широком выборе инструментов фотоники с наноструктурированными частицами для биомедицинских приложений. Выступления проходили в устном режиме и транслировались с помощью Zoom удалённым участникам. Всего на оба курса было зарегистрировано более 60 слушателей, из которых две трети составляли удалённые участники из Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, Сколтеха, Института прикладной физики РАН, Приволжского исследовательского медицинского университета, Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Московского государственного технического университета им. Баумана, Национального исследовательского Томского государственного университета, Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН, Саратовского национального исследовательского университета им. Н.Г. Чернышевского, а также других ВУЗов и научно-исследовательских институтов России и США.

Пленарные лекции по актуальным проблемам биофотоники были прочитаны ведущими мировыми экспертами: **Thomas Penzel** (Interdisciplinary Center of Sleep Medicine in Charité –

Universitätsmedizin Berlin, Germany), **Juergen Kurths** (Physics Department, Humboldt University, Berlin and Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany), **Valery P. Zakharov** (Samara National Research University, Samara, Russia), **Turgut Durduran** (ICFO-The Institute of Photonic Sciences, Barcelona, Spain, Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA), Spain), **Juergen Popp** (Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany), **Alexei A. Bogdanov Jr.** (University of Massachusetts Medical School, Worcester MA, USA; A.N. Bakh Institute of Biochemistry, Federal Research Center "Fundamentals of Biotechnology" of the Russian Academy of Sciences and Moscow State University, Moscow, Russia), **Kobi Katsobashvili** (Aspect Imaging LTD., Shoham, Israel), **David Boas** (Boston University, Boston, USA), **Maksim Skorobogatiy** (Department of Engineering Physics, Polytechnique Montreal, Canada), **Rinat O. Esenaliev** (University of Texas Medical Branch, Galveston, Texas, USA), **Jennifer Barton** (University of Arizona, Tucson, Arizona, USA), **Hiroki R. Ueda** (The University of Tokyo/RIKEN BDR, Tokyo, Japan), **Stanislav O. Yurchenko** (Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia), **Timofey E. Pylaev** (Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia), **Alexei K. Fedorov** (Russian Quantum Center, Skolkovo and Moscow Institute of Physics and Technology, Russia), **Peter S. Timashev** (Institute for Regenerative Medicine, Sechenov University, Department of Polymers and Composites, N.N. Semenov Institute of Chemical Physics of RAS and Institute of Photonic Technologies, Research Center "Crystallography and Photonics" of RAS, Russia), **Konstantin A. Lukyanov** (Center of Life Sciences, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia), **Irina V. Larina** (Baylor College of Medicine, Houston, USA), **Anna Moore** (Departments of Radiology and Physiology, Precision Health Program College of Human Medicine Michigan State University, USA), **Anand T.N. Kumar** (Harvard Medical School, Optical Molecular Imaging Laboratory, Athinoula A. Martinos Center for Biomedical Imaging, Massachusetts General Hospital, USA).

Также перед участниками выступили представители ведущих мировых производителей оптического оборудования для биомедицинских исследований, являющихся спонсорами SFM'20 и сопутствующих мероприятий: **Mathias Bayer** (PicoQuant GmbH, Berlin, Germany), **Viacheslav Artyushenko** (art photonics GmbH, Berlin, Germany), **Peter Drent** (Confocal.nl, Amsterdam, The Netherlands) и **Fabrice Chaumard** (MR Solutions Ltd, Ares, France).

На конференции «Оптические технологии в биофизике и медицине XXII» было представлено 10 приглашённых лекций, 3 устных и 22 стендовых докладов. Приглашённые лекции по современным проблемам биофотоники, прозвучавшие на конференции, касались широкого спектра проблем современной биомедицины и качества жизни, в частности, ФДТ глиобластом (Adrian Rühm and Ronald Sroka, Laser-Forschungslabor, LIFE Center, Department

of Urology, University Hospital, LMU Munich, Munich, Germany), мультиспектральной фотоакустической томографии глаза (Владислав Торонов с соавт., Ryerson University; The Institute for Biomedical Engineering, Science & Technology (iBEST) St. Michael's Hospital, Toronto, Canada), ОКТ развития эмбрионов (Ирина Ларина, Baylor College of Medicine, Houston, USA), оптической когерентной эластографии тканей (Юлия Александровская с соавт. Институт фотонных технологий, Федеральный научно-исследовательский центр кристаллографии и фотоники РАН, Троицк), комбинированному использованию ОКТ-эластографии и ОКТ-ангиографии опухолей при фотодинамической терапии (Владимир Зайцев и соавт. Институт прикладной физики РАН), отражательной спектроскопии кожи (Janis Spigulis, Vanesa Lukinsone, Anna Maslobojeva, UldisRubins, Maris Kuzminskis Biophotonics Laboratory, Institute of Atomic Physics and Spectroscopy, University of Latvia, Riga) и др. В стендовой секции приняли участие молодые учёные, аспиранты и студенты Саратовского национального исследовательского университета, Саратовского государственного медицинского университета, Московского государственного университета, Приволжского исследовательского медицинского университета (Н. Новгород), Института прикладной физики РАН (Н. Новгород) и других научно-исследовательских центров России.

В программу конференции «Лазерная физика и фотоника XXII» вошли 8 устных докладов, 5 интернет-докладов 27 интернет-постеров. Достаточно многочисленная секция интернет-постеров отражает высокую активность молодых ученых и студентов, составляющих в этой секции большинство докладчиков. Участниками конференции были учёные, аспиранты и магистранты, представляющие университеты и научно-исследовательские институты Москвы, Дубны, Самары, Саратова, Санкт-Петербурга, Волгограда, Новосибирска, Томска. Среди соавторов докладов - ученые Китая, Монголии, Тайваня, Финляндии, Казахстана. Разнообразие тематики докладов отражает современное состояние и тенденции развития лазерной физики и фотоники.

На конференции «Спектроскопия и молекулярное моделирование XXI» был представлен 31 доклад: 13 устных и 18 стендовых докладов, большинство из которых дублировались как Интернет - сообщения. Участники работы секции и авторы докладов - учёные, аспиранты и магистранты, представляющие научные группы физического и химического факультетов Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М.В.Ломоносова, Института Иоффе (Санкт-Петербург), университета Гаваны (Куба), Российского национального исследовательского медицинского университета имени Н.И. Пирогова (Москва), Северо-восточного федерального университета (Якутск), Института физики НАН Украины (Киев), Саратовского национального исследовательского

государственного университета имени Н.Г.Чернышевского, Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина, Саратовского государственного медицинского университета имени В.И. Разумовского, Российского научно-исследовательского противочумного института «Микроб» (Саратов), Астраханского государственного университета.

На секции «Нанобиофотника» были представлены 1 пленарный доклад, 1 приглашенный, 13 устных докладов и 21 стендовых докладов. Работа секции была организована сотрудниками Лаборатории нанобиотехнологии Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН (ИБФРМ РАН) совместно с работниками кафедры оптики и биофотоники СГУ.

На конференции «Интернет биофотоника XIII» было представлено 73 интернет-доклада, из них 14 приглашенных и 59 постеров. Участники из США, Китая, Португалии, Болгарии, Российской Федерации, Германии, Южной Кореи, Швейцарии, Франции, Финляндии, Венгрии, Польши, Великобритании и Ирана размещали свои доклады на веб-сайте конференции, который был доступен в течение конференции и будет доступен для пользователей в течение всего года до следующей конференции.

Среди лекторов и докладчиков были известные специалисты в области биомедицинской оптики и рассеяния света, спектроскопии, компьютерного моделирования, нанотехнологий, манипуляций с наночастицами, фотодинамической терапии и т.д.: Nikolay G. Khlebtsov (Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, RAS, Russia), Ekaterina G. Borisova (Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria), Luís Oliveira (Institute of Biomedical Sciences Abel Salazar – University of Porto, Portugal), Jürgen Lademann и Maxim E. Darvin (Charité - Universitätsmedizin Berlin, Department of Dermatology, Venerology and Allergology, Center of Experimental and Applied Cutaneous Physiology, Berlin, Germany), M.Yu. Kirillin и E.A. Sergeeva (Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia), A.V. Priezhev (Physics Departments and International Laser Center, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia), Irina Larina (Department of Molecular Physiology and Biophysics, Baylor College of Medicine, USA), M.A. Ansari (Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Iran), Igor V. Meglinski (University of Oulu, Finland), Sergey G. Proskurin (Tambov State Technical University, Russia), Valery P. Zakharov (Samara State University, Russia), Vladimir P. Zharov (Arkansas Nanomedicine Center, University of Arkansas for Medical Sciences, USA), Yuri V. Kistenev (Tomsk State University (National Research University), Tomsk, Russia), Elina A. Genina, Alexey N. Bashkatov и Valery V. Tuchin (Saratov State University, Russia), Walter Blondel (University of Lorraine, France) Valery P. Zakharov (Samara University, Russia) и др. При этом необходимо отметить растущую год от года

активность студентов и аспирантов, составивших значительную часть участников конференции. Использование специально разработанного программного обеспечения позволило провести on-line дискуссию по большинству представленных докладов. Год от года важность этой части конференции возрастает, благодаря удобству такого способа обмена научной информацией.

На конференции «Низкоразмерные структуры X» было представлено 38 докладов, из них 10 устных, 19 стендовых, 9 интернет-докладов. Докладчиками были представители следующих организаций – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва), Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина (г. Москва), Научно-исследовательский институт Проблем развития научно-образовательного потенциала молодежи (г. Москва), Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН (г. Москва), Институт высокопроизводительных вычислений A*STAR (Сингапур), Сидянский университет (Китай), Технологический институт Джорджии (США), Национальный университет Ченг Кунг (Тайвань), Юго-восточный университет (Китай), Университет Макао (Китай), Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (г. Уфа), Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (г. Санкт-Петербург), Национальный Исследовательский Центр "Курчатовский Институт" (г. Москва), Уфимский федеральный исследовательский центр РАН (г. Уфа), Национальный исследовательский университет МИЭТ (г. Москва), Первый Московский Государственный Университет им. Сеченова (г. Москва), НПК "Технологический центр" (г. Москва), Ивановский государственный университет, Уфимский государственный нефтяной технический университет (г. Уфа), Башкирский государственный университет (г. Уфа), Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина. Семинар характеризовался высокой степенью участия молодых ученых и студентов, которые были соавторами большинства устных докладов и докладчиками в стендовой секции. Доклады конференции отражали современное состояние нанотехнологий, применяемых в биомедицине и электронике.

На семинаре «Биомедицинская спектроскопия VII» было представлено 16 докладов, в том числе приглашённая лекция Екатерины Борисовой (Институт электроники Болгарской академии наук), на постерной секции было представлено 2 доклада, на интернет секции 5 докладов, на секции интернет постеров 8 докладов. В секциях также участвовали представители организаций: Art photonics GmbH, Университет Лотарингии, Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Московский государственный университет,

Самарский государственный университет, Саратовский государственный университет, Саратовский государственный технический университет, Саратовский государственный медицинский университет.

На конференции «Компьютерная биофизика и анализ биомедицинских данных VII» было представлено 48 докладов, из них: устных – 7, устных по видеосвязи – 7, стендовых – 34. Авторские коллективы докладов представляли 8 городов России (Саратов, Казань, Курск, Волгоград, Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Томск), а также Испанию, Германию, Бельгию, Египет, Казахстан и Тайвань. Устная сессия прошла в атмосфере активной дискуссии в новом формате, в виде совместного заседания очных докладов и докладов по видеосвязи. Как и в предыдущие года, наблюдается выраженное доминирование двух направлений в рамках конференции, из которых первое - это различные проблемы, связанные с исследованием функций мозга, в том числе - передовые вычислительные методы для обработки данных нейронной активности методом электроэнцефалографии. Второе направление - это различные вопросы изучения и моделирования процессов функционирования сосудистой системы. Повышенный интерес у представителей самых различных направлений вызвали доклад Курочкина М.А. (Москва) «Label-free vascular network imaging using adaptive Niblack analysis and PIV» о визуализации микроциркуляторной сети, а также доклад Вerveйко Д.В. (Курск) «Local and collective IP3-mediated calcium dynamics in astrocyte network» где были представлены результаты весьма реалистичного моделирования кальциевых волн в клетках паренхимы мозга. Стендовая сессия прошла в обсуждении самых различных тем. В частности, оживленные дискуссии вызвала серия работ по диагностике характера решаемых мозгом задач на основе автоматизированного анализа данных, представленная коллективом авторов Университета Иннополис (Казань): «fNIRS-based classification of hand-related motor activity and motor imagery», «Approach to collaborative BCI for enhancing human-to-human interaction in shared visual task» и «Artificial neural network predicts inter-areal functional connectivity».

В рамках семинара «Передовые поляризационные и корреляционные технологии в биомедицине и материаловедении VII» были представлены 11 научных докладов. Представленные научные доклады были посвящены современным спектрально-поляризационным и спекл-корреляционным методам зондирования рассеивающих сред, обсуждались возможности и перспективы применения оптических методов в материаловедении и биомедицине.

На семинаре «Нелинейная динамика XI» было представлено 26 докладов: 14 устных и 12 стендовых. В этом году семинар прошел в смешанном, очно-дистанционном режиме. Традиционно, подавляющее большинство докладов участников секции было посвящено

особенностям динамики распределенных колебательных систем и исследованиям формирования в них пространственных структур. Также ряд представленных работ был связан с применением методов нелинейной динамики к задачам медицины.

На семинаре «Электромагнетизм микроволн, субмиллиметровых и оптических волн XX» было представлено 7 устных докладов по различной тематике, связанной с СВЧ, ТГц и оптическими волнами, из организаций Саратова и Ростова-на-Дону. В стендовой секции представлено семь докладов. В целом, семинар продемонстрировал высокий уровень докладов и большой интерес среди ученых к его тематике, среди которых более 80 процентов участников было моложе 33 лет.

В секции «Терагерцовая оптика и биофотоника III» было представлено 8 устных докладов, среди них было 4 приглашенных доклада – В.В. Черепановым (ЮФУ), Д.С. Пономаревым (ИСВЧ ПЭ РАН), 2 доклада О.П. Черкасовой (ИЛФ СО РАН), а также 5 стендовых докладов. В работе конференции приняли участие студенты, аспиранты и сотрудники разных ВУЗов (ИТМО, ЮФУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ТомГУ, МФТИ) и институтов РАН (ИОФ РАН, ИЛФ СО РАН, ИФТТ РАН, ИСВЧПЭ РАН).

В секции «Новые материалы для оптики и биофотоники III» было представлено 6 устных докладов, среди них было 4 приглашенных доклада – prof. Timothy Douglas (Lancaster University, UK), Г.С. Соколовским (ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН), Р. А. Хабибулиным (ИСВЧПЭ РАН) и М.К. Тарабриным (МГТУ им Н.Э. Баумана), а также 10 стендовых докладов. Тематика выступлений охватывала проблемы разработки новых материалов (в том числе – биоматериалов), активных сред и гетероструктур, создания и усовершенствования элементной базы терагерцового и ИК- диапазонов, а также спектральных исследований биологических тканей и жидкостей, в интересах биомедицинской диагностики. В работе конференции приняли участие студенты, аспиранты и сотрудники разных ВУЗов и институтов, включая зарубежные (Lancaster University, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИСВЧПЭ РАН, ИОФ РАН, ИФТТ РАН).

Впервые проведена секция «Нейрофотоника: Физика мозга. От физиологии к вычислениям и сложным системам», посвященная пионерским исследованиям по изучению механизмов, лежащих в основе феномена очищения тканей мозга от токсинов во время сна и развитию прорывных портативных смарт технологий управления восстановительными свойствами сна для нейрореабилитационной медицины. На секции было представлено 17 устных докладов, содержащих результаты по изучению роли лимфатической системы в очистительной функции мозга во время сна и возрастные изменения этих процессов у людей и грызунов. Обсуждались методы изучения лимфатического очищения тканей спящего мозга от бета-амилоида и продуктов крови на животных моделях болезни Альцгеймера и

неонатальных интракраниальных геморрагий. Были представлены методы функциональной картографии и трехмерной функциональной визуализации сети лимфатических сосудов головного мозга и его оболочек человека и мыши/крысы. Обсуждались исследования по применению в эксперименте технологий нелинейного частотного и амплитудного анализа ЭЭГ/ЭМГ/ЭОГ/ЭКГ, включая также методы распознавания образов нейронной сети, для выявления медленных волн сна, ассоциированных с активацией дренажной и очистительной функций мозга, в условиях патологии на моделях мышей с болезнью Альцгеймера и у новорожденных крыс с пост-геморрагическим синдромом. Обсуждалось разработанное программное обеспечение и автоматизированная станция на основе методов машинного обучения для выявления медленных волн сна в условиях нормы и патологии в момент открытия «терапевтических окон сна».

Секция «Квантовые технологии» была проведена на территории Российского квантового центра (Кампус Сколковского института науки и технологий). В ходе работы секции было представлено 8 устных докладов (7 приглашенных докладов) и представлено 6 стендовых докладов. В рамках докладов были представлены достижения основных платформ по квантовым вычислениям: нейтральных атомов, ионов, сверхпроводников, фотонных чипов, а также представлены теоретические достижения в части проектирования алгоритмов для контроля квантовых процессоров. Были затронуты вопросы перспективных квантовых материалов для создания элементной базы квантовых технологий, например, источников одиночных фотонов. Доклады были представлены преимущественно молодыми учеными из Российского квантового центра (РКЦ), Центра квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова, МФТИ, ФТИАН, Саратовского государственного университета и др. Также были представлены результаты проекта Лидирующего исследовательского центра по квантовым вычислениям, который создан на базе РКЦ при поддержке РВК.

Конференция «Towards Optical and Multimodal Translational Imaging» (ТОМТИ'20) была организована при участии ФИЦ Биотехнологии РАН силами научного коллектива лаборатории молекулярного имиджинга и при поддержке гранта МОН 14.W03.31.0023. Конференция проходила в дистанционном формате на платформе Zoom и от этого только выиграла, так как на приглашение выступить с докладами откликнулись зарубежные ученые, широко известные научной аудитории своими передовыми работами в области молекулярного и мультимодального имиджинга. На конференции ТОМТИ'20 было представлено 48 докладов, из них: пленарных – 5, устных приглашенных – 6, доклады молодых ученых: устных-7, стендовых – 8. Авторские коллективы докладов представляли 8 городов России (Саратов, Казань, Курск, Волгоград, Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Томск), а также США. Приглашенные доклады касались как внедрения новых

малых некодирующих РНК для лечения опухолевых заболеваний (Dr. Anna Moore, Director of Precision Medicine Center, Michigan State University, USA), так и разработке новых подходов томографии с временным разрешением (Dr. Anand Kumar, Massachusetts General Hospital, Harvard Medical School), а также использованию методов оптической визуализации для мониторинга развития эмбриона (Prof. Associate Irina Larina, Baylor College of Medicine, Texas, USA), использованию поляризационной спектроскопии в детекции раковых заболеваний (Dr. Anna Yaroslavskaya, University of Massachusetts at Lowell, USA) гиперспектральной технологии имиджинга и обработки массивов данных (Prof. Ewa, University of New South Wales, Australia), использованию мультимодальной микроскопии в патологии жидких биологических сред (Dr. Francesco S. Pavone, European Laboratory for non Linear Spectroscopy, Florence, Italy). Заседания конференции за время ее работы посетили около 150 человек. Молодые ученые также выступили с короткими докладами (pitch-poster talk). С 15 минутными докладами выступили 7 молодых участников, а на стендовой сессии с короткими докладами выступило 8 человек. В работе участников молодежной секции приняли участие зарубежные студенты и аспиранты.

В рамках семинара «Современная оптика» Международной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике состоялись научно-популярные публичные лекции для аспирантов, студентов и учащихся старших классов. На семинаре выступили Д.А. Горин и Е.А. Ширшин. На лекции «Путешествие в микромир: где оптика встречается с акустикой?» Слушатели включали воображение и отправлялись в путешествие в микромир вместе с Дмитрием Гориным. Евгений Ширшин предоставил возможность узнать ответ на вопрос: «Что нового может фотоника дать медицине в 2020 году?» Мероприятие проходило на платформе Zoom и было организовано сотрудниками кафедры оптики и биофотоники физического факультета СГУ. Активное участия приняли ученики десятых классов (профиль робототехника и программирование) Лицея-интерната №64 (40 человек), а также студенты бакалавриата (профили Живые системы и Биотехнические системы и технологии), магистратуры (профиль Биофотоника) СГУ и участники Школы и Симпозиума. Стоит отметить, что в этом году из-за удаленной формы проведения этого семинара основная часть слушателей, а это учащиеся школ г. Саратова и Саратовской области, не смогли принять участия в работе конференции по техническим причинам. Организаторами конференции будут сделаны определённые выводы с целью устранения на следующей конференции этого недостатка.

На семинаре «Английский язык как средство коммуникации в научном сообществе XIX» выступило 5 докладчиков – преподавателей и сотрудников института филологии и журналистики Саратовского государственного университета. Слушатели – студенты и аспиранты университета.

На семинаре «История, методология и философия оптического образования», включая Круглый стол «Человек и свет в естественнонаучной и художественной картине мира» было сделано 23 устных, 6 стендовых и 4 интернет - доклада. Как и в 2019, семинар продолжает демонстрировать расширение междисциплинарных связей. В работе семинара принимали активное участие студенты, молодые ученые и профессорско-преподавательский состав 6 факультетов СГУ (в том числе - физического, нано- и биомедицинских технологий, механико-математического, химического, биологического, компьютерных наук и информационных технологий), а также кафедры философии СГТУ, кафедры патологической анатомии СГМУ, сотрудники Самарского университета, Российского государственного геологоразведочного ун-та им. Серго Орджоникидзе и МГУ. На трех заседаниях секции с учетом стендовых и интернет докладов, количество участников составило 38 человек. Заседания сопровождались многочисленными вопросами и оживленной дискуссией.

Все доклады конференций были представлены на английском языке. Обсуждения и дискуссии проводились на русском и английском языках.

Кроме настоящего сборника трудов, материалы симпозиума планируется опубликовать в ведущих научных российских (Квантовая электроника) и международных изданиях (Optical Engineering, Journal Biomedical Optics, The European Physical Journal, Journal Biomedical Photonics & Engineering, Journal of Innovative Optical Health Sciences), а также в трёх сборниках SPIE.

Учитывая важность, перспективность и методическую ценность научной тематики Симпозиума, а также быстрый рост молодых кадров и необходимость их интегрирования в международную науку, решено провести очередной Симпозиум в 2021 году.

Председатель 8-го Международного симпозиума и
24-й Международной междисциплинарной молодежной научной школы,
член-корреспондент РАН, профессор, доктор физико-математических наук

В. В. Тучин

Секретарь 8-го Международного симпозиума и
24-й Международной междисциплинарной молодежной научной школы,
доцент, доктор физико-математических наук

Э. А. Генина

Председатель организационного комитета
24-й Международной междисциплинарной молодежной научной школы,
доцент, доктор физико-математических наук

Г. В. Симоненко

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОСИСТЕМ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛИЦ

М.А. Репьёв, Ю.А.Бродская

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Представлен краткий обзор существующих методов анализа изображений лиц.

ВВЕДЕНИЕ

В докладе рассматривается одно из самых актуальных в настоящее время приложений математической теории распознавания образов - анализ изображений, в частности, распознавание лиц, являющееся одной из самых изученных задач. Существует множество методов распознавания по геометрии лица. Все они основаны на том, что черты лица и форма черепа каждого человека имеют общие для всех черты. В данной области можно выделить на два направления: двухмерное и трёхмерное распознавание. У каждого из них есть достоинства и недостатки, однако многое зависит и от сферы применения и требований, предъявленных к конкретному алгоритму.

Системы распознавания лиц являются актуальными в настоящее время. Они могут использоваться для поиска пропавших людей, для охраны правопорядка, для скроллинговых систем банка и т.п. Распознавание лиц является одной из самых изученных задач в таких областях как цифровая обработка изображений, компьютерное зрение, биометрия, организация видеоконференций, создание интеллектуальных систем безопасности и контроля доступа и т. п. Процесс распознавания лиц обычно состоит из двух этапов: поиск области лица на изображении, и сравнение найденного лица с лицами, находящимися в базе данных.

В настоящее время метод Виолы-Джонса является самым популярным методом поиска области лица на изображении из-за его высокой скорости и эффективности. Детектор лица Виолы-Джонса основан на идеях интегрального представления изображения, методе построения классификатора на основе алгоритма адаптивного бустинга и методе комбинирования классификаторов в каскадную структуру. Эти идеи позволяют построить детектор лица, способный работать в режиме реального времени.

Поскольку использование нейронных сетей также является популярным методом решения многих задач, то целесообразно рассмотреть метод, основанный на них - в работе

использован алгоритм, предложенный в работе K. Zhangetal. 2016 года, основанный на свёрточных нейронных сетях.

Для сравнения методов распознавания лиц, необходимо ввести определённые измерения: скорость работы самого алгоритма (потраченное время в целом и в расчёте на одно изображение в случае обработки базы данных с изображениями), количество найденных лиц, количество ложноположительных результатов (где некая часть изображения помечена как лицо, но человек не сможет там его найти) и количество ложноотрицательных результатов (где алгоритм не смог "найти" лицо на участке изображения, хотя это сделал другой алгоритм и наблюдатель может подтвердить, что лицо там есть).

ВЫБОР АЛГОРИТМОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Алгоритм Виолы-Джонса - алгоритм, позволяющий обнаруживать объекты на изображениях в реальном времени, предложенный Полом Виолой и Майклом Джонсом в 2001 году [1, 2]. Хотя алгоритм может распознавать любые объекты на изображениях, основной задачей при его создании было обнаружение лиц.

Используемые алгоритмом признаки опираются на суммирование пикселей из прямоугольных регионов. Признаки, предложенные Виолой и Джонсом, содержат более одной прямоугольной области и несколько сложнее. Величина каждого признака вычисляется как сумма пикселей в белых прямоугольниках, из которой вычитается сумма пикселей в чёрных областях. При хранении изображения в интегральном формате (в каждом пикселе изображения записана сумма всех пикселей левее и выше данного) проверка прямоугольного признака на конкретной позиции проводится за $O(1)$, то есть за константное время.

В сравнении также был использован алгоритм распознавания лиц на свёрточных нейронных сетях. Для работы алгоритма из изображения на входе строится множество его уменьшенных копий, образуя «пирамиду», которая обрабатывается тремя шагами: используется сеть предложений (P-Net) - полностью свёрточная нейронная сеть для получения «окон»-кандидатов и их калибровки; после этого используется алгоритм немаксимального подавления (Non-MaximumSuppression) для слияния сильно перекрывающихся друг друга окон; далее используется сеть уточнений (R-Net) - все кандидаты подаются на вход другой свёрточной нейронной сети, которая в дальнейшем отклоняет большое количество ложных кандидатов, выполняет калибровку с регрессией ограничительного прямоугольника, и слияние кандидатов с помощью NMS; и, наконец, сеть вывода (O-Net) выявляет информацию об обнаруженном лице,

а также определяет пять основных точек на нём - левый глаз, правый глаз, кончик носа, правый и левый уголки рта.

Для сравнения алгоритмов распознавания лица были выбраны алгоритм Виолы-Джонса и алгоритм на свёрточных нейронных сетях. Для распознавания лиц на изображениях на языке объектно-ориентированного программирования Python (версия 3.8) с использованием графического интерфейса на библиотеке PyQt5 библиотеки OpenCV разработано программное обеспечение. В качестве выборки изображений, которые будут проанализированы, были взяты:

1. База изображений университета Йеля [4], состоящая из 165 изображений 15 субъектов в 11 разных состояниях; все изображения размером 320×243 пикселя в формате .gif;
2. База изображений LabeledFacedintheWild [5], состоящая из 13233 изображений 5749 субъектов, из которых 1680 имеют более одного изображения в этой базе;
3. База изображений с «лицами» собак [6]
4. 12 изображений большого размера с массовым скоплением людей (в основном изображены спортивные события, [7])

Программа установлена на компьютере с операционной системой Windows 10, работающем на процессоре Intel(R) Core(TM) i3-6006U @ 2.00 GHz с 4 ГБ оперативной памяти и 2 ГБ видеопамати.

Во время работы программы подтвердилось утверждение, что алгоритм Виолы-Джонса - достаточно быстрый алгоритм для распознавания лица: в среднем одно лицо обнаруживается менее чем за десятую долю секунды. Достаточно часто алгоритм справлялся с задачей за 1/20 секунды. Результаты показаны на рис. 1.

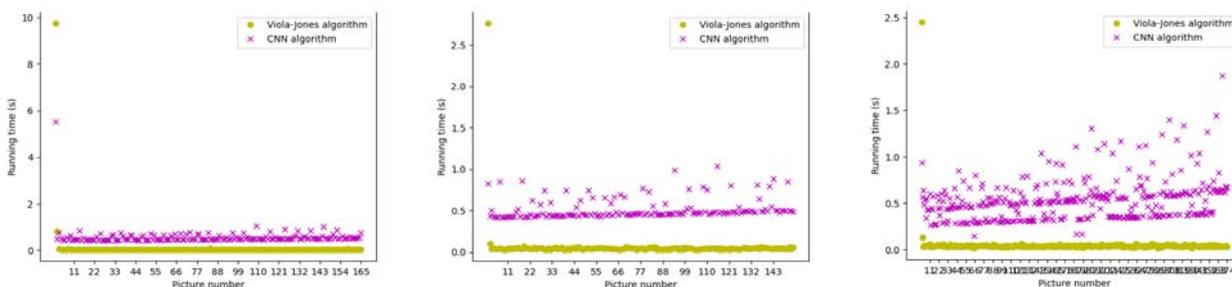


Рис. 1. Время выполнения алгоритмов для каждого изображения для всех изображений

Однако, на фотографиях со множеством лиц (в работе были использованы фотографии во время спортивных состязаний, хотя то же самое можно применить к фотографиям любого

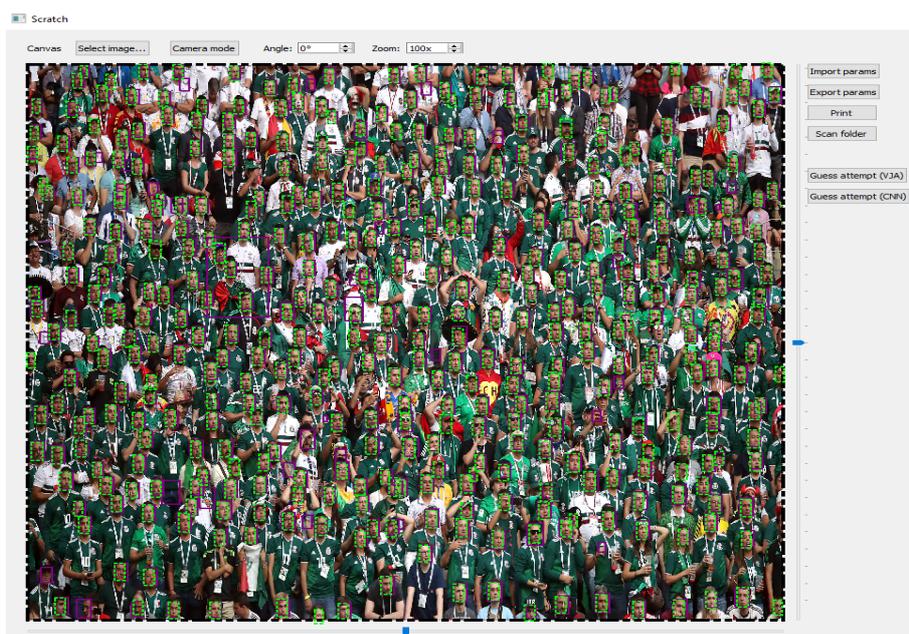


Рис. 2. Интерфейс программы во время работы над большим изображением

массового скопления людей) алгоритм Виолы-Джонса давал большое число ложноположительных результатов в практически каждой фотографии, но количество таких результатов не превышает 5 независимо от количества человек на фотографии.

Кроме того, алгоритм Виолы-Джонса «пропускает» множество лиц, которые обнаружены алгоритмом на свёрточных нейронных сетях и которые обнаружило бы человеческое зрение; он также «пропускает» лица, которые обнаружены алгоритмом Виолы-Джонса, однако такие ситуации встречаются гораздо реже, в то же время алгоритм на свёрточных нейронных сетях даёт сравнительно мало ложноположительных результатов на таких фотографиях (рис. 2).

Алгоритма поиска лиц на фотографиях на свёрточных нейронных сетях является более затратным по времени (примерно на одну секунду). Это делает его малоприменимым для работы в режиме реального времени, но при использовании больших вычислительных мощностей применение такого алгоритма представляется возможным.

Количество ложноотрицательных результатов говорит о том, что современные алгоритмы далеко не совершенны в обнаружении лица, особенно в тех случаях, когда ни один алгоритм не смог обнаружить их. При этом они достаточно точно определяют лица, когда человек смотрит прямо в камеру, и его лицо занимает всё изображение. Это может привести к тому, что и всевозможные части лица тоже могут быть идентифицированы алгоритмами с большой точностью.

Анализ результатов компьютерных экспериментов позволяет говорить об успешной работе созданного алгоритма и программы при распознавании лиц.

Литература

1. Viola P., J. M. // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2001. — Vol. 1. — P. 511–518.
2. Viola P., M. J. // International Journal of Computer Vision. — 2004. — Vol. 57, No. 2. — P. 137–154.
3. Zhang, K. // IEEE Signal Processing Letters. — 2016. — Vol. 23, No. 10. — P. 1499–1503.
4. Yale face database — URL: <http://vision.ucsd.edu/content/yale-face-database>
5. Huang, G. B. Labeled faces in the wild: A database for studying face recognition in unconstrained environments: Tech. Rep. 07-49 .
6. Rafael werneck - flickr-dog dataset — URL: <http://www.recod.ic.unicamp.br/~rwerneck/datasets/flickr-dog/>
7. 100 greatest sports photos of all-time - sports illustrated — URL: <https://www.si.com/more-sports/2012/12/17/100-greatest-sports-photos-all-time-final>.

НЕИНВАЗИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА МОЛЕКУЛ В НАСЕКОМЫХ-ГАЛЛООБРАЗОВАТЕЛЯХ МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

М. И. Никельшпарг¹, Э. И. Никельшпарг², В. В. Аникин³, Д. Н. Браташов³

¹Гимназия № 3, 410012, Саратов, Б.Казачья 121, e-mail: matveynikel@yandex.ru;

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

³Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Разработан методический подход для неинвазивного исследования молекулярного состава насекомых-галлообразователей методом комбинационного рассеяния света (КР) с использованием двух длин волн возбуждающего излучения: 532 нм и 785 нм. Доказана применимость данного подхода для исследования одного и того же насекомого на разных стадиях развития.

ВВЕДЕНИЕ

Использование спектроскопии комбинационного рассеяния (КР, Рамановской спектроскопии) для исследования биологических объектов имеет множество преимуществ. Одно из них – неинвазивность метода, так как на объект воздействуют только светом [1]. Это особенно актуально для изучения развития живых насекомых, ведущих скрытый образ жизни. К таким насекомым относятся галлообразователи – насекомые, которые проходят несколько совершенно разных стадий в своем развитии внутри закрытого пространства, в связи с чем их изучение особенно затруднительно [2,3]. Методом КР можно исследовать молекулярный состав животных – содержание белков, липидов, углеводов, пигментов и др.. Знание молекулярного состава имеет не только фундаментальное значение, так как некоторые галлообразователи являются вредителями в сельском хозяйстве, поэтому изучение прохождения насекомыми различных стадий поможет выработать оптимальную защиту от них.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Авторы собирали галлы, образованные *Aulacidea hieracii* l., 1758 (Hymenoptera: Cynipidae), на растении ястребинка могучая (*Hieracium x robustum*) в Волжском районе г. Саратова. В работе использовался КР-микроспектрометр inVia Renishaw (UK) с лазером 532 нм и 785 нм. Из галлов извлекали опытных живых личинок или куколок галлообразователей на предметное стекло и сразу же регистрировали спектры КР.

Для изучения неинвазивности метода для данных животных было последовательно проведено два эксперимента. В первом эксперименте многократно в разных точках тела облучались личинки *A. hieracii*. Через неделю облученные личинки превратились в куколки, и их снова многократно облучали лазером. После экспериментов куколки были помещены в чашку Петри на «доразвитие». В экспериментах были организованы контрольные группы и личинок, и куколок, на которых ничем не воздействовали. Все три чашки Петри были оставлены под наблюдение за развитием насекомых на четыре месяца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

КР спектры личинки орехотворки, изолированной из галла, при облучении лазерами 532 и 785 нм содержат множество пиков. Каждый пик на спектре КР характеризует колебания определенных групп атомов. При облучении лазером 532 нм (рис. 1а) выявляется 3 наиболее интенсивных пика: 1002, 1156 и 1522 см^{-1} , характеризующих колебания связей в молекулах каротиноидов, обладающих резонансным спектром при возбуждении данной длиной волны [4–6]. Таким образом, мы показали, что в личинках насекомых орехотворок содержатся каротиноиды, предположительно полученные от растения (галла). Роль каротиноидов в галлах и личинках галлообразователя пока неясна, возможно, они нужны для защиты от окислительного стресса растения, который может индуцироваться самим насекомым в ответ на повреждение тканей растения [7].

Чтобы исследовать другие молекулы в личинках насекомых, мы регистрировали спектры с использованием ближнего инфракрасного облучения 785 нм (рис. 1в). Наиболее интенсивные пики на спектре, 1440 и 1656, характеризуют колебания связей CH_2 - и $\text{C}=\text{C}$ в липидах, соответственно [8,9]. Также на спектре присутствуют пики хитина, что характерно для кутикулы насекомых, а также белки, триглицериды и полисахариды, которые предположительно могут выступать в качестве криопротекторов, необходимых для зимовки. Спектры КР в высокочастотной области содержат характерную структуру для молекул липидов. Липидный состав насекомых, как правило, включает C_6 - C_{20} как насыщенные, так и

ненасыщенные ЖК в кутикуле [10] и C₆-C₂₂ в теле насекомого [11,12]. Исследования спектров КР в высокочастотной области позволяет исследовать состав и конформацию липидов в личинках. Подробная расшифровка пиков на спектрах представлена в таблице 1.

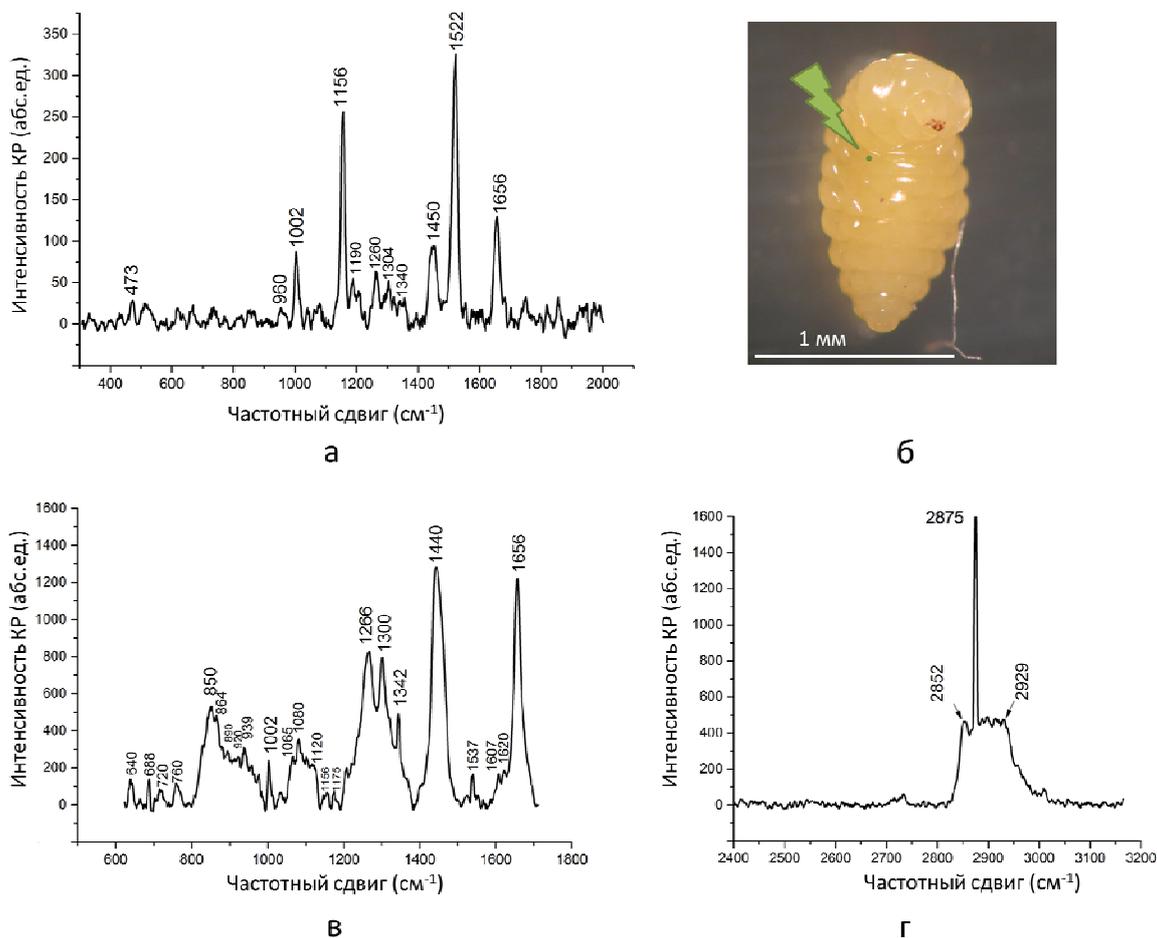


Рис.1. а) Спектр КР личинки *Aulacidae hieracii*, изолированной из галла. Лазер 532 нм, мощность 2мВт. Спектр из картированной области в режиме режим streamline с экспозицией 1 с. Объектив x5. б) Личинка орехотворки под бинокляром. Зеленой точкой обозначено примерный размер лазерного пятна 532 нм. в) Спектр КР личинки *Aulacidae hieracii*, изолированной из галла. Лазер 785 нм, мощность 3 мВт на место регистрации. Экспозиция 10 с, 6 накоплений, объектив x50. г) Спектр КР личинки *Aulacidae hieracii*, изолированной из галла. Лазер 785 нм, высокочастотная область спектра. Положение максимумов пиков показаны цифрами.

Личинка *A. hieracii* в осенне-зимний период превращается в куколку. Мы регистрировали КР спектры куколки, которые, как и КР спектры личинки, содержат характерные пики каротиноидов (рис. 2., черный спектр). Мы регистрировали спектры КР куколки *A. hieracii*, с личинки которой ранее регистрировали спектры КР с использованием лазера 532 нм (рис. 2, красный спектр). Спектр, полученный с такой куколки, не отличался по составу и

интенсивности от спектра КР контрольной куколки насекомого, не подвергавшейся облучению. Все насекомые, использованные в эксперименте, нормально развивались и превратились в имаго, как и в контрольной группе, на которую ничем не воздействовали. Это свидетельствует о неинвазивности метода КР в применении к ювенильным формам насекомых.

Таблица 1. Расшифровка пиков спектров КР насекомых.

532 нм	
$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	
960	Фосфолипиды; каротиноиды: деформация хинонового кольца в плоскости, внеплоскостное кружение вокруг С-С связей.
1002	Каротиноиды: С-СН ₃ , фенилаланин
1156	С-С, С-N и С=C в каротиноидах и в белках
1190	Фосфаты, нуклеотиды
1260	Каротиноиды: С-СН ₃ валентные, Амид III в белках, в меньшей степени СН ₂ в липидах
1304	Деформация СН ₂ - в каротиноидах и жирных кислотах
1340	Белки, липиды
1450	Преимущественно липиды: деформация СН ₂ , С-N
1522	-С=C- в каротиноидах
1656	Амид I в белках
785 нм	
$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	
640	Хитин
720	Липиды, мембранные фосфолипиды, триглицериды, ДНК
760	Триптофан, порфирин (гем <i>b</i>)
850	Белки, полисахариды
864	Фосфаты
890	Сахара, триптофан
910-20	Сахара, гликоген
939	Колебания С-С связей
1002	Каротиноиды: С-СН ₃ , фенилаланин
1065	Липиды, жирные кислоты: С-С, <i>all-trans</i>
1080	Фосфолипиды, липиды, <i>gauche</i>
1120	Каротиноиды, порфирины
1156	Растяжение связей С-С, С-N и С=C в каротиноидах и белках
1175	Изгиб связи С-N в тирозине (белки), цитозине, гуанине (нуклеиновые кислоты)
1265	Хитин, амид III (белки)
1300	Липиды: деформация СН ₂ -
1342	Липиды, белки
1440	Липиды: деформация СН ₂ -
1537	Белки, ароматические соединения, порфирины
1607	Цитозин, тирозин, порфирин
1622	Хитин, n(C=C), порфирин (гем <i>b</i>), триптофан
1656	n(C=C) <i>cis</i> липиды
2852	Липиды
2875	Липиды, холестерин: деформация СН ₂ -
2929	Липиды: колебания СН ₃ -

Основано на статьях [4,5,8,12–14].

ВЫВОДЫ

Таким образом, КР спектроскопия позволяет исследовать молекулярный состав насекомых неинвазивно, что особенно актуально при исследовании одного и того же насекомого, проходящего разные стадии развития. Информация, полученная с помощью КР, позволит в дальнейшем ответить на ряд открытых вопросов: меняется ли молекулярный состав в процессе развития насекомого, есть ли отличия между разными видами насекомых, каковы пути поступления и превращения каротиноидов и других молекул в насекомых и др.

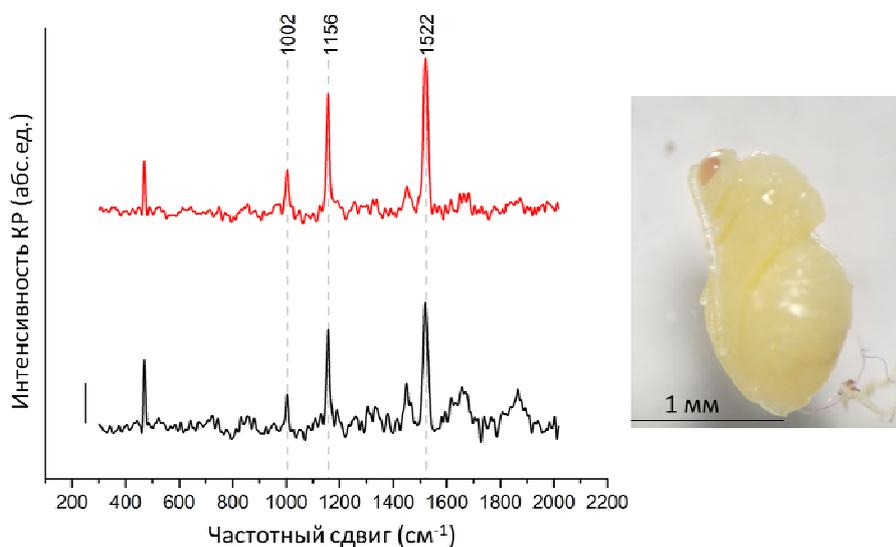


Рис.2. Спектры КР куколок *Aulacidae hieracii*, изолированных из галла. Спектр красного цвета получен от куколки насекомого, с личинки которого регистрировали 6 спектров КР с использованием лазера 532 нм при тех же условиях. Спектр черного цвета получен от куколки насекомого, не облученного ранее. Лазер 532 нм, мощность 2 мВт. Объектив х5. Слева – фотография куколки *Aulacidae hieracii* под бинокулярным микроскопом.

Литература

1. Vlasov A. V. et al. // Crystals. - 2020. - Vol. 10.- № 1.- P. 38.
2. Anikin V. V. et al. // Entomol. Parasitol. Investig. Volga Reg. - 2018. - № 15. - P. 82–88.
3. Anikin V. V., Nikelshparg M.I., Lavrentiev M. V. // Sci. Work. Natl. Park “Khvalynsky.” - 2017. - № 9. - P. 241–244.
4. Baranski R., Baranska M., Schulz H. // Planta. - 2005. - Vol. 222. - № 3. - P. 448–457.
5. Radu A.I. et al. // Analyst. Royal Society of Chemistry. - 2016. - Vol. 141. - № 14. - P. 4447–4455.
6. Kutuzov N.P. et al. // Biophys. J. Biophysical Society. - 2014. - Vol. 107. - № 4. - P. 891–900.
7. Heath J.J., Cipollini D.F., Stireman III J.O. // Arthropod. Plant. Interact. - 2013. - Vol. 7. - № 1. - P. 1–20.
8. Wu H. et al. // Proc. Natl. Acad. Sci. - 2011. - Vol. 108. - № 9. - P. 3809–3814.
9. Brazhe N.A. et al. // J. Raman Spectrosc. - 2017. - Vol. 48. - № 9. - P. 1158–1165.
10. Gołobowski M. et al. // Lipids. - 2012. - Vol. 47. - № 6. - P. 613–622.
11. Gołobowski M. // Lipids. - 2012. - Vol. 47. - № 10. - P. 1001–1009.
12. Lockey K.H. // Comp. Biochem. Physiol. Part B Biochem. - 1988. - Vol. 89. - № 4. - P. 595–645.
13. Truchet M., Mauchamp B. Characterization of the Insect Cuticle Layers by Laser Raman Spectrometry // Chitin in nature and technology / ed. Gooday G., Jeuniau C., Muzzarelli R. New-York: Plenum Press, 1986. P. 13–19.
14. Iconomidou V. a et al. // Insect Biochem. Mol. Biol. - 2001. - Vol. 31. - № 9. - P. 877–885.

СПЕКТРОСКОПИЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУМЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ЯМР В АНАЛИЗЕ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ 1,3-ДИПОЛЯРНОГО ЦИКЛОПРИСОЕДИНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ АЗОМЕТИН-ИЛИДОВ И 3-ФЕНИЛ-1-(ПИРРОЛ-2-ИЛ)ПРОПЕН-2-ОНОВ

С.В. Борисова, Э.И. Киселева, В.В. Сорокин, И.Н. Ключкова
Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Предложены подходы, позволяющие с помощью ЯМР спектроскопии (^1H , ^{13}C , HSQC, HMBC, NOESY-2D) установить особенности строения продуктов и механизма реакции 1,3-диполярного циклоприсоединения некоторых азометин-илидов, генерируемых *in situ*, и 3-фенил-1-(пиррол-2-ил)пропен-2-онов, проводимой в режиме многокомпонентного взаимодействия.

ВВЕДЕНИЕ

Двумерная спектроскопия ядерного магнитного резонанса позволяет получить обширные сведения о структуре продукта органического синтеза, что незаменимо при анализе механизмов реакций, в частности регио- и стереохимического направления синхронных процессов, таких как 1,3-диполярное циклоприсоединение. В настоящее время 1,3-диполярные реакции азометин-илидов эффективно используются для конструирования пирролидинового кольца [1,2]. С помощью различных методик двумерной ЯМР спектроскопии нами были исследованы продукты взаимодействия 3-фенил-1-(пиррол-2-ил)пропен-2-онов **1a-d** и азометин-илидов, генерированных *in situ*.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Реакция 1,3-диполярного циклоприсоединения 3-фенил-1-(пиррол-2-ил)пропен-2-онов **1a-d** и азометин-илидов, генерированных *in situ* из изатина и аминокислот (**2a,b**), а также изатина и бензиламина (**3**), теоретически способна приводить к различным регио- и стереоизомерам. Нами установлено, что продуктами являются 1'-метил-4'-фенил-3'-(1H-пиррол-2-ил)спиро[индолин-3,2'-пирролидин]-2-оны **2a-d** (в реакции с саркозином **2a**), 1'-фенил-2'-(1H-пиррол-2-ил) 1',2',5',6',7',7a'-гексагидроспиро[индолин-3,2'-пирролизин]-2-оны (в реакции с пролином **2b**) и 4',5'-дифенил-3'-(1H-пиррол-2-ил)спиро[индолин-3,2'-пирролидин]-2-оны **4a,b** (в реакции с бензиламино).

Состав и строение продуктов подтверждены данными элементного анализа, одномерных и двумерных ЯМР $^1\text{H}/^{13}\text{C}$. В спектре ЯМР ^1H присутствуют ключевые сигналы протонов пирролидинового цикла (для продуктов **2a-d** и **4a,b**) и пирролизидинового цикла (продукты **3a,b**). В ароматической области спектров находятся сигналы протонов фенильных заместителей, протонов оксоиндольного кольца и протонов пиррольного кольца, что особенно важно для дальнейшей обработки корреляций в двумерных спектрах.

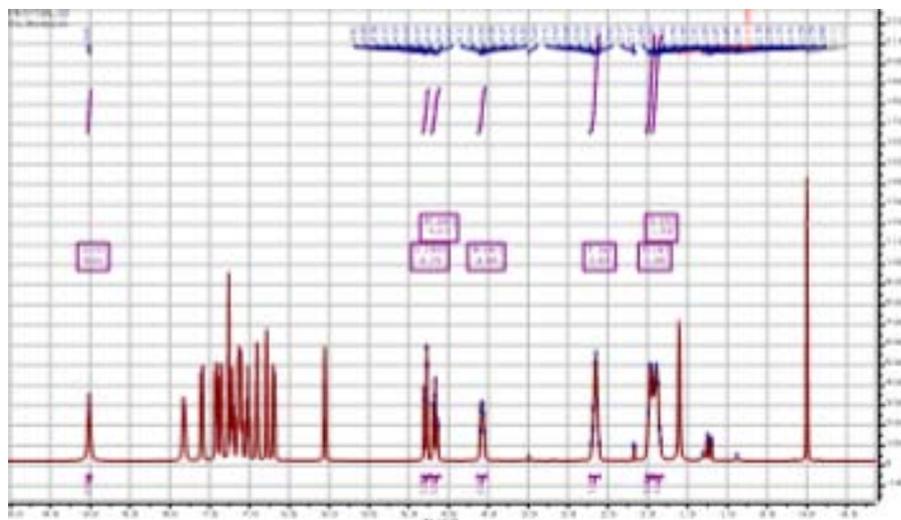
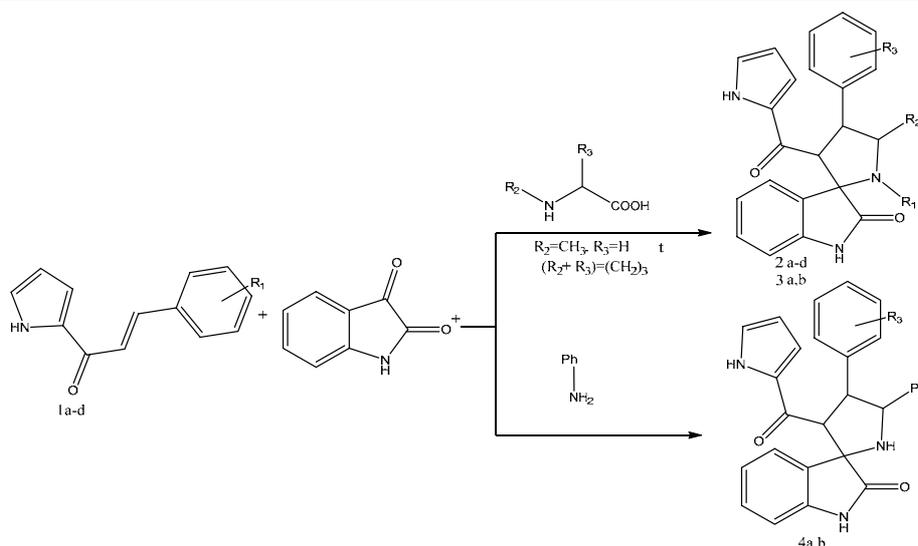


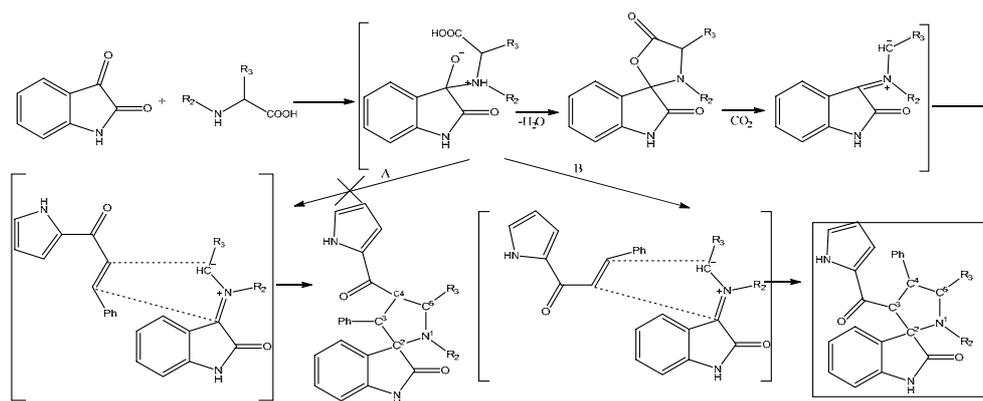
Рис.1. Спектр ЯМР ^1H 4',5'-дифенил-3'-(1Н-пиррол-2-ил)спиро[индолин-3,2'-пирролидин]-2-она **3a**

Однозначное отнесение оставшихся сигналов атомов углерода пирролидинового цикла пирролизидинового цикла проведено на основании кросс-пиков двумерной спектроскопии HSQC. В спектре HSQC соединения **3a** важно отметить кросс-пики, корреляции протонов и атомов углерода пирролидинового кольца: 4.39 м.д./61.10 м.д.(C^3), 3.55 м.д. и 3.43 м.д./60.54 м.д(C^5), 5,06 м.д./40.32 м.д(C^4). Сигнал 74.40 м.д. не имеет кросс-пика, что позволяет идентифицировать его как спироциклический атом C^2 .

Как известно, изатин вступает в реакции конденсации с образованием нестабилизированных азометин-илидов посредством реакций декарбоксилирования с аминокислотами и их производными [3], а также последующего 1,5-прототропного сдвига [4] с бензиламином. Таким образом, используя разные реагенты, мы варьируем и природу образованного диполя, а значит, и его реакционную способность и селективность.

Так как в ходе циклоприсоединения теоретически возможно образование двух региоизомеров **6** и **6'** по пути А и В, различающихся заместителями в 3 и 4 положениях

образованного цикла, благодаря различной ориентации диполя и диполярофила в момент взаимодействия, то для однозначного определения строения продуктов необходимо было проанализировать также корреляционные спектры НМВС. Вне зависимости от типа образованного продукта и природы реагирующего диполя в этих спектрах наблюдается корреляция протона в третьем положении и карбонильного атома углерода (185,39/439), а также протона в четвертом положении и нескольких атомов углерода бензольного кольца, что однозначно свидетельствует об образовании продукта типа 6.



Вне зависимости от типа образованного продукта и природы реагирующего диполя в этих спектрах наблюдается корреляция протона при C^3 и карбонильного атома углерода (185,39/439), а также протона в четвертом положении и нескольких атомов углерода бензольного кольца, что однозначно свидетельствует об образовании продукта типа 6.

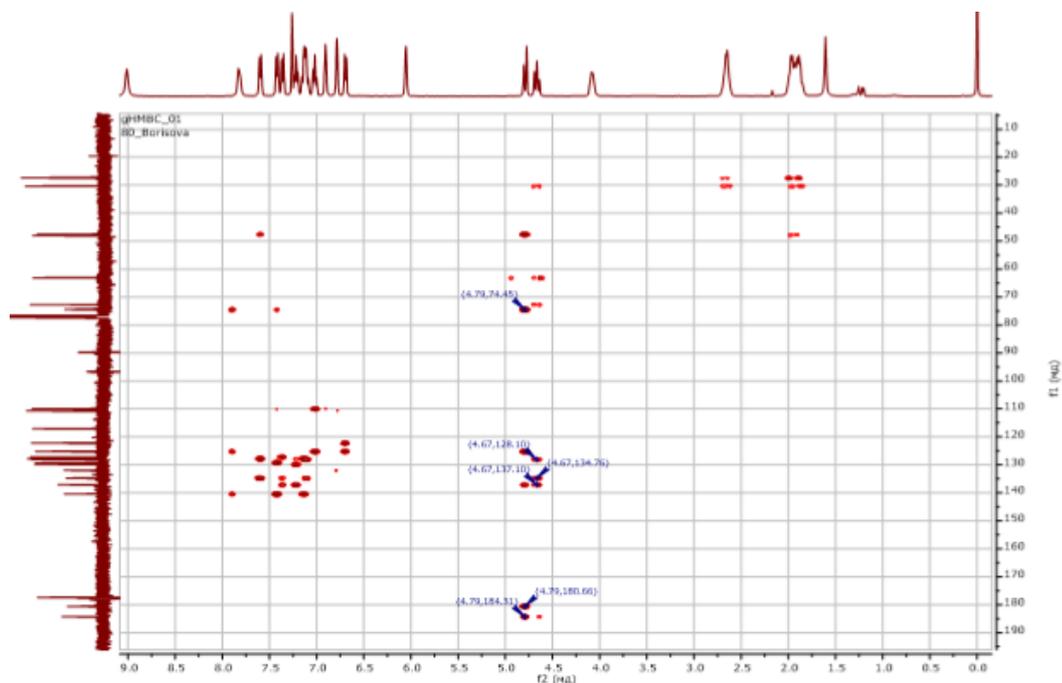


Рис. 2. НМВС спектр 4',5'-дифенил-3'-(1H-пиррол-2-ил)спиро[индолин-3,2'-пирролидин]-2-она 3a

Особенности стереохимического строения полученных продуктов были оценены с помощью двумерной гомоядерной NOESY-1d спектроскопии. Отсутствие корреляции между протонами при C³ и C⁴ пирролидинового цикла говорит об их трансoidalном расположении, соответствующему исходным халконам, что подтверждает синхронность процесса 1,3-диполярного циклоприсоединения.

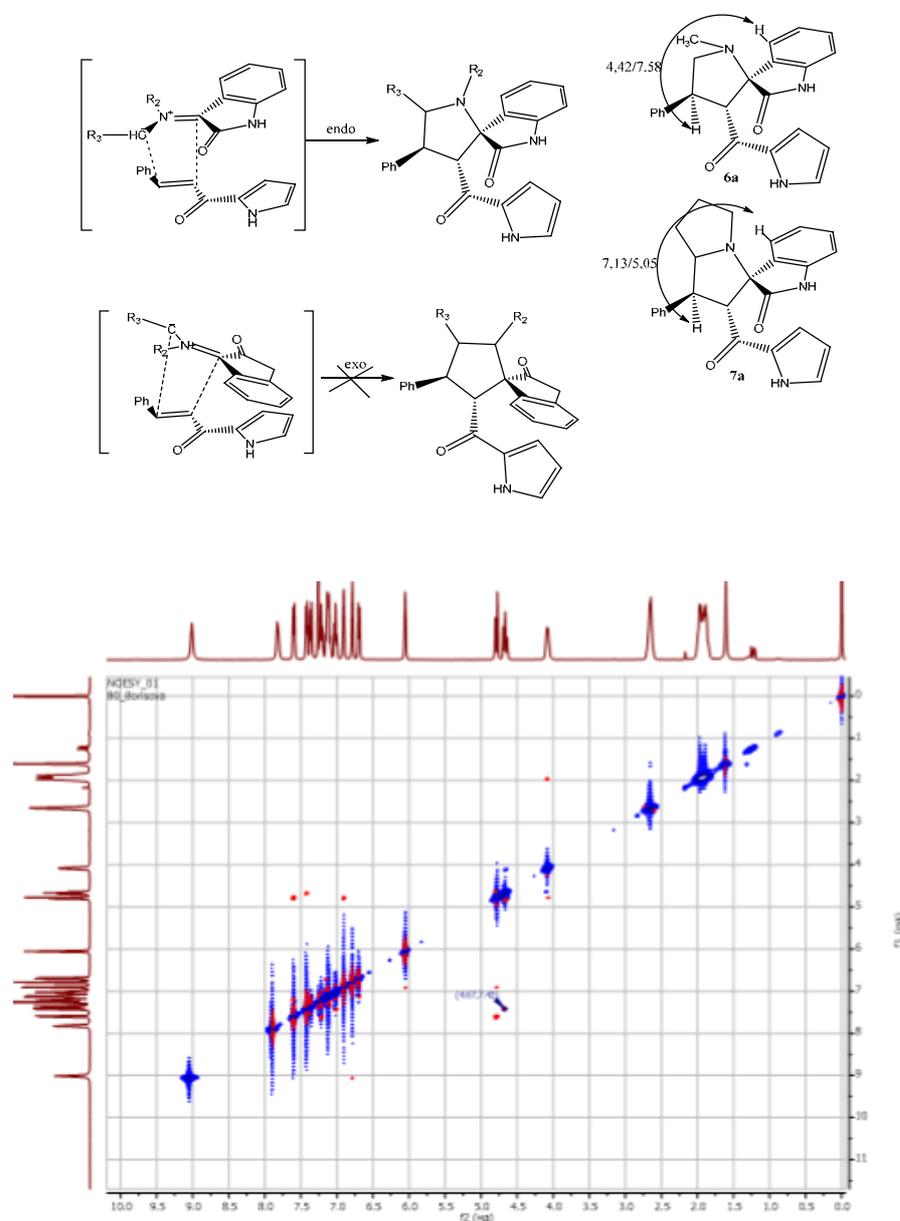


Рис. 3. NOESY-1d спектр 4',5'-дифенил-3'-(1H-пиррол-2-ил)спиро[индолин-3,2'-пирролидин]-2-она **3a**

Усиление сигнала протона оксоиндольного кольца приводит к NOE-усилению сигнала протона при атоме углерода C⁴ пирролидинового кольца, что говорит о пространственной сближенной этих фрагментов, а значит и прохождении эндо-циклоприсоединения. Получение эндо-аддукта вне зависимости от природы реагирующего диполя можно объяснить меньшей устойчивостью переходного состояния, ведущего к экзо-аддукту благодаря взаимному отталкиванию фенильного и оксоиндольного ароматических колец.

Таким образом, благодаря анализу данных спектроскопии ЯМР определено строение продуктов реакции 1,3-диполярного циклоприсоединения некоторых азометин-илидов и 3-фенил-1-(пиррол-2-ил)пропен-2-онов. Доказано, что механизм включает в себя синхронное взаимодействие азометин-илидов, получаемых в ходе реакции, и диполярофилов. Детальное изучение структуры продуктов позволяет делать выводы о реакционной способности разных диполей, полученных из изатина, а также особенностях взаимодействия с выбранными диполями.

Литература

1. Shankar, M. //J: Tetrahedron.- 2016.- Vol.13. - P.1603-1644.
2. Nájera C., Sansano J. // J: Organic Chemistry. – 2003.- Vol.7. – P. 1105-1150.
3. Аниськов А. А., Клочкова И. Н., Щекина М. П. и др. // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. - 2016. - Т. 16. - Вып. 1. – С. 13 - 17.
4. Tumskiy R.S., Burygin G.L., Anis'kov A.A. et al. // Pharmacological Reports. – 2019. – Vol. 71. – №. 2. – P. 357-360

ЯМР-СПЕКТРОСКОПИЯ В УСТАНОВЛЕНИИ СТРОЕНИЯ ПОЛИЗАМЕЩЁННЫХ ПИРИДИНОВ И ТИАЗОЛОПИРИМИДИНОВ

А.А. Мещерякова, Н.О. Василькова, Е.С. Васильева, В.В. Сорокин, А.П. Кривенько
Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Методами одномерной (ЯМР ^1H) и двумерной (HSQC, HMBC) спектроскопии установлено строение и изучены изомеризационные превращения соединений ряда гидрокситиазолопиримидинкарбоксилатов, их дегидратированные формы и хроменопиридинкарбонитрилов. Исследуемые соединения получены постадийно или трёхкомпонентной конденсацией гетероциклических аминов (1,3-тиазол-2-амин, 2-аминопиридин), замещённых ароматических альдегидов и метиленактивных соединений (ацетоуксусный эфир, малонитрил).

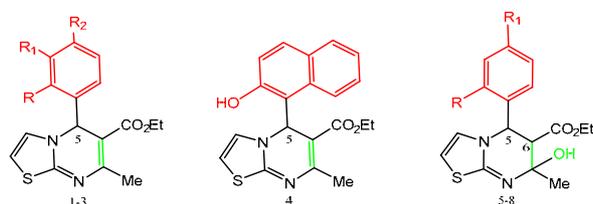
Спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР-спектроскопия) является одним из наиболее оперативных и информативных современных методов идентификации и установления строения органических соединений, механизмов химических реакций.

Для изучения сложнопостроенных полизамещённых соединений используются методы одномерной (ЯМР ^1H) и двумерной (HSQC, HMBC) спектроскопии. О строении соединения можно судить по положению сигналов в спектре ЯМР ^1H , их мультиплетности и интегральным интенсивностям, корреляции между атомными ядрами двух разных типов в двумерных спектрах HSQC и HMBC, и т.д.

Ранее нами синтезированы новые соединения ряда тиазолопиримидина, отличающиеся наличием или отсутствием гидроксильной группы в пиримидиновом фрагменте и числом, природой и положением замещающих групп в арильном заместителе [1].

Строение синтезированных веществ установлено спектральными методами (ЯМР ^1H , ^{13}C , HSQC $^1\text{H}/^{13}\text{C}$, HMBC $^1\text{H}/^{13}\text{C}$). В ЯМР ^1H спектре тиазолопиримидинкарбоксилатов **1-4**,

не содержащих гидроксильную группу в пириимидиновом фрагменте, ключевыми сигналами являются синглеты протонов H^5 (с, 6.15 - 6.22 м.д.), наряду с протонами тиазольного фрагмента H^2 (д, 6.49- 6.80 м.д.), H^3 (д, 7.10 - 7.26 м.д.), этильной группы $\underline{CH_2}CH_3$ (м, 3.98-4.03 м.д.), $CH_2\underline{CH_3}$ (м, 1.11-1.20 м.д.), метильной группы (с, 2.17 – 2.92 м.д.) и бензольного цикла (м, 7.27-7.35 м.д.).



R= R₁= R₂ = H (**1**); R= Cl, R₁=R₂=H (**2**); R=H, R₁=OCH₃, R₂=OH (**3**); R=NO₂, R₁=H (**5**); R=CH₃, R₁=H (**6**); R=H, R₁=Cl (**7**); R=H, R₁=Br (**8**)

На рисунке 1 приведен ЯМР 1H спектр одного из представителей ряда этил 5-(4-гидрокси-3-метоксифенил)-7-метил-5Н-тиазоло[3,2-а]пириимидин-6-карбоксилата **3**.

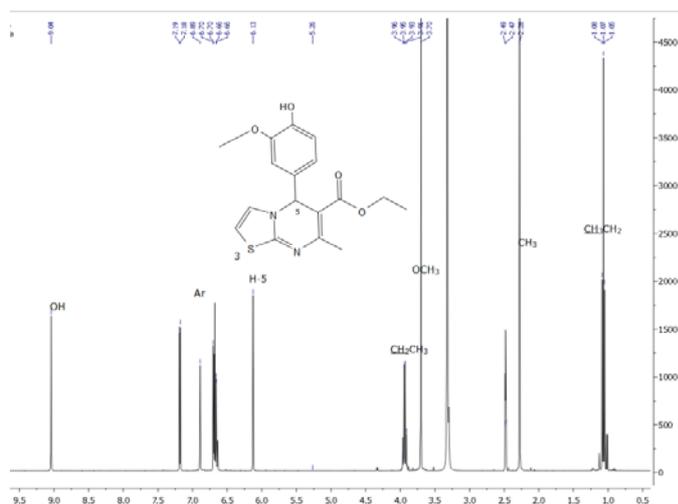


Рис.1. ЯМР 1H спектр (δ м.д.) этил 5-(4-гидрокси-3-метоксифенил)-7-метил-5Н-тиазоло[3,2-а]пириимидин-6-карбоксилата (**3**) (Varian 400, ацетон- d_6).

В отличие от гетеросистем **1-4** в ЯМР 1H спектре гидроксизамещенных тиазолопириимидинкарбоксилатов **5-8** ключевыми сигналами являются дублеты протонов H^5 (д, 5.95- 6.33 м.д.), H^6 (д, 3.94- 4.17 м.д.), синглеты гидроксильной группы (с, 1.16- 2.15 м.д.). Особенностью гидроксизамещенных систем **5-7** является удвоение сигналов протонов H^5 (д, 6.27 м.д.; д, 6.41 м.д.), H^6 (д, 4.35 м.д.; д, 4.49 м.д.), гидроксильной (с, 2.15 м.д.; с, 2.83 м.д.), $\underline{CH_2}CH_3$ (м, 3.95-4.06; м, 4.08-4.18 м.д.), $CH_2\underline{CH_3}$ (т, 1.03 м.д.; т, 1.13 м.д.), метильной (с, 2.27 м.д.) групп, тиазольного и бензольного (м, 6.57-8.05 м.д.) колец, что указывает на их существование в форме двух диастереомеров вследствие наличия нескольких асимметрических центров.

На рисунке 2 приведен ЯМР 1H спектр одного из представителей ряда этил 5-(2-нитрофенил)-7-гидрокси-7-метил-5Н-6Н-тиазоло[3,2-а]пириимидин-6-карбоксилата **5**.

Подтверждением существования соединений **5-7** в форме двух диастереомеров являются их спектры ЯМР ^{13}C , в которых присутствуют два сигнала карбонильного атома углерода (199 м.д., 205 м.д.).

Удвоение сигналов наблюдается также в корреляциях двумерного спектра HSQC $^1\text{H}/^{13}\text{C}$ тиазолопиримидинкарбоксилата **5** (рис. 3), который позволил однозначно отнести атомы водорода к sp^3 гибридным атомам углерода: 1.03/13.54, 1.13/13.56 ($\text{CH}_2\text{CH}_3/\text{CH}_2\text{CH}_3$), 2.44/27.94 (CH_3/CH_3), 4.01/61.58, 4.18/62.19 ($\text{CH}_2\text{CH}_3/\text{CH}_2\text{CH}_3$), 4.26/62.32, 4.45/60.29 (H^6/C^6), 6.05/55.32, 6.33/53.35 (H^5/C^5).

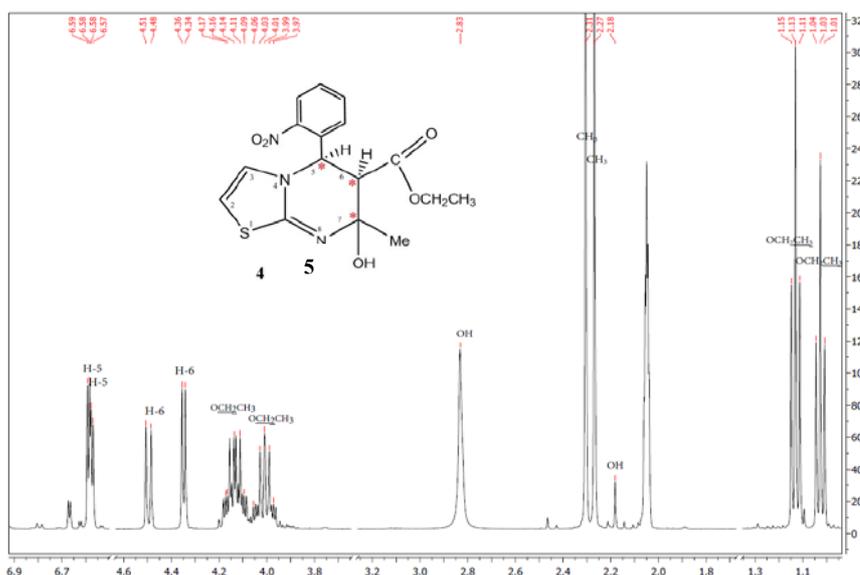


Рис.2. ЯМР ^1H спектр (δ м.д.) этил 5-(2-нитрофенил)-7-гидрокси-7-метил-5Н-6Н-тиазоло[3,2-а]пиримидин-6-карбоксилата (**5**) (Varian 400, ацетон- d_6).

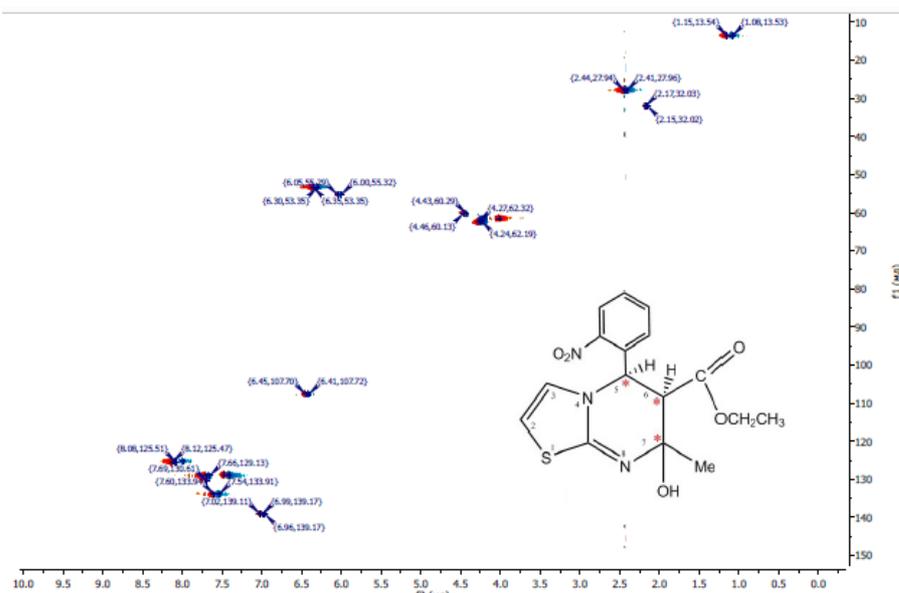


Рис. 3. Спектр HSQC $^1\text{H}/^{13}\text{C}$ этил 5-(2-нитрофенил)-7-гидрокси-7-метил-5Н-6Н-тиазоло[3,2-а]пиримидин-6-карбоксилата (**5**)

Спектр двойного резонанса HMBC на примере соединения **5** зафиксировал сигналы сближенных в пространстве атомов водорода и углерода. В спектре (рис. 4, а)) присутствуют

кросс-пики пространственно сближенного протона H⁶ с атомами углерода сложноэфирной, метильной, карбонильной групп, атома углерода ароматического кольца (H⁶/C₁' (4.45 м.д./13.54 м.д.), H⁶/C₆' (4.45 м.д./27.94 м.д.), H⁶/C₅' (4.45 м.д./62.19 м.д.), H⁶/C₁' (4.45 м.д./168.2 м.д.), H⁶/C=O (4.43 м.д./199.8 м.д.)), а в спектре (рис.4, б)) протона H⁵ с атомами углерода пиримидинового цикла (C⁶, C^{8a}), ароматического кольца (C¹) (H-5/C⁶ (6.33 м.д./60.29 м.д.), H⁵/C^{8a} (6.33 м.д./135.37 м.д.), H⁵/C¹ (6.33 м.д./168.2 м.д.)).

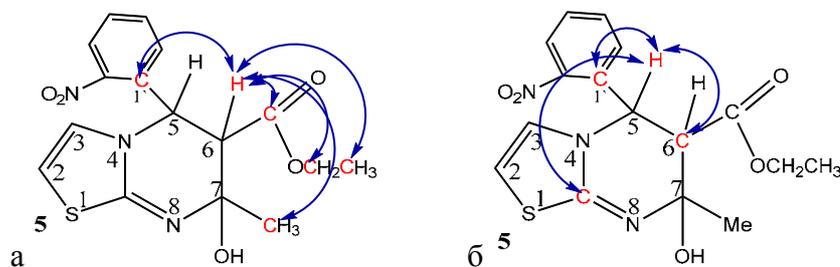
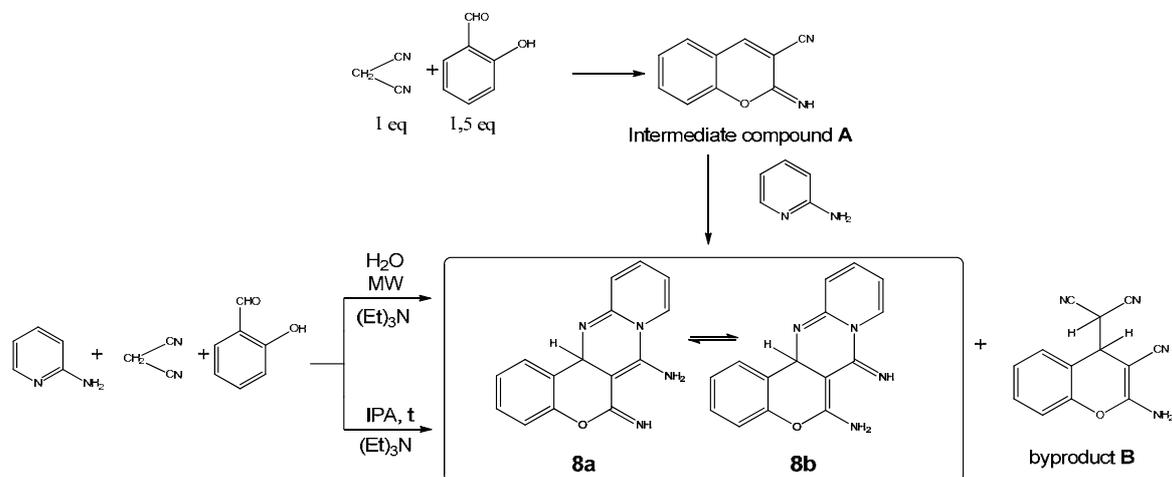


Рис. 4. Корреляции в HMBC ¹H/¹³C спектре протона H-6 (а) и протона H-5 (б) этил 5-(2-нитрофенил)-7-гидрокси-7-метил-5Н-6Н-тиазоло[3,2-а]пиримидин-6-карбоксилата (5)

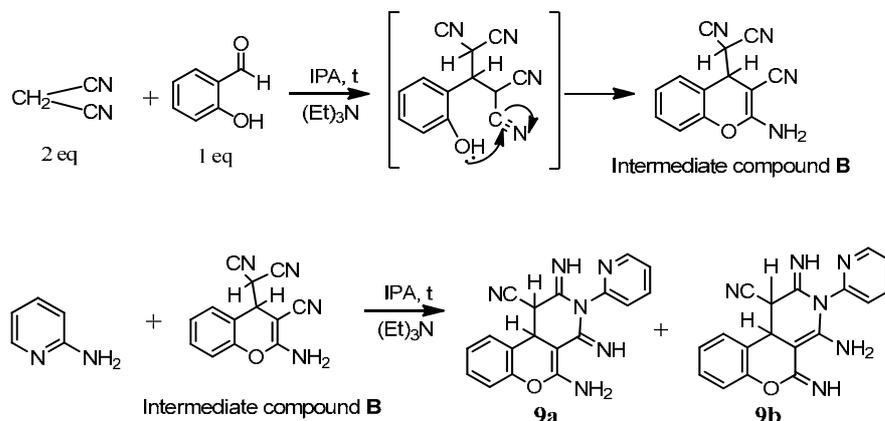
Также ранее нами была синтезирована серия новых полизамещенных пиридопиримидинов **8a,b** путём трехкомпонентной конденсации 2-аминопиридина с малонодинитрилом и салициловым альдегидом или постадийно через промежуточный продукт циклоконденсации малонодинитрила (1 экв.) с салициловым альдегидом (1,5 экв.) – 2-имино-2Н-хромен-3-карбонитрил **A**.



Строение полученных соединений ряда хроменопиридопиримидинов **8a,b** установлено с привлечением методов одномерной (ЯМР H¹) и двумерной (HSQC ¹H/¹³C и HMBC ¹H/¹³C) спектроскопии [2].

Изменение соотношения малонодинитрила (2 экв.) и салицилового альдегида (1 экв.) в начальной реакции циклоконденсации приводит к образованию другого промежуточного продукта - 2-(2-амино-3-циано-4Н-хромен-4-ил)малонитрила **B**. Следовательно,

последующая реакция промежуточного продукта с 2-аминопиридином привела к образованию новых хроменопиридинкарбонитрильных систем **9a,b**.



Соединения 5-амино-2,4-диимино-3-(пиридин-2-ил)-2,3,4,10b-тетрагидро-1H-хромено[3,4-с]пиридин-1-карбонитрил **9a** и 4-амино-2,5-диимино-3-(пиридин-2-ил)-2,3,5,10b-тетрагидро-1H-хромено[3,4-с]пиридин-1-карбонитрил **9b** реализуются в виде смеси amino-имино таутомеров, что доказано с помощью одномерной (ЯМР ¹H) и двумерной (HSQC ¹H/¹³C и HMBC ¹H/¹³C) спектроскопии.

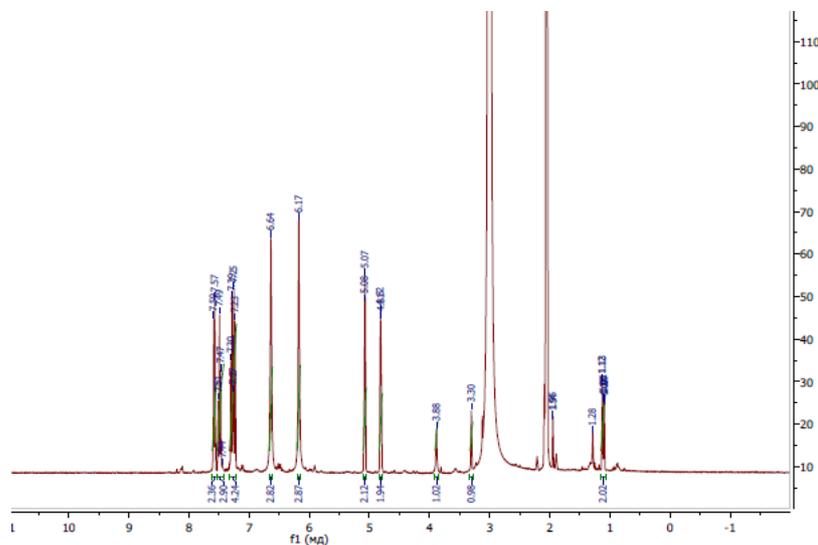


Рис. 5. ЯМР ¹H спектр смеси таутомеров 2,4-диамино-5-имино-3-(пиридин-2-ил)-5,10b-дигидро-3H-хромено[3,4-с]пиридин-1-карбонитрила **9a** и 2,5-диамино-4-имино-3-(пиридин-2-ил)-4,10b-дигидро-3H-хромено[3,4-с]пиридин-1-карбонитрила **9b**.

В ЯМР ¹H спектре таутомерной смеси **9a,b**, представленном на рисунке 5, характерными являются сигналы синглетов первичных (6.64 и 6.17 м.д.) и вторичных (3.88; 3.30 м.д.) аминогрупп, дублета дублетов вицинальных протонов Н¹¹-Н¹⁰ (5.07; 4.81 м.д.), мультиплета фенильного кольца (7.23-8.30 м.д.).

В двумерном спектре COSY ($^1\text{H}/^1\text{H}$) обнаружены кросспики вицинальных протонов $\text{H}^{11}-\text{H}^{10}$ (5.07 м.д.) и (4.81 м.д.), которые коррелируют в спектре HSQC с sp^3 -гибризованными атомами углерода C^{11} (5.07/35.77 м.д.) и C^{10} (4.81/29.98 м.д.).

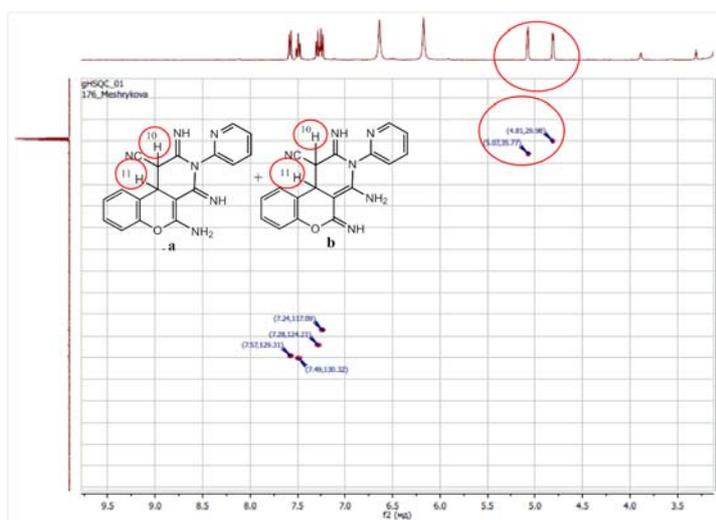


Рис. 6. ЯМР HSQC ($^1\text{H}/^{13}\text{C}$) таутомерной смеси 5-амино-2,4-диимино-3-(пиридин-2-ил)-2,3,4,10b-тетрагидро-1H-хромено[3,4-с]пиридин-1-карбонитрила **9a** и 4-амино-2,5-диимино-3-(пиридин-2-ил)-2,3,5,10b-тетрагидро-1H-хромено[3,4-с]пиридин-1-карбонитрила **9b**.

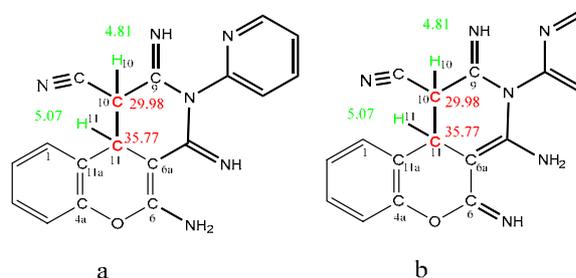


Рис. 7. Корреляции в спектре HSQC ($^1\text{H}/^{13}\text{C}$) таутомерной смеси **9a** и **9b**.

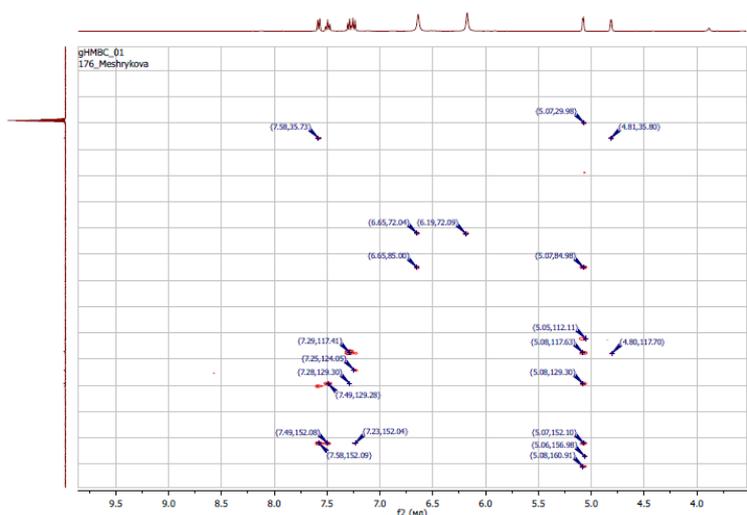


Рис. 8. ЯМР HNBC ($^1\text{H}/^{13}\text{C}$) смеси таутомеров 5-амино-2,4-диимино-3-(пиридин-2-ил)-2,3,4,10b-тетрагидро-1H-хромено[3,4-с]пиридин-1-карбонитрила **9a** и 4-амино-2,5-диимино-3-(пиридин-2-ил)-2,3,5,10b-тетрагидро-1H-хромено[3,4-с]пиридин-1-карбонитрила **9b**.

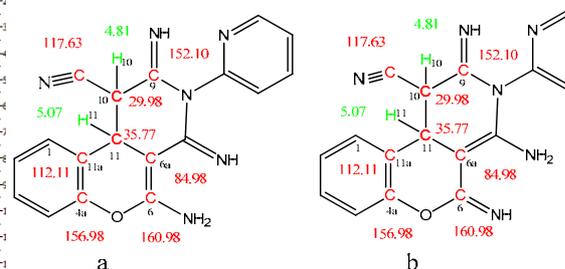


Рис. 9. Корреляции в спектре HNBC ($^1\text{H}/^{13}\text{C}$) смеси таутомеров **9a** и **9b**.

В спектре HNBC ($^1\text{H}/^{13}\text{C}$) была отмечена корреляция протона H^{10} с sp^3 -гибридным C^{10} (4.81/35.77 м.д.) и с sp -гибридным углеродом группы CN (5.07/117.63 м.д.) и корреляция протона H^{11} с sp^3 -гибридными атомами углерода C^{10} (5.07/29.98 м.д.), с sp^2 -гибридными атомами углерода C^{6a} (5.07/84.98 м.д.), C^{11a} (5.07/112.11 м.д.), C^1 (5.07/129.30 м.д.), C^9

(5.07/152.10 м.д.), C^{4a} (5.07/156.98 м.д.), C⁶ (5.07/160.98 м.д.), с sp-гибридным атомом углерода группы CN (5.07/117.63 м.д.).

Анализ полученных спектральных данных одномерной (ЯМР Н¹) и двумерной (HSQC, НМВС) спектроскопии позволил установить строение полученных новых соединений (гидроксизамещенных тиазолопиримидинкарбоксилатов, их дегидратированных форм и хроменопиридинкарбонитрилов), предложить вероятную схему образования тиазолопиримидинкарбоксилатов в трехкомпонентной конденсации, оценить влияние карбонильной компоненты на формирование продуктов, а также дифференцировать тонкую структуру компонентов изомерных смесей хроменопиридинкарбонитрилов в виде аминно-имино таутомеров.

Литература

1. Vasilkova N.O., Nikulin A.V., Krivenko A.P. // Russ.J.Org.Chem. - 2020. - Vol.56. - No. 6. - P. 990-993.
2. Ивонин М. А., Василькова Н. О., Никулин А. В., Мещерякова А. А., Тюлькина И. Р., Сорокин В. В., Кривенько А. П. Определение строения региоизомеров и таутомеров полифункциональных гетероциклических соединений ряда гидрохинолина, гидрохромена, хроменопиридопиримидина. // ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И БИОФОТОНИКИ: материалы 7го Международного симпозиума по оптике и биофотонике и 23й Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting–2019. / Саратовский государственный университет, 2020. С 44-51.

ЭКСИТОННЫЕ СЕРИИ В СПЕКТРАХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ РЬS С РАЗЛИЧНЫМ РАЗМЕРОМ КРИСТАЛЛИТОВ

М.И. Шишкин, Н.Б. Трофимова, А.А. Сердобинцев, Д.Ю. Постнов, А.Г. Роках
Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Впервые обнаружены при комнатной температуре экситонные линии в гетерофазных пленках твердых растворов сульфида кадмия (CdS)-сульфида свинца (PbS), содержащие обособленные кристаллиты сульфида свинца. Пленки получены двумя способами: термическим напылением (с малым содержанием PbS) и гидрохимическим осаждением (с малым содержанием CdS). Сопоставлены данные морфологии таких пленок, которые могут способствовать проявлению эффекта диэлектрического усиления в узкозонных кристаллитах. Обсуждена перспектива наблюдения экситонных линий в слоях, осажденных из растворов содержащих коллоидные квантовые точки PbS.

ВВЕДЕНИЕ

В силу ограниченной взаимной растворимости систем CdS-PbS (максимальная растворимость CdS в PbS порядка 30-40%) пленку при малом содержании PbS можно рассматривать как матрицу широкозонного CdS с узкозонными включениями PbS, которые могут иметь размеры, сравнимые с радиусом экситона [1]. Специфическая особенность гетероструктур – контакт на границе двух разных полупроводников. В подобном мелком структурном образовании наблюдается эффект диэлектрического усиления: поскольку диэлектрическая проницаемость матрицы CdS в 9 значительно меньше диэлектрической

проницаемости включений PbS 170, поле играет существенную роль во взаимодействии возбужденных электрона и дырки во включении – увеличиваются энергия связи и радиус экситона [2]. Если энергия связи экситонов оказывается выше энергии теплового возбуждения kT , возбужденные состояния могут наблюдаться при комнатной температуре оптически – в виде экстремумов в спектрах.

РОЛЬ КРИСТАЛЛИТОВ PbS В ПЛЕНКАХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ И ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

Данные ВИМС и анализ состава пленок CdS-PbS на электронном микроскопе свидетельствуют о содержании свинца преимущественно на поверхности образца. На рис. 1 (слева) представлена микрофотография торцапредварительно отожженной пленки CdS(0.9)-PbS(0.1), полученной термическим напылением, которая свидетельствует о достаточном совершенстве полученной структуры в виде параллельных плоскостей многослойных твердых растворов. Толщина одного слоя $d \sim 80-100$ нм.

В кристаллитах пленки, отожженной на воздухе, отмечалось повышенное содержание кислорода, в то время как свинец и сера обнаруживались в основном вне кристаллитов (в частности в более мелких образованиях). При гидрохимическом осаждении крупные зерна сульфида свинца, имели размеры порядка нескольких микрон и выраженную огранку в форме четырехгранной пирамиды (рис.1, справа), что соответствует кубической структуре, содержащегося в них PbS. Исследование отожженной пленки CdS без добавления свинца не обнаружило появление заметных кристаллитов микронных и субмикронных размеров на поверхности основного вещества.

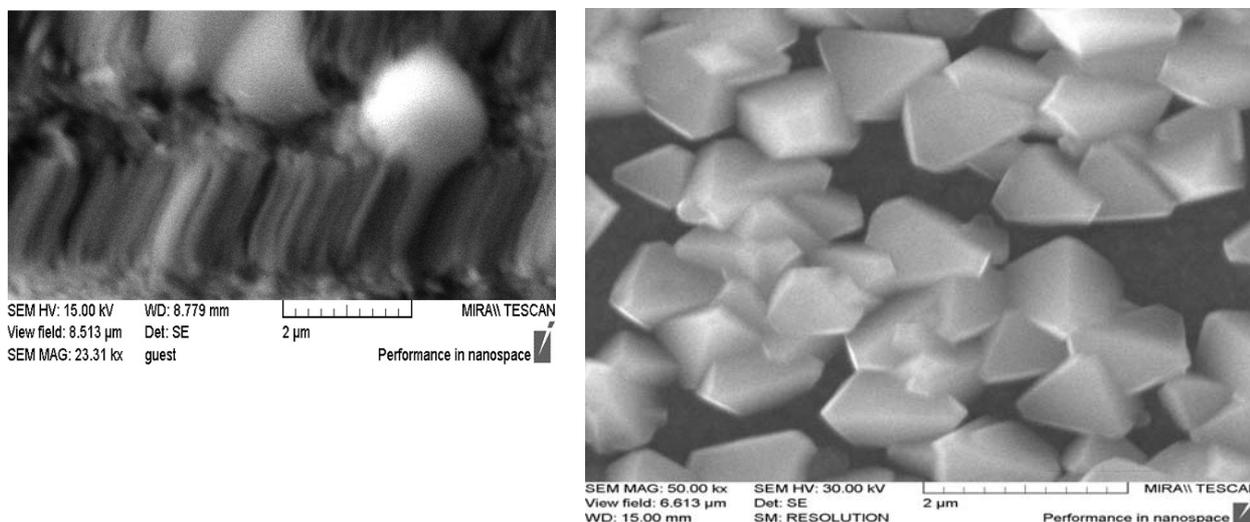


Рис. 1. Микрофотография участка поверхности пленки CdS(0.9)-PbS(0.1) (слева) и пленки PbS(справа)

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

На рис. 2 показаны спектральные зависимости пропускания и отражения пленки CdS(0,9)-PbS (0,1). Как видно из этого рисунка, наряду с минимумами пропускания 1 и 2 (которые соответствуют коротковолновой экситонной серии при $n=1$ и $n=2$), наблюдаются более интенсивные минимумы пропускания 3 и 4 (длинноволновая серия экситонов при $n=1$ и $n=2$). Здесь n - квантовое число в формуле для энергии экситона E_n относительно дна зоны проводимости:

$$E_n = E_g - \frac{\mu e^4}{2\hbar^2 \epsilon^2 n^2}, \quad (2)$$

где \hbar - приведенная постоянная Планка, e - элементарный заряд, E_g - ширина запрещенной зоны, μ - приведенная масса электрона и дырки, равная

$$\mu = \frac{m_e^* m_h^*}{m_e^* + m_h^*}. \quad (3)$$

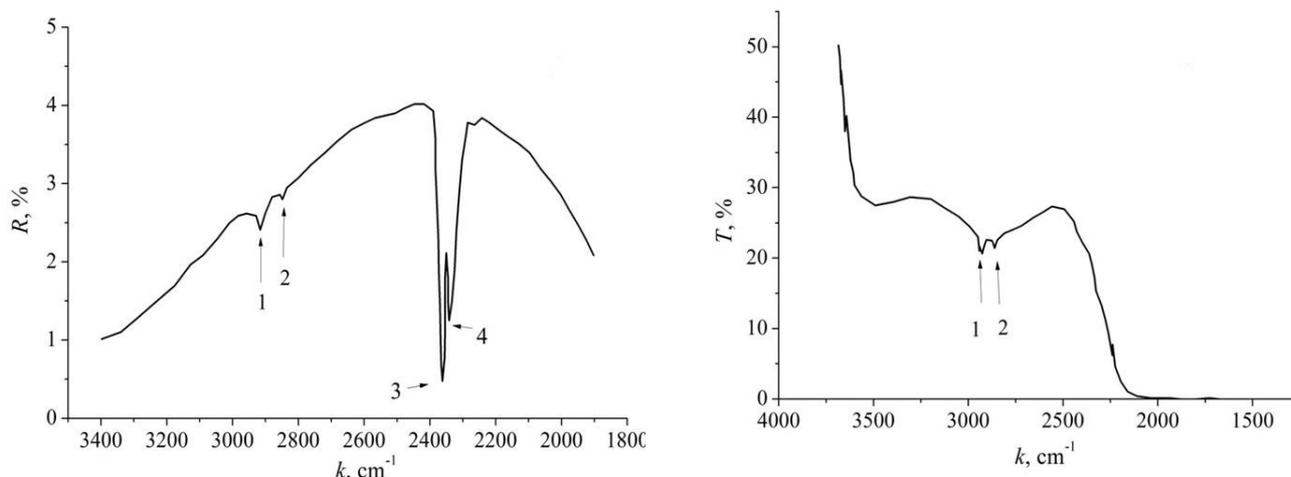


Рис.2. Спектр отражения (слева) и пропускания (справа) пленки CdS (0,9)-PbS (0,1)

Пленки с преимущественным содержанием PbS, напротив, имеют обратное соотношение между коротковолновой и длинноволновой экситонными сериями (рис.3). Но при этом наблюдается смена экстремума на спектре отражения с минимума на максимум.

ОСОБЕННОСТИ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦЫ PbS

Исследование рельефа пленки, образованной высохшим раствором квантовых точек PbS на подложке, на сканирующем микроскопе NanoEducator в атомно силовом режиме показало, что перепады по высоте не превышают 30 нм, несмотря на то, что размер

отдельных горизонтальных частиц даже превышает 1 мкм. Это может быть связано с тем, что органический субстрат, в котором находятся частицы, при высыхании частично испаряется, а частично высыхает и формирует своеобразную матрицу, в которой частицы находятся в подвешенном состоянии. Отчасти это подтверждает отсутствие интерференционных максимумов на спектре пропускания такой пленки, что, по-видимому, связано как раз со значительной толщиной (несколько мкм) и оптической неоднородностью слоя КТ. Поэтому, несмотря на тот факт, что данная полупрозрачная пленка находилась на прозрачной стеклянной подложке, ее толщину нельзя было корректно оценить интерференционным методом [3]. В области возможного наличия экситонных линий, соответствующих как объемному PbS (крупным кристаллитам), так и непосредственно наночастицам PbS (размер 1-3 нм) присутствует сильное поглощение, связанное с органическим растворителем (толуол) и отчасти с лигандами. Перевод КТ из первоначального растворителя в легко испаряемый спирт приводил к исчезновению минимумов поглощения в упомянутых областях [4].

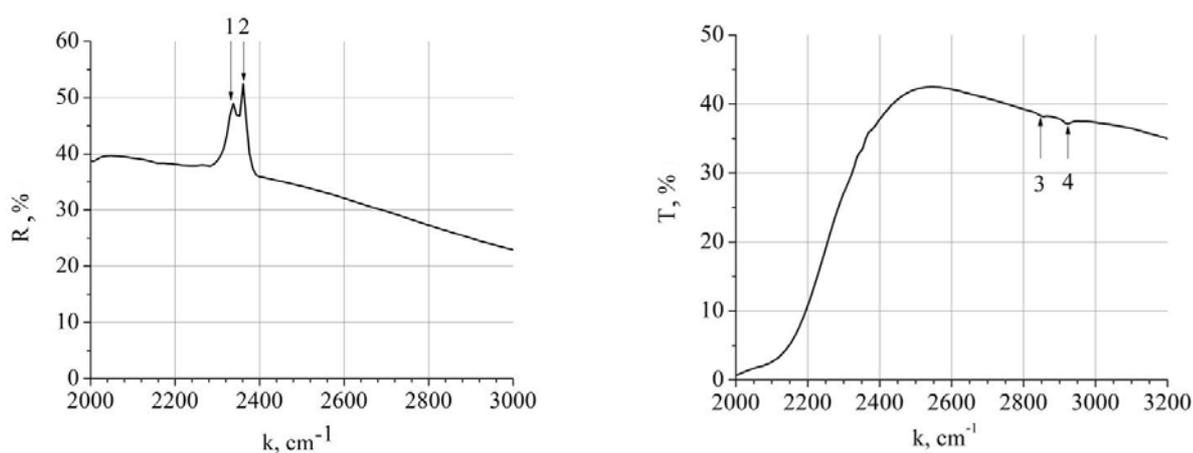


Рис.3. Спектр отражения и пропускания пленки PbS

Для дальнейшего исследования механизма возникновения экситонов в кристаллитах (квантовых точках) PbS должны быть проведены измерения оптических спектров в широком диапазоне температур. Это касается как области низких температур – для более устойчивого существования экситонов, так и высоких – для выяснения влияния спекания кристаллитов при одновременном испарении органической составляющей.

Авторы благодарны профессору В.Ф. Маркову и сотр. за предоставление пленочных образцов на основе PbS, приготовленных гидрохимическим осаждением.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-07-00595А.

Литература

1. Трофимова Н. Б., Роках А. Г., Бочкарев А.О. и др. // Письма в ЖТФ. - 2018. - Т. 44. - № 7. - С.78-87.
2. Давыдов А. С. Теория твердого тела: учебное пособие для студентов физических специальностей вузов. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1976. 639 с.
3. Husselleetal. Semiconductor light emitting apparatus including elongated hollow wavelength conversion tubes. United States Patent. No. US 8,362,681 B2. Jan. 29, 2013.
4. Шишкин М.И., ГавриковМ.В., ЯгудинИ.Т. и др. // Письма в ЖТФ. - 2019. - Т. 45. - No. 8. - С. 3-8.

ОПТИКА ВОЛНОВОДОВ**МИКРОРЕЗОНАТОРЫ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СВЕТОВОДОВ
КАК ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

И.С. Белоножкина, Д.С. Животков, Е.А. Романова

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Настоящая статья посвящена изучению возможности использования сферического микрорезонатора из халькогенидного стекла в качестве сенсорного элемента оптического датчика для эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические микрорезонаторы в последнее время стали особым предметом исследования [1]. Помимо того, что микрорезонаторы уже играют важную роль в промышленности как элементы лазеров с вертикальным резонатором, они стали важным компонентом в новых оптических технологиях.

Способность резонатора накапливать энергию характеризуется величиной, называемой добротностью Q . Добротность резонатора Фабри-Перо может достигать значений $Q \approx 10^7$ [1]. Несмотря на высокую добротность, резонаторы такого типа не лишены недостатков. Диэлектрические покрытия очень чувствительны к внешним воздействиям и быстро деградируют при обычных условиях. Кроме того, резонаторы Фабри-Перо малых размеров чрезвычайно чувствительны к акустическим колебаниям, что осложняет их использование в большинстве прецизионных экспериментов.

Помимо этих ограничений, добротность обычных квазиодномерных резонаторов прямо пропорционально связана с их линейными размерами, что препятствует значительному сокращению габаритов приборов

С этими недостатками успешно справляются резонаторы на модах шепчущей галереи (МШГ). Они вполне могут прийти на смену резонаторам Фабри-Перо в микрооптике.

В данной работе исследуется возможность использования халькогенидного сферического микрорезонатора в качестве сенсорного элемента оптического датчика для эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона. Средний ИК-диапазон расположен в области длин волн от 3 до 50 мкм. Поскольку спектры в среднем ИК-диапазоне связаны с вращательными и колебательными движениями в молекуле, спектроскопия среднего ИК диапазона является надежным средством химического анализа различных сред. Для создания полностью волоконно-оптических систем подходят халькогенидные стекла, прозрачные в среднем ИК-диапазоне.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СВЕТОВОДОВ

В технологии создания микросферы на торце халькогенидного оптоволокна учитываются особенности халькогенидного стекла: низкая по сравнению с кварцевым стеклом температура плавления ($\sim 200^{\circ}\text{C}$), окисление при нагревании и плавлении. В связи с этим халькогенидные микросферы не могут изготавливаться методом нагревателя волокна в открытом пламени, как кварцевые. В настоящее время для изготовления халькогенидных микросфер применяется нагрев лазерным источником, как описано в [2], а также контактный нагрев тепловым источником [3].

В разработанной в [4] методике осуществляется бесконтактный нагрев торца волокна потоком нагретого инертного газа. Конец халькогенидного волокна помещается в нагретый поток инертного газа (аргон) для того, чтобы предотвратить окисление стекла при нагреве. Для подвода инертного газа используется латунная трубка, которая нагревается с помощью кислородной горелки, как показано на рисунке 1. Движение торца волокна контролируется по вертикальной и горизонтальной оси вручную при помощи подвижки. Торцы волокна перемещаются вниз до момента начала плавления стекла и образования капли, а затем быстро перемещаются вверх. Формирование микросферы на торце происходит при остывании расплава под действием сил поверхностного натяжения.



Рис. 1. Методика получения микросферы на торце халькогенидного волокна: схема (слева) и реализация (справа).

На рисунке 2 показаны некоторые из полученных микросфер. Для уменьшения диаметра микросфер в отдельных случаях производилось предварительное вытягивание в конус торца волокна путем его контактного нагрева.

РАСЧЕТ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ И ДОБРОТНОСТИ МИКРОСФЕР

В оптическом микрорезонаторе можно выделить следующие виды дисперсии: материальная (скорость распространения световой волны в материале зависит от частоты);

геометрическая (скорость световой волны зависит от формы и размеров резонатора);
модовая (резонансные частоты мод резонатора зависят от скорости световой волны).

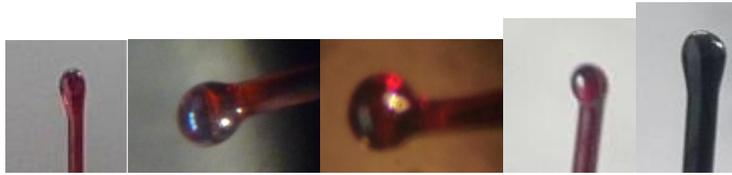


Рис. 2. Микросферы, полученные на торцах халькогенидных световодов.

С целью учета материальной дисперсии, как правило, применяются формулы Зельмейера для показателя преломления материала резонатора n в виде степенного ряда:

$$n^2 = 1 + \sum_i \frac{A_i \cdot \lambda}{\lambda^2 - B_i^2}, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения, A_i и B_i – коэффициенты Зельмейера, известные для материала, из которого изготовлен световод.

Материальная дисперсия влияет на резонансные частоты ν_l резонатора, которые в квазигеометрическом приближении [1] для микросферы определяются по формуле:

$$\nu_l = \frac{l \cdot c}{2\pi a \cdot n(\nu)}, \quad (2)$$

где a – радиус микросферы, l – целое число длин волн которые укладываются на периметре микросферы, c – скорость света.

Добротность микрорезонатора зависит, преимущественно, от потерь энергии вследствие поглощения и рассеяния излучения. Поскольку потери энергии складываются, полная добротность будет иметь следующий вид:

$$\frac{1}{Q_\Sigma} = \frac{1}{Q_{изл}} + \frac{1}{Q_{ЕН}} + \frac{1}{Q_{ПОЕ}} + \frac{1}{Q_{ОКР}} + \frac{1}{Q_{СЕ}}, \quad (3)$$

где $Q_\Sigma = \omega \frac{\text{энергия, запасенная в резонаторе}}{\text{мощность потерь}}$,

$Q_{изл}$ – связана с излучательными потерями вследствие внутреннего отражения излучения от поверхности с кривизной;

Q_{EH} – описывает затухание поля внутри резонатора вследствие рассеяния, поглощения;

$Q_{ПОВ}$ – связана с потерями на неидеальной поверхности резонатора;

$Q_{ОКР}$ – описывает потери, вызванные наличием спадающего поля во внешней среде;

$Q_{СЕ}$ – описывает уход энергии в элемент связи.

В рамках электродинамического подхода моды шепчущей галереимикросферы можно разделить на два типа [5]. Если продольная компонента магнитного поля моды равна нулю ($H_z = 0$), такая мода называется поперечно- магнитной (ТМ). Если продольная компонента электрического поля моды равна нулю ($E_z = 0$), такая мода называется поперечно-электрической (ТЕ).

Для нахождения собственных частот микросферы рассмотрим модель микросферы, окруженной воздухом ($n_0 = 1$). В этом случае надо найти корни следующих характеристических уравнений:

Для ТМ мод:

$$\psi'_l(kna)/\psi_l(kna) = n\zeta'_l(ka)/\zeta_l(ka) \quad (4)$$

Для ТЕ мод:

$$n\psi'_l(kna)/\psi_l(kna) = \zeta'_l(ka)/\zeta_l(ka) \quad (5)$$

где ψ_l, ζ_l – сферические функции Риккати – Бесселя, $k = \frac{2\pi\nu}{c}$.

Решая уравнения (4) и (5), можно получить собственные частоты, которые определяются азимутальным и радиальным порядками, где азимутальный порядок – это порядок l функции Бесселя, а радиальный порядок – это номер корня функции Бесселя.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОСФЕРЫ, ПОГРУЖЕННОЙ В ВОДНЫЙ РАСТВОР АЦЕТОНА

Рассмотрим свойства оптического микрорезонатора, помещенного в поглощающую жидкость. В качестве исследуемой жидкой среды возьмем водный раствор ацетона. Спектры поглощения воды и ацетона показаны на рисунке 3.

Резонансные частоты микросферы из халькогенидного стекла состава As_2Se_3 , находящейся в воздухе, полученные для ТЕ мод, показаны на рисунке 4 в области полос поглощения ацетона и воды. Видно, что межчастотный интервал растет при уменьшении радиуса сферы. Так, если $a = 40$ мкм, в полосу поглощения ацетона с максимумом на длине волны 8.16 мкм попадают две частоты, если $a = 25$ мкм – одна частота, а при $a = 15$ мкм таких частот нет.

На рисунке 5 показана добротность этих резонансов, которая уменьшается с ростом длины волны.

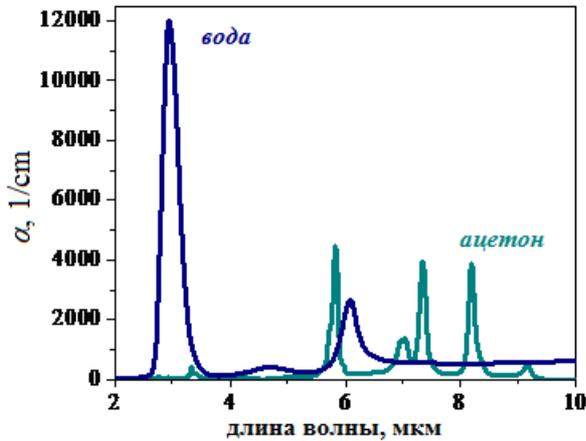


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента поглощения (см^{-1}) воды и ацетона.

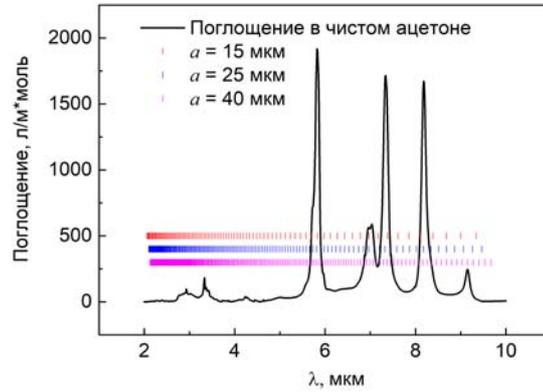


Рис. 4. Резонансные частоты ТЕ мод сферического резонатора (штрихи), находящегося в воздухе, в области полос поглощения ацетона (сплошные линии).

ПРОПУСКАНИЕ СЕНСОРНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ МИКРОСФЕРЫ

Элемент связи (например, оптическое волокно) используется для ввода излучения в микрорезонатор и вывода излучения из него (рис. 6). Коэффициент пропускания системы «элемент связи – микрорезонатор» можно определить по формуле:

$$T = \frac{(Q_0^{-1} - Q_C^{-1})^2 + \left(2 \cdot \frac{dw}{w_0}\right)^2}{(Q_0^{-1} + Q_C^{-1})^2 + \left(2 \cdot \frac{dw}{w_0}\right)^2}, \quad (8)$$

где Q_0 - добротность микрорезонатора на частоте w_0 ; Q_C - добротность элемента связи; dw - расстройка относительно частоты w_0 .

Рассчитаем пропускание этой системы на длине волны 8.16 мкм при разных концентрациях ацетона. На рисунке 7 показана зависимость пропускания от расстройки, выраженной в длинах волн. Видно, что с ростом поглощения ацетона ширина резонанса растет, как и пропускание системы при $\Delta\lambda = 0$.

Калибровочный график рассчитывался на разных длинах волн в полосе поглощения ацетона (рис. 8).

Рассчитаем пропускание этой системы на длине волны 8.16 мкм при разных концентрациях ацетона. На рисунке 7 показана зависимость пропускания от расстройки,

выраженной в длинах волн. Видно, что с ростом поглощения ацетона ширина резонанса растет, как и пропускание системы при $\Delta\lambda = 0$.

Калибровочный график рассчитывался на разных длинах волн в полосе поглощения ацетона (рис. 8).

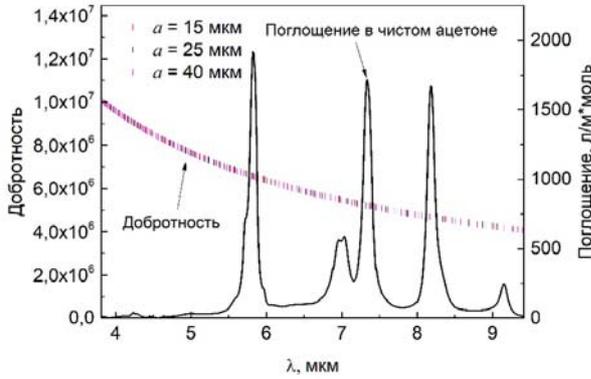


Рис. 5. Спектральная зависимость добротности ТЕ мод сферического резонатора, находящегося в воздухе, в области полос поглощения ацетона (сплошные линии).

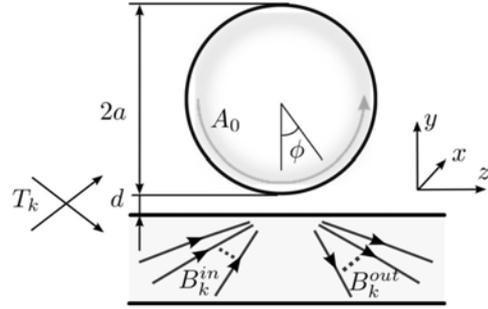


Рис. 6. Схема возбуждения МШГ [1] в сферическом микрорезонаторе.

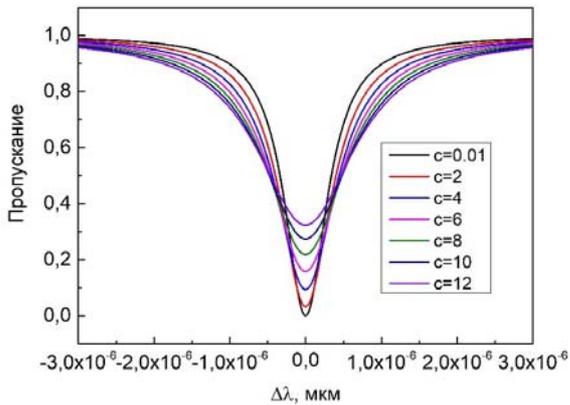


Рис. 7. Коэффициент пропускания системы “элемент связи – микросфера”, рассчитанный для разной молярной концентрации (моль/л) ацетона в воде.

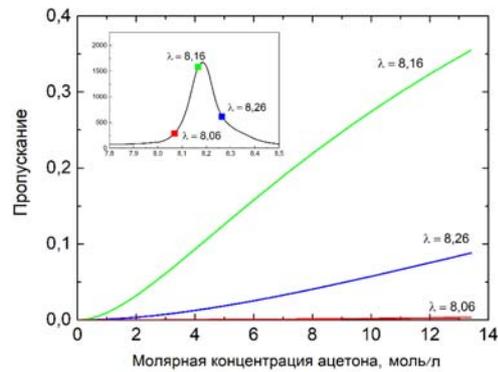


Рис.8. Пропускание системы “элемент связи – микросфера” для разных длин волн (мкм) в зависимости от молярной концентрации ацетона в воде. На вставке показана полоса поглощения ацетона.

В расчетах предполагается, что Q_c меняются очень слабо с изменением концентрации ацетона в воде, и берется как постоянное значение равное добротности элемента связи и резонатора для случая чистой воды. Так, для $\lambda = 8.16$ мкм, 8.26 мкм, 8.06 мкм добротности связи были определены как $2.32 \cdot 10^6$, $2.7 \cdot 10^6$ и $2.23 \cdot 10^6$, соответственно. В свою очередь, добротность резонатора намного сильнее подвергается изменению из-за поглощения в ацетоне, благодаря эванесцентным свойствам МШГ, что и приводит к существенному росту пропускания с увеличением концентрации ацетона. Чувствительность сенсорного элемента, определяемая как dT/dc , существенно больше в случае измерений на максимальной длине

волны, чем на краях полосы поглощения ацетона. При разработке датчика необходимо учитывать возможное смещение полос поглощения при изменении состава раствора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрировано, что сферический микрорезонатор из халькогенидного стекла можно использовать как сенсорный элемент спектроскопического датчика для анализа химического состава различных веществ на примере водного раствора ацетона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 16-13-10251р).

Литература

1. Городецкий М.Л. Основы теории оптических микрорезонаторов, Москва, 2010, 320с.
2. Vanier F., et al. // Proc. of Int. Conf. on Optical MEM Sand Nanophotonics, Banff, AB, 45-46, 2012
3. Wang P., et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2012. – Vol. 24. - No. 13. – P. 1103-1105.
4. Romanova E.A., et al // Proc. of 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS), St Petersburg, Russia, 2017, pp. 291-295.
5. Oraevsky A. N. // Quantum Electronics. 2002. - Vol. 32. - No. 5. - P. 377–400.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНО ИНДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ МОЩНЫХ ПРОБНЫХ ИМПУЛЬСОВ

О.М. Паршков, А.А. Маковейчук

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

Представлены выводы теоретического анализа зависимости характеристик явления электромагнитно индуцированной прозрачности от мощности импульса входного пробного излучения. Исследование проведено для \square -схемы неоднородно уширенных квантовых переходов между вырожденными уровнями 3P_0 , $^3P_1^0$ и 3P_2 изотопа ^{208}Pb . Рассматриваются случаи резонансного и квазирезонансного воздействия полей на среду. Показано, что в указанных случаях существует тенденция распада входного пробного излучения на импульсы с различными поляризационными характеристиками. Если входное пробное излучение достаточно слабо, то эти импульсы имеют постоянные поляризационные характеристики и являются импульсами нормальных мод. Большая ось эллипса поляризации одной из нормальных мод параллельна, а другой – перпендикулярна большой оси эллипса поляризации управляющего поля. При большей мощности входного пробного излучения импульсы, на которые оно распадается в среде, не являются импульсами нормальных мод, но их поляризационные характеристики колеблются около значений, присущих нормальным модам. Показано, что с ростом интенсивности входного пробного излучения прозрачность среды для пробного поля уменьшается.

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитно индуцированная прозрачность (ЭМИП) является эффектом, имеющим широкие возможности практического применения. В частности, использование явления ЭМИП перспективно для создания систем оптической квантовой памяти [2], систем квантовых коммуникаций [2, 4, 5] и квантовой информации [1-3], устройств точных магнитных измерений [6] и хронометрии [7]. Этот же эффект лежит в основе методов создания больших оптических нелинейностей [3, 8] и усиления излучения без инверсии населённостей [9].

Вырождение уровней квантовых переходов приводит к эффектам, связанными с поляризационными характеристиками взаимодействующих полей. В [10, 11] теоретически и экспериментально исследовалось сопровождающее ЭМИП вращение плоскости поляризации пробного поля при изменении напряжённости управляющего излучения, а в [12, 13] теоретически и экспериментально изучалось влияние постоянного магнитного поля на процесс эволюции круговых компонент пробного излучения. Линейное и круговое двойное лучепреломление пробного поля при ЭМИП исследовалось теоретически и экспериментально в [14]. В теоретической работе [15] предсказана возможность распространения пробного поля в виде двух мод с различными состояниями поляризации.

Теория работ, перечисленных в предыдущем абзаце, опиралась на адиабатическое приближение [16], адекватное для описания достаточно длительных импульсов. Большинство теоретических исследований ЭМИП использует, кроме того, приближение заданного управляющего поля, справедливое только при малых интенсивностях пробного излучения.

В настоящем сообщении мы представляем результаты теоретических исследований процесса ЭМИП коротких импульсов пробного излучения (с длительность порядка наносекунды) без использования условий адиабатического приближения и приближения заданного управляющего поля. Рассматривается Λ -схема квантовых переходов между энергетическими уровнями 3P_0 , 3P_2 , $^3P_1^0$ изотопа ^{208}Pb , в парах которого наблюдалось ЭМИП поляризованных по кругу лазерных полей [17]. Предполагается, что на входе в среду пробное и управляющие поля эллиптически поляризованы. Исследования опирались на результаты работы [18,19] в которых было показано, что в приближении заданного управляющего поля пробное излучение в среде представляет собой совокупность двух нормальных мод. Главная ось эллипса поляризации (ЭП) одной из мод параллельна, а другой перпендикулярна главной оптической оси ЭП управляющего поля. Мода первого типа именовалась параллельной, а мода второго типа – перпендикулярной нормальной модой.

Ниже представлены результаты численного исследования двух ситуаций. В первой из них полагается, что напряжённость электрического поля входного пробного импульса настолько мала, что управляющее поле в среде можно считать заданным. Далее этот случай именуется случаем слабого пробного поля. Другая ситуация, когда максимальная напряжённость электрического поля входного пробного импульса составляет примерно половину напряженности электрического поля входного управляющего излучения, именуется случаем мощного пробного поля.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассматриваемая Λ -схема состоит из простого нижнего уровня 1, трёхкратно вырожденного верхнего уровня 2 и пятикратно вырожденного среднего уровня 3 (соответственно уровни 3P_0 , $^3P_1^0$ и 3P_2) изотопа ^{208}Pb . Пусть ϕ_k – ортонормированный базис из собственных функций операторов энергии, квадрата и проекции момента импульса на ось z для изолированного атома, соответствующих уровню 1 ($k=1$), уровню 2 ($k=2,3,4$, $M=-1,0,1$) и уровню 3 ($k=5,6, \dots, 9$, $M=-2,-1,0,1,2$). Пусть D_1 и D_2 – приведённые электродипольные моменты переходов $1 \rightarrow 2$ и $3 \rightarrow 2$ соответственно, ω_{210} и ω_{230} ($\omega_{210} > \omega_{230}$) – центральные частоты этих переходов, $T_1 = 1/\Delta_1$, где Δ_1 – полуширина (по уровню e^{-1} высоты) плотности распределения частот ω_{21} квантовых переходов между уровнями 1 и 2 ввиду эффекта Доплера.

Зададим суммарное электрическое поле двух лазерных импульсов в виде

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2, \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_l = \mu_l [\mathbf{i} \tilde{E}_{xl} \cos(\omega_l t - k_l z + \tilde{\delta}_{xl}) + \mathbf{j} \tilde{E}_{yl} \cos(\omega_l t - k_l z + \tilde{\delta}_{yl})], \quad l = 1, 2,$$

где \mathbf{E}_l и ω_l – напряжённость электрического поля и несущая частота пробного ($l=1$) и управляющего ($l=2$) полей, $\mu_l = \hbar \sqrt{2l+1} / (|D_l| T_1)$, \mathbf{i}, \mathbf{j} – орт-векторы осей x и y , $\tilde{E}_{xl}, \tilde{E}_{yl}$ – амплитуды, а $\tilde{\delta}_{xl}, \tilde{\delta}_{yl}$ – фазовые добавки x и y компонент пробного ($l=1$) и управляющего ($l=2$) полей, $k_l = \omega_l / c$. Предполагается квазирезонансность воздействия излучений на среду: $|\omega_{210} - \omega_1| \ll \omega_{210}$ и $|\omega_{230} - \omega_2| \ll \omega_{230}$. Положим также, что величины f_l и g_l являются амплитудами левой и правой круговых компонент пробного ($l=1$) и управляющего ($l=2$) полей.

Представим волновую функцию Ψ атома в поле разложением по базису ϕ_k

$$\Psi = \bar{c}_1 \phi_1 + \left(\sum_{k=2}^4 \bar{c}_k \phi_k \right) \exp(-i\xi_1) + \left(\sum_{k=5}^9 \bar{c}_k \phi_k \right) \exp[-i(\xi_1 - \xi_2)],$$

и положим далее $c_1 = p_1^* \bar{c}_1$, $c_2 = \bar{c}_2$, $c_4 = \bar{c}_4$, $c_5 = p_2 \bar{c}_5$, $c_7 = (1/\sqrt{6}) p_2 \bar{c}_7$, $c_9 = p_2 \bar{c}_9$, где $p_l = 2 |D_l| / |D_1|$, $l=1,2$.

Введем нормированные независимые переменные s и w :

$$s = z/z_0, \quad w = (t - z/c)/T_1.$$

Используя уравнения Максвелла и уравнение Шредингера, получим тогда в первом приближении медленных огибающих следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial f_1}{\partial s} = \frac{i}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} c_1 c_2^* \exp[-(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10})^2] d\varepsilon_1, \quad \frac{\partial f_2}{\partial s} = -\frac{i}{\sqrt{\pi}} \xi \int_{-\infty}^{+\infty} (c_4^* c_9 + c_2^* c_7) \exp[-(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10})^2] d\varepsilon_1,$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial g_1}{\partial s} &= -\frac{i}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} c_1 c_4^* \exp[-(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10})^2] d\varepsilon_1, & \frac{\partial g_2}{\partial s} &= \frac{i}{\sqrt{\pi}} \xi \int_{-\infty}^{+\infty} (c_2^* c_5 + c_4^* c_7) \exp[-(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10})^2] d\varepsilon_1, \\
 \frac{\partial c_1}{\partial w} &= -i(f_1 c_2 - g_1 c_4), & \frac{\partial c_2}{\partial w} + i\varepsilon_1 c_2 &= -\frac{i}{4}(f_1^* c_1 + g_2^* c_5 - f_2^* c_7) - \gamma c_2, \\
 \frac{\partial c_4}{\partial w} + i\varepsilon_1 c_4 &= \frac{i}{4}(g_1^* c_1 - g_2^* c_7 + f_2^* c_9) - \gamma c_4, & \frac{\partial c_5}{\partial w} + i(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) c_5 &= -ig_2 c_2, \\
 \frac{\partial c_7}{\partial w} + i(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) c_7 &= \frac{i}{6}(f_2 c_2 - g_2 c_4), & \frac{\partial c_9}{\partial w} + i(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) c_9 &= if_2 c_4.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь

$$\varepsilon_1 = (\omega_{21} - \omega_1)/\Delta_1, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{20} + \beta(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}), \quad \xi = 0.6\beta |D_2/D_1|^2, \quad \beta = \omega_{230}/\omega_{210}, \tag{3}$$

где $\gamma = T_1/(2/\tau)$, τ – радиационное время жизни уровня ${}^3P_1^0$. Величины ε_{10} и ε_{20} описывают отклонения несущих частот излучений от условий резонанса:

$$\varepsilon_{10} = (\omega_{210} - \omega_1)/\Delta_1, \quad \varepsilon_{20} = (\omega_{230} - \omega_2)/\Delta_1 \tag{4}$$

и называются далее отстройками резонанса.

Ниже используются величины a_l , α_l , γ_l – параметры ЭП пробного ($l=1$) и управляющего ($l=2$) излучений. Здесь a_l – большая полуось ЭП, измеренная в единицах μ_l , α_l – угол её наклона к оси x , γ_l – параметр сжатия ($0 \leq \alpha_l \leq \pi$, $-1 \leq \gamma_l \leq 1$). Величина $|\gamma_l|$ определяет отношение малой оси ЭП к его большой оси. Кроме того вводились величины δ_{ul} ($u=x,y$), связанные с величинами $\tilde{\delta}_{ul}$ соотношениями $\tilde{\delta}_{ul} = \delta_{ul} + \varphi_{ul}$, где $\varphi_{ul} = 0$, если $\tilde{E}_{ul} \geq 0$ и $\varphi_{ul} = -\pi$, если $\tilde{E}_{ul} < 0$.

Система уравнений (2) дополнялась граничными условиями

$$a_l = a_{l0}, \quad \alpha_l = \alpha_{l0}, \quad \gamma_l = \gamma_{l0}, \quad \delta_{xl} = \delta_{xl0}; \quad s = 0, \quad w \geq 0, \tag{5}$$

где a_{l0} , α_{l0} , γ_{l0} , δ_{xl0} – функции от w , описывающие эволюцию величин a_l , α_l , γ_l , δ_{xl} на входной поверхности $s=0$ резонансной среды. При обсуждении результатов расчётов используется интенсивность I_l пробного ($l=1$) и управляющего ($l=2$) излучения, измеряемая в единицах $c\mu_l^2/(8\pi)$.

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При численном решении задачи (2) – (5) полагалось $\beta = 0.7$, $\xi = 2.11$, $\gamma = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Случай резонанса означает, что $\varepsilon_{10} = \varepsilon_{20} = 0$, а для случая квазирезонанса полагалось $\varepsilon_{10} = -0.3$, а $\varepsilon_{20} = 0.6$. Граничные условия (5) для импульса пробного излучения ($l=1$) конкретизировались в виде

$$a_{10} = a_m \operatorname{sech} \frac{w-50}{5}, \quad \alpha_{10} = \frac{\pi}{6}, \quad \gamma_{10} = -0.5, \quad \delta_{x10} = 0, \tag{6}$$

а для управляющего поля ($l=2$) в виде

$$a_{20} = 6.65, \alpha_{20} = 0, \gamma_{20} = -0.3, \delta_{x20} = 0. \quad (7)$$

Равенства (6) задают входной импульс пробного излучения с колоколообразной зависимостью интенсивности I_1 от времени w . Длительность этого импульса по уровню полувысоты огибающей I_1 составляет 8.8 единиц времени w . Величина a_m в (6) последовательно полагалась равной 0.2 и 2.0. Реализации каждой из этих возможностей соответствуют случаями слабого и мощного пробного поля соответственно. Максимальная интенсивность I_{1m} этого поля равна соответственно 0.05 и 5 для слабого и мощного входного пробного полей. Отметим, что в случае мощного пробного поля максимальная величина модуля напряжённости электрического поля составляет примерно 0.6 от абсолютной величины напряжённости электрического поля управляющего излучения. Равенства (7) описывают входное управляющее излучение с постоянной интенсивностью $I_2=16$.

а) Слабое пробное поле. Если напряжённость электрического поля пробного излучения значительно меньше напряжённости электрического поля управляющего излучения, то допустимо приближение заданного управляющего поля. В [18,19] показано, что тогда пробное поле в среде, описываемое решением краевой задачи (2)–(5) и именуемое далее полным пробным полем, является суммой параллельной и перпендикулярной нормальных мод. Граничные условия для каждой моды имеют вид (5) при $l=1$, причём величины $a_{10}, \alpha_{10}, \gamma_{10}, \delta_{x10}$ определяются их значениями для полного пробного поля на входной поверхности ($s=0$) и параметром сжатия ЭП управляющего излучения γ_{20} . Процедура нахождения граничных условий для каждой нормальной моды изложена в [18].

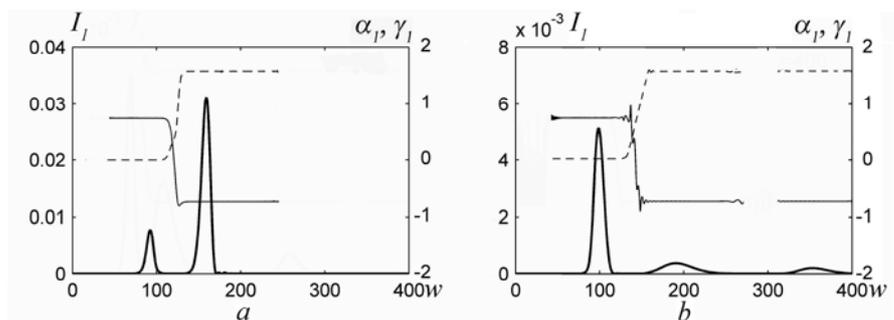


Рис.1. Эволюция величин I_1 (толстая линия), α_1 (пунктирная линия), γ_1 (тонкая линия) при $s=400$ в случае резонанса (а) и квазирезонанса (b)

На рис. 1 представлены графики зависимости от w величин I_1, α_1, γ_1 на расстоянии $s=400$. Рис. 1, а относится к случаю резонанса, тогда как рис. 1, б – к случаю квазирезонанса. В обоих случаях в среде происходит распад пробного импульса на несколько импульсов, каждый из которых обладает постоянными поляризационными характеристиками α_1, γ_1 .

Отметим, что в области нахождения первого импульса $\alpha_1=0$, $\gamma_1=0.742$, тогда как области нахождения других импульсов $\alpha_1=\pi/2$, $\gamma_1=-0.742$. Оценки, проведённые по методике работы [18], показывают, что именно такие значения поляризационных параметров должны иметь излучения параллельной и перпендикулярной нормальных мод соответственно. Следовательно, в первом импульсе на рис. 1, *b*, *d* сосредоточена энергия параллельной нормальной моды, а в остальных – перпендикулярной моды.

б) Мощное пробное поле.

На рис. 2 представлены графики зависимости от w величин I_1 , α_1 , γ_1 для двух значений величины s . Рис. 2, *a*, *b* описывают процесс ЭМИП в случае резонанса. Эти рисунки свидетельствуют о том, что пробный импульс в среде распадается на два отдельных импульса. На большом расстоянии (рис. 2, *b*) с погрешностью менее 2% поляризационные характеристики α_1 , γ_1 одного из них (импульс 1) такие же, какие должны быть у параллельной нормальной моды, а в области другого (импульс 2) эти характеристики близки к соответствующим характеристикам перпендикулярной нормальной моды.

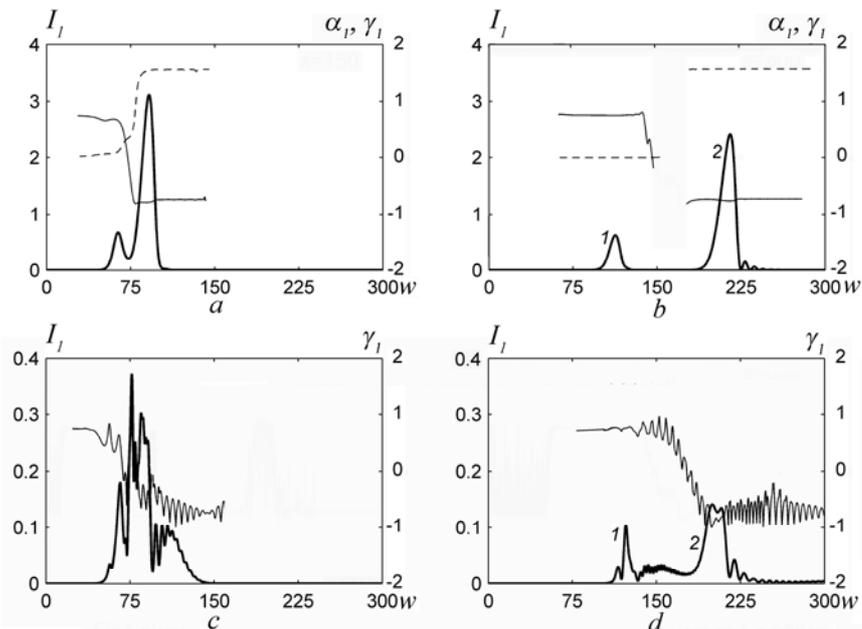


Рис.2. Эволюция величин I_1 (толстая линия), α_1 (пунктирная линия), γ_1 (тонкая линия) в случае резонанса при $s=150$ (*a*) и $s=600$ (*b*) и величин I_1 (толстая линия), γ_1 (тонкая линия) при квазирезонансе для $s=150$ (*c*) и $s=600$ (*d*).

Рис. 2, *c*, *d* описывает процесс эволюцию величин I_1 , γ_1 при квазирезонансе. Рис. 2, *d* показывает, что даже на расстоянии $s=600$ чёткого разделения входного пробного поля на ряд изолированных импульсов не происходит. При этом в области пика 1 величина γ_1 осциллирует около значения, характерного для параллельной нормальной моды, а в области пика 2 – вблизи значения характерного для перпендикулярной нормальной моды. Величина α_1 осциллирует, как показывает расчёт, около значения 0 в области пика 1 и $\pi/2$ в области пика 2.

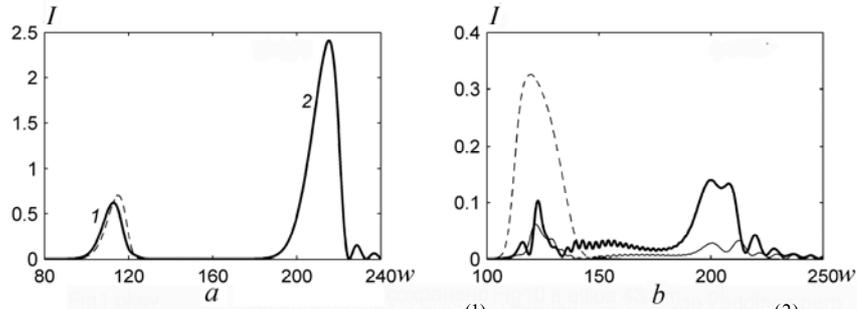


Рис.3. Эволюция величины I_1 (толстая линия), $I_1^{(1)}$ (пунктирная линия) и $I_1^{(2)}$ (тонкая линия) на расстоянии $s=600$ в случае резонанса и (a) и квазирезонанса (b).

Исходя из (6), (7) и используя методику, изложенную в [18], входной пробный импульс можно представить в виде суммы двух импульсов с поляризационными характеристиками, присущим нормальным модам. Излучения, порожденные в среде входными полями с характеристиками параллельной и перпендикулярной нормальных мод, будем называть параллельным и перпендикулярным излучениями соответственно. Далее символ $I_1^{(1)}$ означает интенсивность параллельного излучения, а символ $I_1^{(2)}$ – интенсивность перпендикулярного излучения. На рис. 3 для расстояния $s=600$ представлены кривые интенсивностей $I_1^{(1)}$ и $I_1^{(2)}$ в случаях резонанса (рис.3, a) и квазирезонанса (рис.3, b), совместно с кривой I_1 , описывающей эволюцию полного пробного поля.

В случае резонанса (рис.3, a) кривая $I_1^{(1)}$ в районе в районе импульса I незначительно отличается от I_1 . При этом в области нахождения импульса 2 тонкая кривая, описывающая величину $I_1^{(2)}$, совпадает с кривой I_1 . Поэтому представление о распространении пробного поля в виде суммы двух невзаимодействующих нормальных мод приближённо справедливо и в случае резонансного ЭМИП мощного пробного излучения. При квазирезонансе ситуация иная. Согласно рис. 3, b сумма ординат пунктирной и тонкой линий при каждом фиксированном значении переменной w почти всюду существенно отличается от значения ординаты толстой линии при том же значении w . Таким образом, в условиях квазирезонанса и мощного пробного излучения представление о нормальных модах теряет смысл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что с увеличением мощности входного пробного импульса модовый режим распространения пробного излучения в среде разрушается. Однако при резонансе отклонение от него сравнительно невелико. В случае квазирезонанса при таких же условиях модовый режим не имеет места. Входной пробный импульс распадается в среде на фрагменты, поляризационные параметры которых колеблются около значений, свойственных нормальным модам.

Литература

1. Harris S.E. // *Phys. Today*. - 1997. - Vol. 50. - №7. - P. 36.
2. Lukin M. D. // *Rev. Mod. Phys.* - 2003. - Vol. 75. - № 2. - P. 457.
3. Fleischhauer M., Imamoglu A., Marangos J.P. // *Rev. Mod. Phys.* - 2005. - Vol. 77. - № 2. - P. 633.
4. Duan L.-M., Lukin M.D., Cirac J.I., Zoller P. // *Nature (London)*. - 2001. - Vol. 414. - P. 413.
5. Sinatra A. // *Phys. Rev. Lett.* - 2006. - Vol. 97. - № 25. - P. 253601.
6. Martinelli M., Valente P., Failache H., et al. // *Phys. Rev. A*. - 2004. - Vol. 69. - № 4. - P. 043809.
7. Godone A., Micallizio S., Levi F. // *Phys. Rev. A*. - 2002. - Vol. 66. - № 6. - P. 063807.
8. Lukin M.D., Imamoglu A. // *Nature (London)*. - 2001. - Vol. 413. - P. 273.
9. Kocharovskaya O., Mandel P. // *Phys. Rev. A*. - 1990. - Vol. 42. - № 1. - P. 523.
10. Wielandy S., Gaeta A.L. // *Phys. Rev. Lett.* - 1998. - Vol. 81. - № 16. - P. 3359.
11. Bo Wang, Shujing Li, Jie Ma, Hai Wang, et al. // *Phys. Rev. A*. - 2006. - Vol. 73. - № 5. - P. 051801(R).
12. Agarwal G.S., Shubhrangshu Dosgupta. // *Phys. Rev. A*. - 2003. - Vol. 67. - № 2. - P. 023814.
13. Sautenkov V.A., Rostovtsev Y.V., Chen H., et al. // *Phys. Rev. Lett.* - 2005. - Vol. 94. - №23. - P. 233601.
14. Tai Hyun Yoon, Chang Yong Park, Sung Jong Park. // *Phys. Rev. A*. - 2004. - Vol. 70. - № 6. - P. 061803(R).
15. Kis Z., Demeter G., Janszky J. J. // *Opt. Soc. Am. B*. - 2013. - Vol. 30. - №4. - P. 829.
16. Grobe R., Hioe F.T., Eberly J.H. // *Phys. Rev. Lett.* - 1994. - Vol.73. - № 24. - P. 3183.
17. Kasapi A., Maneesh Jain, Yin G.Y., Harris S.E. // *Phys. Rev. Lett.* - 1995. - Vol.74. - № 13. P. 2447.
18. Паршков О.М. // *Квант. электрон.* - 2018. - Т. 48. - № 11. - С. 1027.
19. Паршков О.М. // *Опт. и спектр.* - 2019. - Т. 126. - №24. - С. 483.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**ЭФФЕКТ ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА В СХЕМЕ ГЕТЕРОМАГНИТНОГО
АВТОГЕНЕРАТОРА**

М.Г. Инкин, А.А. Игнатьев

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Рассматривается схема гетеромагнитного автогенератора с ЖИГ-резонатором. Проведено компьютерное моделирование. Приведена зависимость выходных параметров от барьерной емкости P-N переходов.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование электрической схемы является одним из первых этапов проектирования, в частности гетеромагнитного автогенератора. Целью моделирования является подбор оптимальных значений номиналов электронных компонент для достижения необходимых параметров выходного сигнала. Основными параметрами сигнала являются центральная частота, мощность сигнала и шума. В компьютерном моделировании нелинейных элементов используются SPICE-модели, основанные эквивалентной схеме этого компонента [1]. В рассмотренной схеме гетеромагнитного автогенератора содержится два нелинейных элемента: транзистор и резонатор (в физическом устройстве: ЖИГ-пленка). Эквивалентная схема транзистора основана на модели Гумеля-Пуна [2-4]. Эквивалентная схема нелинейного резонатора представлена в работе [3].

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Модель Гумеля-Пуна позволяет исследовать физические процессы в рассматриваемом гетеромагнитном автогенераторе [1,2]. Было проведено компьютерное моделирование схемы автогенератора и выполнена оценка влияния параметров SPICE-модели на выходные характеристики сигналов. В результате этого были отобран ряд элементов, параметры которых наиболее благоприятно влияют на мощность выходного сигнала, спектральную плотность мощности шума и несущую частоту сигнала. Одним из таких элементов являются барьерные емкости P-N переходов. Увеличение барьерной емкости перехода база-коллектор и база-эмиттер значительно снижают спектральную плотность мощности фазового шума и увеличивают мощности выходного сигнала на несущей частоте.

В модели Гумеля-Пуна барьерная емкость P-N перехода описывается конденсатором, соединяющим базу и коллектор (или базу и эмиттер) транзистора. Такой конденсатор можно представить в виде двух параллельных конденсаторов, один из которых вынести за границу эквивалентной схемы транзистора (рис.1). В первом приближении эти конденсаторы являются линейными, однако в общем случае – не линейны [1,5]. Внедрение конденсаторов в

схему приводит к скачкообразному уменьшению мощности шума относительно схемы без конденсаторов вне зависимости от номинала конденсаторов. Это обстоятельство проиллюстрировано на рисунке 2. Такое снижение мощности шума схоже с эффектом динамического подавления шума [6], суть которого заключается в уменьшении спектральной плотности мощности шума при увеличении мощности сигнала.

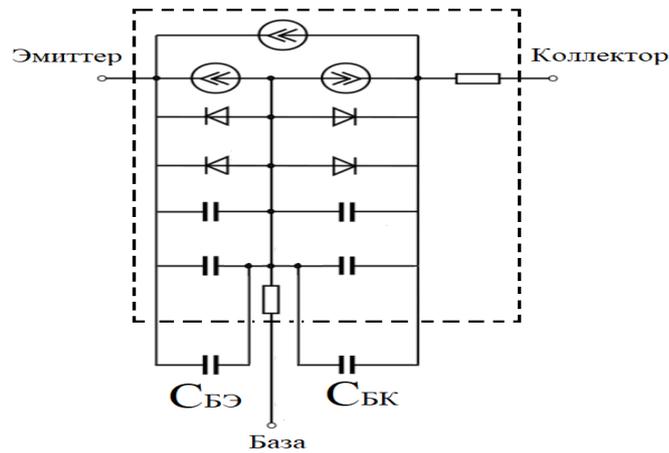


Рис. 1. Эквивалентная схема транзистора

На рисунке 2 кривая 1 показывает зависимость спектральной плотности мощности фазового шума от частоты отстройки для схемы без конденсаторов (мощность регулярного сигнала 1,2 дБм), а кривая 2 представлена для схемы с конденсаторами (мощность регулярного сигнала 4,4 дБм). При этом $C_{БЭ} = 5$ пФ и $C_{БК} = 1$ пФ.

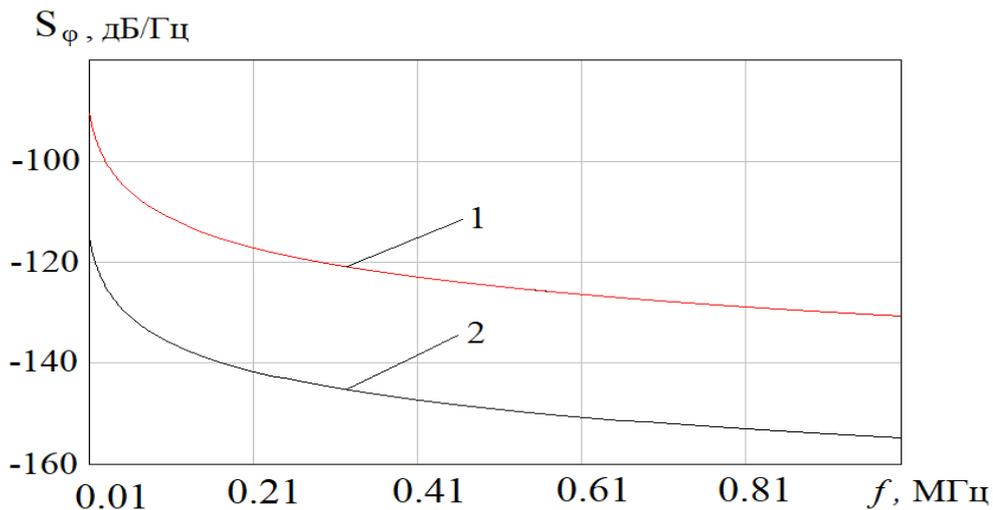


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности мощности фазового шума от частоты отстройки

Моделирование измененной схемы автогенератора показало, что добавление линейных конденсаторов $C_{БЭ}$ и $C_{БК}$ приводит к снижению спектральной плотности мощности фазового шума и увеличению мощности выходного сигнала на несущей частоте. По результатам анализа выявлено, что диапазон емкостей для конденсатора $C_{БК}$ составляет от 1

до 2 пФ, а для $C_{БЭ}$ от 1 до 17 пФ. Дальнейшее увеличение емкости этих конденсаторов приводит к срыву генерации. При моделировании емкость конденсатора $C_{БК}$ не менялась и была равна 1 пФ, а величина $C_{БЭ}$ менялась. При этом, увеличение емкости $C_{БЭ}$ до 5 пФ приводит к уменьшению мощности фазового шума, а дальнейшее увеличение номинала приводит к обратному эффекту (рис. 3). Мощность сигнала увеличивается на участке до 5 пФ и падает после (рис. 4). Также изменяется частота генерации (рис. 5).

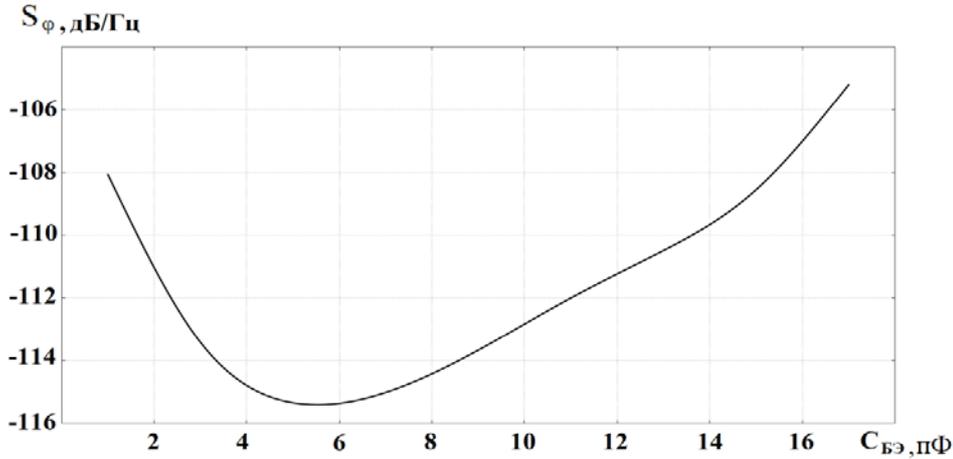


Рис. 3. Зависимость мощности фазового шума от емкости конденсатора $C_{БЭ}$ при фиксированном значении $C_{БК} = 1$ пФ на отстройке 10 кГц от несущей частоты сигнала

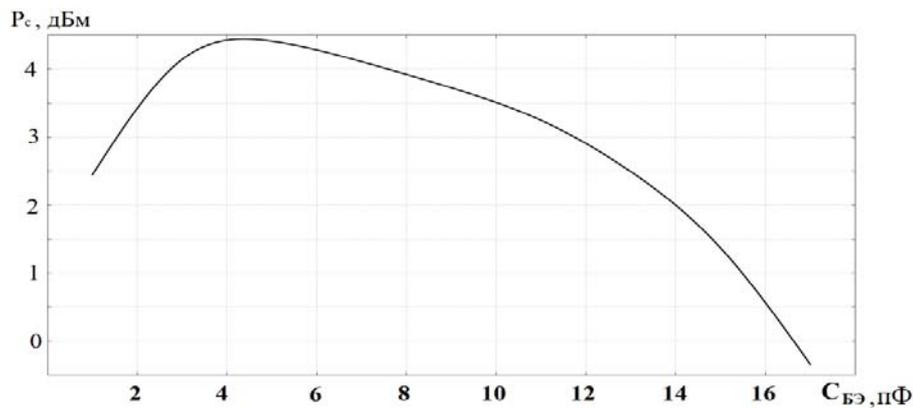


Рис. 4. Зависимость мощности выходного сигнала от емкости конденсатора $C_{БЭ}$ при фиксированном значении $C_{БК} = 1$ пФ на отстройке 10 кГц от несущей частоты сигнала

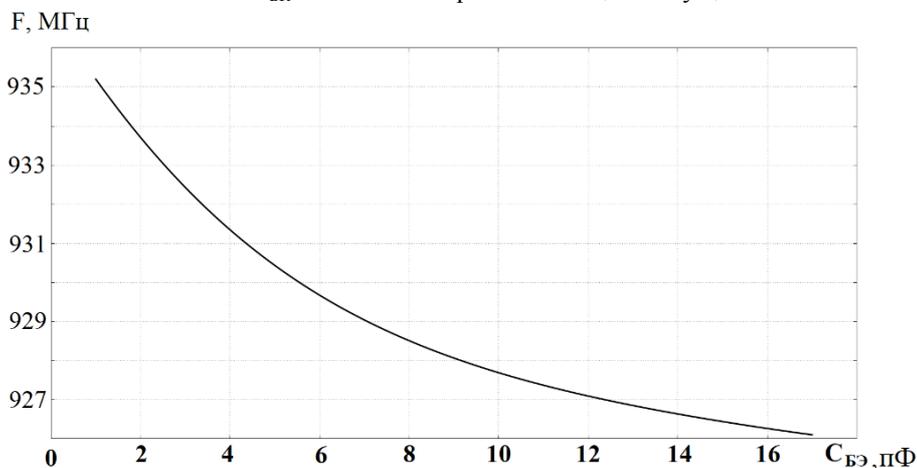


Рис. 5. Зависимость несущей частоты сигнала от емкости конденсатора $C_{БЭ}$ при фиксированном значении $C_{БК} = 1$ пФ

Расчеты проводились в программе AWR Design Environment 12, построение графиков по выборкам из расчетов проводилось в программе Gnuplot с использованием сглаживания кривых по методу Bezier.

ВЫВОД

Таким образом, было обнаружено, что введение в схему автогенератора конденсаторов $C_{БЭ}$ и $C_{БК}$, имитирующих барьерные емкости P-N переходов, приводит к снижению спектральной мощности фазовых шумов автогенератора и увеличению мощности выходного сигнала в диапазоне от 10кГц до 1МГц. Резкое снижение спектральной плотности мощности фазового шума оказывает дополнительное влияние на эффект динамического подавления шума, который был обнаружен в приборах М-типа [6]. Оба из этих эффектов приводят к уменьшению шума и росту мощности выходного сигнала. Влияние одного эффекта на другой требует дополнительных исследований.

Литература

1. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 3: Моделирование аналоговых устройств // М.: Радио и связь, 1992г., 120с.
2. Букашев Ф.И., Фомин О.Г., Байбузов А.В., Смирнов А.Ю. Моделирование биполярного транзистора со статической индукцией // Вестник Новгородского Государственного Университета Им. Ярослава Мудрого Н.Н.: Изд. Новгородский гос. Ун-т Им. Ярослава Мудрого, 2008г., с.13-16
3. Васильев А.В., Игнатъев А.А. // Гетеромагнитная микроэлектроника. – 2015. - № 19. - С. 37-42
4. Хвалин А.Л., Страхова Л.Л. // Гетеромагнитная микроэлектроника. – 2016. - № 21. - С. 43-50
5. Зырин С. С. // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. - 1989. - Вып. 3. - С. 33–37.
6. Игнатъев А.А., Куликов М.Н., Стальмахов В.С., Шаповалов А.С. Шумовые свойства ламп обратной волны со скрещенными полями Саратов: Изд. Сарат. ун-та, 1983. 93с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

А.В. Калинин, А.Л. Хвалин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Создана конструкция мощного транзисторного усилителя (МТУ) и его основных блоков: делителей/сумматоров мощности на 2 канала, базового двухкаскадного усилительного модуля. Были решены следующие задачи: спроектирован усилитель мощности в микрополосковом исполнении на подложке из поликора толщиной 1 мм на биполярном транзисторе 2Т937А с коэффициентом усиления 14 – 15 дБ в диапазоне частот от 2 до 4 ГГц. Выходная мощность составляет 22,5 Вт, КСВН входа и выхода не более 1,5. Данное устройство может использоваться в качестве предварительного усилителя в задачах получения высоких значений выходной мощности УВЧ.

ВВЕДЕНИЕ

Получение высоких выходных мощностей транзисторных усилителей является весьма сложной задачей. Этот класс устройств во многих радиотехнических системах определяет важнейшие тактико-технические параметры системы, такие как излучаемую и потребляемую мощность, ширину полосы рабочих частот, габариты и массу, надёжность и стоимость.

Актуально проведение исследований по разработке усилителей на отечественной элементной базе в СВЧ-диапазоне с большой выходной мощностью. Обеспечение широкой полосы рабочих частот МТУ на основе отечественных биполярных транзисторов является важной задачей для создания конкурентоспособной отечественной аппаратуры [1 – 3].

Целью данной работы являлось проектирование усилителя мощности в микрополосковом исполнении на подложке из поликора толщиной 1 мм на биполярном транзисторе 2Т937А в диапазоне от 2 до 4 ГГц с выходной мощностью более 20 Вт и КСВН входа и выхода не более 1,5. Проектирование усилителя выполнено в САПР AWR DesignEnvironment в модуле MicrowaveOffice.

В качестве модели транзистора использовалась модель Гуммеля-Пуна. Её параметры определялись на основе решения задачи оптимизации параметров, полученных из результатов экспериментальных измерений.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МТУ

Узкополосное согласование мощных транзисторных усилителей (МТУ), как правило, не представляет технической сложности. Существует значительное число отечественных и зарубежных патентов, использующих для достижения высоких выходных мощностей параллельное включение отдельных транзисторных кристаллов, либо создание специальных монолитных полупроводниковых модулей [1]. Такие конструкции позволяют получить десятки и сотни ватт выходной мощности. Однако они имеют серьёзное ограничение – усиление в узкой полосе частот.

Совершенно другая ситуация складывается при проектировании широкополосных МТУ. Необходимость использования широких частотных диапазонов (1/2 октавы и выше) часто является «критическим звеном», ограничивающим основные характеристики всей радиотехнической системы. При создании конструкции широкополосного МТУ необходимо учитывать ряд особенностей.

Основной конструктивной особенностью подобных МТУ является сложная схема построения выходного каскада. Известно, что возможности широкополосного согласования транзистора существенно ухудшаются с ростом его выходной мощности (и, как следствие, с увеличением ширины затвора, ёмкостей активной структуры), что приводит к необходимости использования ряда дополнительных согласующих элементов: ёмкостей, индуктивностей, отрезков микрополосковых проводников.

Кроме того, необходимо исключить влияние корпуса транзистора, которое проявляется в виде дополнительных ёмкостей и индуктивностей и в значительной степени определяет массогабаритные характеристики МТУ. Для исключения влияния корпуса

транзистора возможно использование кристаллов дискретных транзисторов, что подразумевает разработку специальной технологии монтажа МТУ.

Поскольку отдельный транзисторный кристалл позволяет получить выходную мощность усилителя не более 1,6 Вт, в МТУ необходимо применять многоканальное суммирование мощности, что неизбежно усложняет конструкцию и вносит дополнительные потери.

Также требуются дополнительные меры (и схемы) подавления отражённых волн. При согласовании в широкой полосе частот функциональных блоков МТУ и получения низкого уровня отражённых волн от входов и выходов отдельных каскадов усиления приходится применять реактивные элементы и схемные «излишества» в виде реактивно-диссипативных согласующих цепей. Согласующие цепи оказывают влияние на усиление каскадов, обратные связи, выходную мощность и КПД всего МТУ, увеличивают габариты и усложняют конструкцию устройства.

Перечисленные особенности МТУ приводят к тому, что электрические параметры широкополосных приборов оказываются заметно хуже таковых у узкополосных усилителей, а габариты и стоимость – заметно (иногда в разы) выше. Тем не менее, имеется целый ряд систем, в которых применение широкополосных усилителей необходимо. К таковым относятся сверхширокополосная локация, аппаратура тестирования на электромагнитную совместимость, специальные системы передачи данных, измерительная техника.

БЛОК-СХЕМА МТУ

На рисунке 1а показана блок-схема устройства. МТУ включает ряд основных блоков: блоки деления мощности для включения нескольких каналов усиления, блоки суммирования мощности и каналы усиления (КУ0-КУ8).

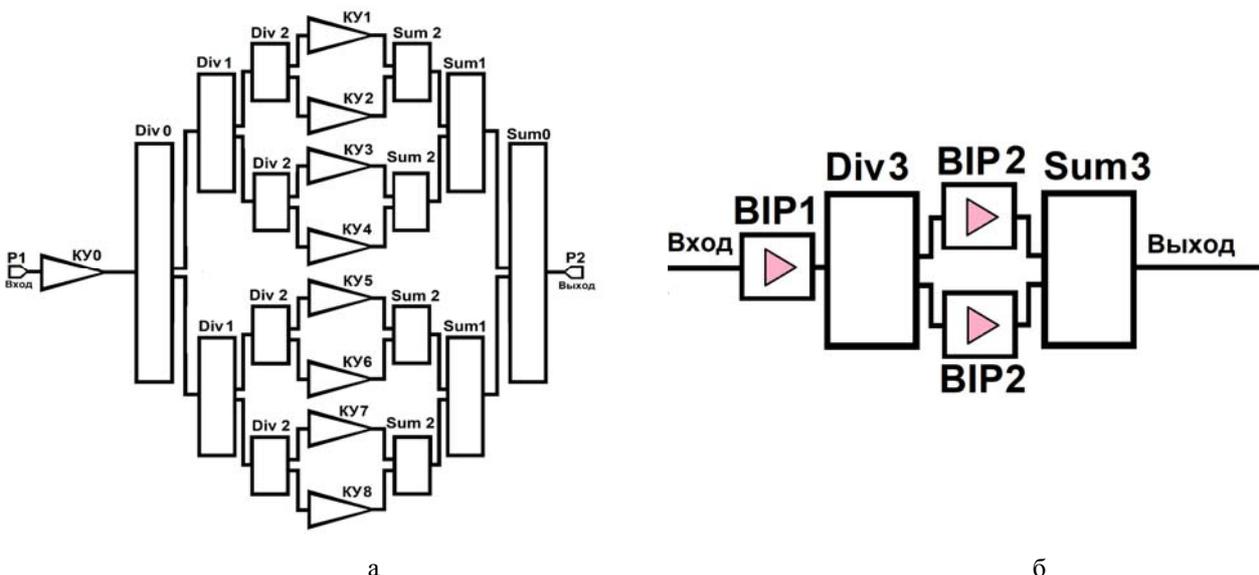


Рис.1 а) Блок-схема МТУ, б) Блок-схема канала усиления (КУ)

Первый каскад усиления содержит базовые усилители мощности VIP1 и VIP2, второй каскад усиления имеет 8 каналов КУ1 – КУ8 с параллельно-последовательным включением усилителей VIP1 и VIP2. Перед делителем мощности Div0 имеется усилительный каскад на основе базовых усилительных модулей VIP1 и VIP2, необходимый для обеспечения требуемого уровня сигнала на входе второго каскада усиления. Последующие делители мощности Div0, Div1, Div2 разделяют выходной сигнал первого каскада усиления на восемь параллельных выходов, необходимых для включения каналов КУ1 – КУ8 второго каскада усиления.

Для обеспечения требуемой выходной мощности МТУ используется схема суммирования выходных сигналов усилительных каскадов КУ1 – КУ8, включающая двухканальные сумматоры мощности Sum2, Sum1, Sum0. При этом восемь усилительных модулей (КУ1 – КУ8) второго каскада усиления имеют предельную выходную мощность $2 \times 1,6 = 3,2$ Вт. Тогда восьмиканальная схема суммирования (Sum2, Sum1, Sum0) выходной мощности усилительных модулей (КУ1– КУ8) позволит получить на выходе МТУ мощность $8 \times 3,2 = 25,6$ Вт.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК

В связи со сложностью схемы МТУ и большим объемом вычислений при проектировании возникает необходимость использования чрезмерно больших вычислительных ресурсов, а это не позволяет проводить расчётов в реальном времени, поэтому структурная и параметрическая оптимизация характеристик МТУ проводилась путём оптимизации параметров отдельных блоков, согласованных на входе и выходе с сопротивлением 50 Ом, а затем модели блоков сводились в единый расчётный проект всего МТУ. Результаты показаны на рисунке 2.

При оптимизации основных частотных характеристик устройства использованы симплекс-метод и метод случайного поиска. В диапазоне частот от 2 до 4 ГГц получены следующие характеристики: КСВН входа и выхода представленного усилителя составляет не более 1,5; коэффициент усиления в пределах 14 – 15 дБ. Исходя из этого, мы можем найти максимальную выходную мощность, которая с учетом потерь равняется 22,5 Вт (43,5 дБм).

ВЫВОДЫ

Таким образом, методики проектирования, использованные при создании конструкции МТУ, могут применяться при постановке и решении задач структурной и параметрической оптимизации устройств, применяемых в сверхширокополосной локации, аппаратуре тестирования на электромагнитную совместимость, специальных системах

передачи данных, измерительной технике. В результате данной работы был смоделирован мощный транзисторный усилитель с коэффициентом усиления 14 – 15 дБ в полосе частот от 2 до 4 ГГц.

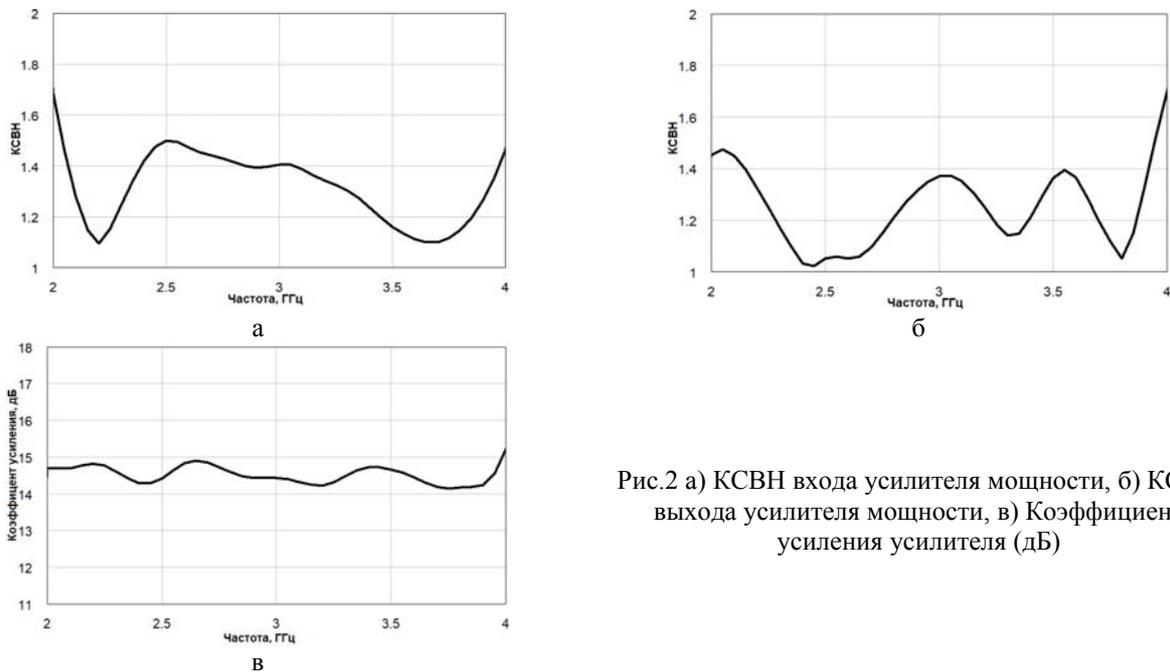


Рис.2 а) КСВН входа усилителя мощности, б) КСВН выхода усилителя мощности, в) Коэффициент усиления усилителя (дБ)

Литература

1. Хвалин А.Л. Анализ и синтез интегральных магнитоуправляемых радиотехнических устройств на ферритовых резонаторах: автореф. дисс. на соискание уч. степени д. техн. н.: 05.12.04. / Поволжская гос. академия телекоммуникаций и информатики: Самара. 2014. С. 312.
2. Хвалин А.Л., Страхова Л.Л., Воробьев А.В. // Радиотехника. - 2015. - № 7. - С. 35–40.
3. Хвалин А.Л., Васильев А.В. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2010. - № 10. - С. 29–33.
4. Кац Б.М., Мещанов В.П., Фельдштейн А.Л. Оптимальный синтез устройств СВЧ с Т-волнами / Под ред. В.П. Мещанова. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.
5. Система автоматизированного проектирования AWRDesignEnvironment / модуль MicrowaveOffice. Справочная информация.
6. Карпенко А.П. Методы оптимизации (базовый купе) <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/base.cou>
7. Сотов Л.С., Хвалин А.Л. // Гетеромагнитная микроэлектроника. - 2008. - № 5. - С. 121–145.

ПРИМЕНЕНИЕ ТРОИЧНОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ И ТРОИЧНОЙ ЛОГИКИ В МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ

А.С. Дронкин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

В данной работе описаны основные преимущества использования троичной системы счисления в качестве фундамента для построения микропроцессорной техники. Демонстрируется возможность построения базовых троичных логических элементов, образующих базисную систему, на основе современных комплементарных МОП (КМОП) транзисторов. Разработаны аналоговые и цифровые модели данных элементов, которые использовались для разработки одного из основных элементов троичного процессора - троичного арифметико-логического устройства (АЛУ).

ВВЕДЕНИЕ

Мы живем в эпоху информационных или, если использовать более точную формулировку, компьютерных технологий. Компьютеризация и автоматизация достигли невероятных масштабов, электронно-вычислительная техника непрерывно совершенствуется и уже достигла уровня, который был невообразим всего несколько десятилетий назад. Однако как долго могут сохраняться столь невероятные темпы развития?

В основе компьютерной техники лежат микропроцессоры, то есть специальные интегральные схемы (ИС), которые обеспечивают выполнение машинных инструкций. Однако в настоящее время классический подход к увеличению производительности процессоров, описанный законом Деннарда [2], в значительной степени исчерпал себя, а выполнение закона Мура [1], то есть увеличение количества транзисторов на схеме, уже не дает такой выигрыш в быстродействии, как это было раньше, и даже может показаться неоправданным [3]. Это же касается и бездумного наращивание количества ядер в процессоре, что связано с ограничениями, описанными в законе Амдала [4].

Необходимо искать новые возможности для развития. Одним из наиболее эффективных подходов, позволяющим повысить производительность микропроцессоров без отказа от привычных и отлаженных технологий – как в области создания интегральных схем, так и микроархитектуры, представляется развитие на уровне схемотехники логических элементов. А именно уход от двоичной системы счисления к троичной.

ПРЕИМУЩЕСТВА ТРОИЧНОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ

Простейшая из многозначных систем – троичная, имеет целый ряд преимуществ перед двоичной, если использовать ее в качестве основы для микропроцессорной техники. Для начала, кодирование информации в троичной системе счисления экономичнее, чем в любой другой [5]. Вернее, экономичнее, чем в любой другой системе счисления с целым основанием. Доказать это несложно. Пусть n – количество символов в некоторой системе счисления. Если мы обозначим основание системы как p , а r – количество разрядов, то $n = r * p$ количество кодируемой информации N в той или иной системе счисления будет определяться по формуле:

$$N(p) = p^r = p^{\frac{n}{p}}$$

На рисунке 1 показан график этой функции при $n = 8$. Найдем значение экстремума:

$$\ln(N(p)) = \ln\left(p^{\frac{n}{p}}\right) = \frac{n}{p} * \ln(p) \Rightarrow \frac{1}{N(p)} * \frac{dN(p)}{dp} = -\frac{n}{p^2} * \ln(p) + \frac{n}{p^2}$$

$$\frac{dN(p)}{dp} = n * p^{\frac{n}{p}-2} * (1 - \ln(p)) = 0 \Rightarrow \ln(p) = 1 \Rightarrow p = e \approx 2.73 \approx 3$$

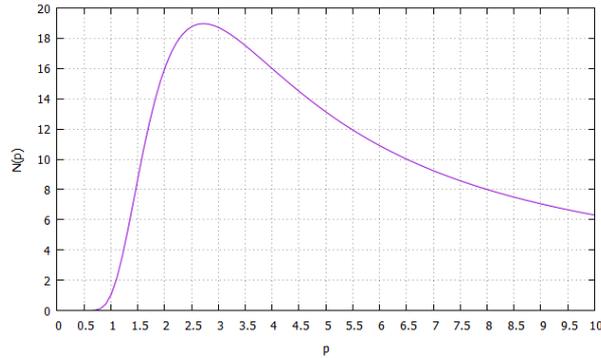


Рис. 1. График $N(p) = p^{\frac{n}{p}}$ при $n = 8$

Таким образом, наибольшую экономичность обеспечивает система счисления с числом Эйлера в качестве основания. Среди целых чисел три является самым близким к числу Эйлера.

Другим преимуществом троичной системы счисления является то, что она может быть симметричной относительно 0 [6]. То есть, мы можем использовать уровни -1, 0 и 1 (-, 0 и + в упрощенной записи). Это обеспечивает естественное представление отрицательных чисел и упрощает выполнение операций над ними. Так число 10 в симметричной троичной системе будет записываться как +0+, а число -10 будет получаться путем инверсии разрядов и выглядеть как -0-. При этом вычитание сводится к суммированию, поэтому сумматор является одновременно и субстрактором. Также упрощается сравнение чисел, благодаря чему команда ветвления по знаку занимает в 2 раза меньше времени.

Помимо этого при использовании троичной системы счисления округление вещественных чисел путем отбрасывания младшего разряда приводит к значительно меньшей ошибке. Рассмотрим число $0.+++_{+3} \approx 0.4938_{10}$ и число $0.1111_2 \approx 0.9375_{10}$. Отбросим младшие разряды. Получим числа $0.+++_{+3} \approx 0.4815_{10}$ и $0.111_2 \approx 0.875_{10}$, то есть ошибка 0.0123 и 0,0625 соответственно, Разница очевидна. Отбросим еще один разряд, результатом будут числа $0.++_{+3} \approx 0.4444_{10}$ и $0.11_2 \approx 0.75_{10}$, а ошибки составят 0.0494 и 0.1875. Это происходит по той причине, что младший разряд в троичной системе счисления всегда описывает число, которое меньше трети от числа, задаваемого старшим разрядом, а не половины, как в двоичной.

РЕАЛИЗАЦИЯ ТРОИЧНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наибольший интерес представляет возможность реализации троичной логики на КМОП транзисторах при симметричном питании. На это есть несколько причин. Во-первых,

это позволит использовать уже отлаженную технологию производства интегральных схем для троичных элементов. Во-вторых, КМОП микросхемы потребляют энергию источника питания только в момент переключения между статическими состояниями для перезарядки емкостей изолированных затворов полевых транзисторов. При нахождении в статическом состоянии они энергию источника практически не потребляют. Без этой особенности троичные логические элементы окажутся неконкурентоспособными, несмотря на все их достоинства и преимущества над двоичными аналогами.

КМОП транзисторы являются управляемыми электронными ключами. Суть подхода заключается в том, что у нас есть три ключа, каждый из которых подключен к одному из питаний: положительному (уровень «+1»), отрицательному (уровень «-1») и нейтральному (земле) (уровень «0»). При этом одновременно может быть открыт только один ключ, а два других должны быть закрыты. Определяя логику (условия) открытия и закрытия ключей, мы будем определять различные троичные функции. Схематично данный подход показан на рисунке 2.

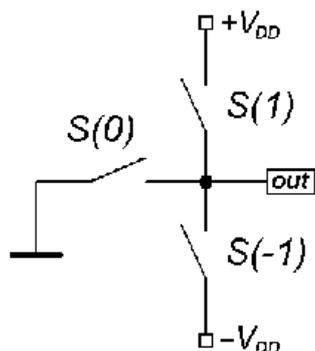


Рис. 2. Троичный элемент на основе управляемых электронных ключей с симметричным питанием

В качестве основы для разработки троичных элементов были взяты результаты работы Макарова Д.А. "Исследование трехуровневых логических устройств" [7], где были глубоко проработаны теоретические и практические вопросы построения троичных логических элементов на основе МОП-ключей, в том числе построены принципиальные электрические схемы базисных элементов троичной логики. В ходе анализа результатов, полученных Макаровым Д.А. при расчете троичных логических схем с использованием системы автоматического проектирования (САПР) Electronics Workbench, было выявлено, что автор при моделировании разработанных им троичных элементов использовал так называемые «идеальные модели» полевых транзисторов с изолированным затвором, соответствующие маломощным приборам с усредненными характеристиками. При таком подходе удастся успешно проанализировать поведение отдельного троичного элемента, работающего на холостом ходу. При добавлении нагрузки, например, в виде

последовательно подключенного троичного элемента, возникают существенные искажения выходного сигнала. Таким образом, при использовании «идеальных моделей» невозможно осуществить построение достаточно сложных логических элементов.

Для решения возникшей проблемы студентами кафедры физики твердого тела были подобраны SPICE-модели (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, программа моделирования с упором на интегральные электрические схемы) транзисторов, идентичные реальным КМОП транзисторам, применяемым в интегральных структурах логических микросхем КМОП, а именно n-канальный транзистор типа 2N7002 и p-канальный — типа BSS84. Троичные логические элементы, построенные с использованием данных моделей, оказались способны работать на динамическую нагрузку в 10..50 пФ без искажения формы сигнала, а также обеспечивать выходной ток порядка 1 мА, что соответствует требованиям, которые обычно предъявляются к типовым логическим элементам серий КМОП. На рисунке 3 показаны примеры схемотехнической реализации троичных логических элементов И-НЕ и левой циклической инверсии, выполненных с использованием разработанных SPICE-моделей соответствующих реальным КМОП транзисторам. Данные функции образуют базисную систему Поста [8].

Несмотря на эффективность аналоговых моделей с точки зрения объективного отражения работы реальных устройств, их симуляция в реальном времени имеет высокие требования к вычислительной мощности, поскольку при расчете формируется сложная система нелинейных дифференциальных уравнений, решаемая численными методами. Чем сложнее моделируемая схема – тем сложнее система уравнений, и тем больше времени требуется для ее решения с высокой точностью, необходимой для исследования процесса переключения.

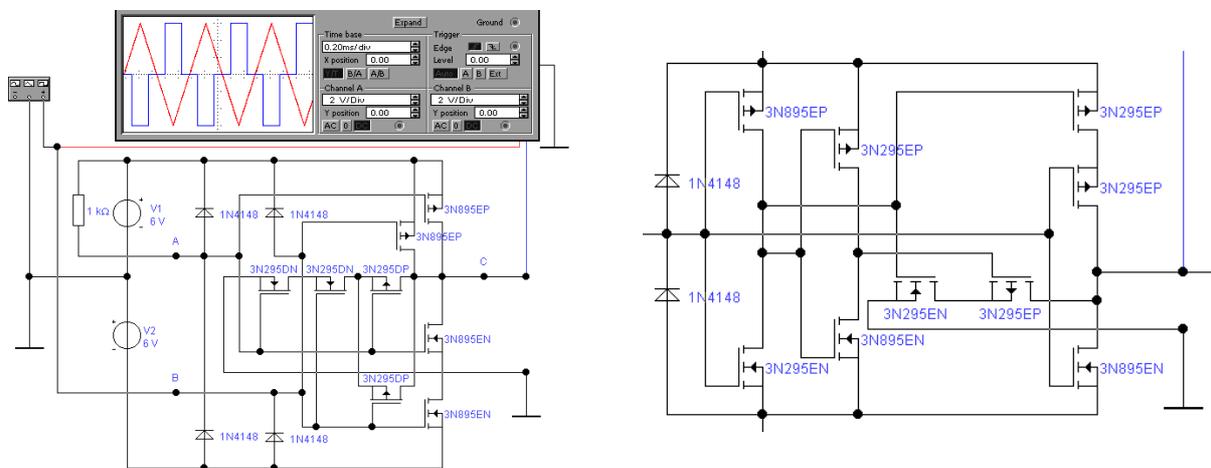


Рис. 3. Троичный элемент «И-НЕ» (слева) и троичный элемент левой циклической инверсии (справа) на основе моделей реальных МОП транзисторов

В связи с этим было решено перейти к цифровым моделям, которые полностью отражают логику работы троичных элементов, опуская из рассмотрения физику устройств. Сердцем цифровых моделей выступает динамическая библиотека, написанная на языке C++, и описывающая как методы для взаимодействия модели с ядром симулятора, так и логику работы модели. Всего было разработано 27 логических элементов, которые использовались при построении троичного арифметико-логического устройства.

ТРОИЧНОЕ АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) является неотъемлемой частью микропроцессора и служит для выполнения арифметических и логических операций над данными. Оно включает в себя устройство управления, которое реализует выбор одной из его операций, а также операционного устройства, которое и определяет встроенный функционал арифметико-логического устройства. Представленное на рисунке 4 троичное арифметико-логическое устройство, а точнее его операционная составляющая, способно выполнять 8 функций: инверсия, циклическая инверсия влево, циклическая инверсия вправо, функция минимума (троичное И), функция максимум (троичное ИЛИ), функция максимума с исключением, суммирование по модулю 3, суммирование.

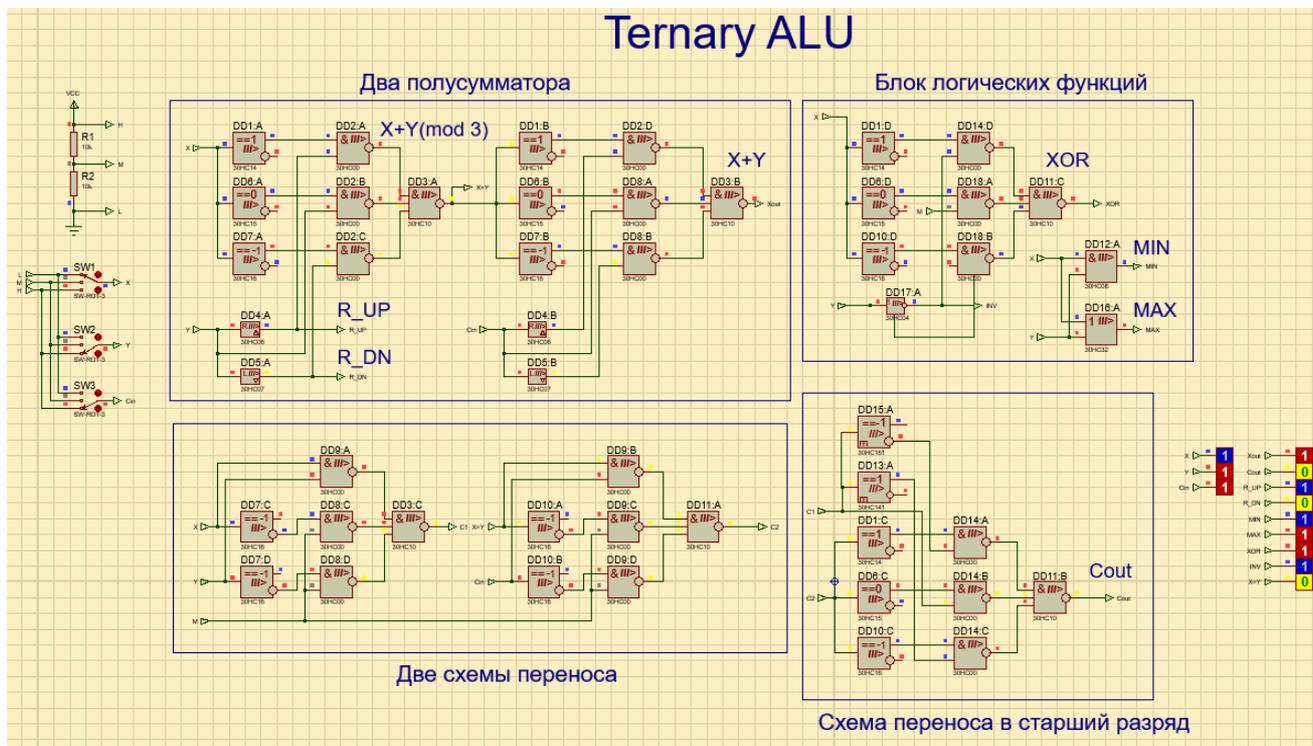


Рис. 4. Троичный элемент «И-НЕ» (слева) и троичный элемент левой циклической инверсии (справа) на основе моделей реальных МОП транзисторов

Используя инверсию и суммирование легко получить также операцию вычитания, а инверсию и операцию сложения по модулю 3 – операцию сравнения. За 4 такта такое АЛУ может сложить два 4-тритовых числа, то есть осуществить операции над целыми числами в диапазоне от -40_{10} до 40_{10} . Аналогичному двоичному АЛУ для этого потребовалось бы работать с 7-битовыми числами (6-битовыми, если рассматривать диапазон от -31_{10} до 31_{10} , плюс один бит на знак), что практически в два раза больше. Соответственно, понадобилось бы почти в два раза больше операций. При этом необходимы дополнительные преобразования, связанные с битом, выделенным под знак (например, преобразование к обратному или дополнительному коду, введение модифицированного кода с целью выявления переполнения разрядовой сетки и нарушения знака). Более того, за счет отсутствия бита знака значительно упрощается выполнение операций смещения. Таким образом, даже на таком простом примере можно видеть, что троичное арифметико-логическое устройство является более эффективными и простыми по своей архитектуре, в сравнении с двоичным аналогом. Под вопросом стоит быстродействие и помехоустойчивость элементов, которые легли в основу троичного арифметико-логического устройства, однако для полноценного анализа этих характеристик необходимо перейти от моделирования к физической реализации устройства.

ВЫВОДЫ

Таким образом, на текущий день удалось показать возможность создания одного из ключевых элементов ЭВМ – арифметико-логического устройства, на основе троичных логических элементов, а также подготовить необходимый задел для создания действующего троичного компьютера, в основу которого будет положена предложенная в работе элементная база:

- Аналоговые модели троичных логических элементов, на основе которых предполагается в дальнейшем изготовить интегральные логические микросхемы.
- Эффективные цифровые модели троичных логических элементов, позволяющие оперативно и достоверно исследовать работу сложных троичных цифровых устройств.
- Полноценное троичное арифметико-логическое устройство в виде законченного функционального узла.

Литература

1. Детинич Г. Рост числа транзисторов в чипах продолжает следовать закону Мура 3DNews - Daily Digital Digest, 1997- . – URL: <https://3dnews.ru/1005417>

2. Айзек Р. Будущее технологии КМОП // Открытые системы. - 1992. – URL: <https://www.osp.ru/os/2000/10/178239/> (
3. Горелкин, Г. Закон Амдала <https://medium.com/german-gorelkin/amdahls-law-79a8edb040e2>
4. Султанов И.А. // Молодой учёный. 2016. - № 28. – С. 182-194
5. Макаров, Д.А. Исследование трехуровневых логических устройств: дипломная работа // Д. А. Макаров; науч. рук. Никитин В. М. - Санкт-Петербургский Государственный Университет аэрокосмического приборостроения, 2000. – 159 с.
6. Поспелов Д.А. Логические методы анализа и синтеза схем / Д. А. Помпелов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1974. - 368 с.

ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ФИЗИКИ**БОЛЬШАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ АУДИТОРИЯ СГУ
КАК МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР**

В. М. Аникин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

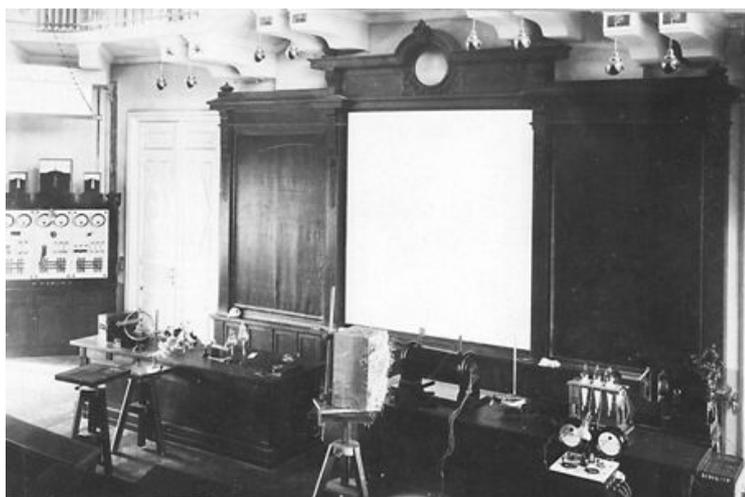
Большая физическая аудитория (БФА) Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского за прошедшее столетие обрела статус важного научного информационного центра. В ней проходили и проходят научные конференции, школы, семинары, имеющие общероссийский и международный ранг. В их числе – научное событие мировой значимости, отметившее в 2020 г. 100-летний юбилей. Это доклад гениального русского ученого, в 1920 г. профессора Саратовского университета Николая Ивановича Вавилова «Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости», с которым он выступил 4 июня 1920 г. на Третьем Всероссийском съезде по селекции и семеноводству.

Первые годы существования учрежденного в 1909 г. Саратовского университета были ознаменованы активным строительством его корпусов. В конце 1913 г. было завершено строительство здания Физического института. Эпопею сооружения Физического института «по свежим следам» еще в дореволюционные годы отразил первый заведующий кафедрой физики (1909) и первый декан физико-математического факультета (1917) Саратовского университета Владимир Дмитриевич Зёрнов, ученик великого русского физика П. Н. Лебедева [1–3]. В журнале «Физическое обозрение» (1916) была опубликована его статья «Физический институт Императорского Николаевского университета», где он описывал историю проектирования и строительства здания, его планировку, элементы конструкции и т.д. Оригинальная статья В.Д. Зёрнова перепечатана в журнале «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика» [4].

Едва ли не лучшей в России по своим эстетическим достоинствам и акустическим качествам стала Большая физическая аудитория (БФА) Физического института. Насколько сохранила эта аудитория вид, близкий к первоначальному, можно определить из описания, оставленного В. Д. Зёрновым в статье [4]. В частности, он указывает (в русских мерах) площадь аудитории – 55 квадратных сажен и высоту – 11 аршин, вместимость сделанного «в два подъема» амфитеатра – 300 мест и устройство в ее середине «площадки для проекционного фонаря». Освещение аудитории осуществлялось «восемнадцатью накальными лампами на 200 свечей каждая, спускающимися в изящной арматуре с потолка». Как отмечал Владимир Дмитриевич, специалист по акустике, «акустические условия аудитории удались весьма хорошо», что «надо приписать присутствию балкона над лекторским столом, играющего роль раковины» [4, с. 62, 63].

Красивая и вместительная аудитория использовалась не только для учебных занятий, но и привлекалась для проведения ответственных мероприятий различного рода – учебно-

организационных, научных, общественно-политических, торжественных, юбилейных и т.д. Здесь проходили и проходят встречи с известными учеными, писателями, артистами, политическими деятелями. В Большой физической аудитории традиционно проводятся встречи с абитуриентами, защиты выпускных студенческих квалификационных работ, защиты диссертаций, вручение дипломов выпускникам, проведение пленарных заседаний международных научных конференций и съездов, награждения сотрудников и студентов. Нередко значимость коллективных собраний в БФА выходит за рамки отдельного факультета и даже университета.



Большая физическая аудитория Саратовского университета, 1920–1930-е гг.

Настоящие заметки посвящены 100-летию юбилею одного из научных мероприятий мирового значения, прошедшего 4–13 июня 1920 г. в стенах БФА, – III Всероссийского съезда по селекции и семеноводству. На съезде выступил профессор агрономического факультета, заведующий кафедрой частного земледелия и селекции Саратовского университета Николай Иванович Вавилов, представивший открытый им закон о гомологических рядах в наследственной изменчивости [5]. По прогностической значимости этот доклад сразу стали сравнивать с периодическим законом химических элементов Д. И. Менделеева. Закон, открытый Н. И. Вавиловым в Саратове, определяет с генетических позиций фундаментальные особенности эволюции растений и живых организмов и образует научную основу для поиска и селекции сельскохозяйственных культур с ценными признаками. Справедливость и актуальность закона для биологии подтверждается все новыми и новыми исследованиями, проводимыми на молекулярно-генетическом уровне.

В год подготовки и проведения селекционного съезда страна пребывала в состоянии экономического и социального кризиса, упадка промышленного и сельскохозяйственного производства, транспортного коллапса. Продолжались Гражданская война и иностранная интервенция, обострилась продовольственная проблема. Для преодоления последней властями

была введена (в рамках проводимой после 1917 г. политики военного коммунизма) продразверстка, осуществлявшаяся специальными продотрядами, что вызвало резкое недовольство крестьян. Непокойная обстановка в стране, в том числе введение военного положения в Саратовской губернии в мае, в канун проведения съезда, сказались на его организации. В программу съезда пришлось внести некоторые коррективы. Из-за перебоев в работе железнодорожного транспорта не все смогли прибыть на съезд. Кроме того, не удалось получить разрешения на планировавшееся посещение Краснокутской опытной станции.

Участники съезда начали съезжаться в Саратов с конца мая 1920 г. Вот что писал профессор Сергей Иванович Жегалов, пионер российской селекции и генетики, о поездке на съезд из Москвы в Саратов и обратно в письме от 30 мая 1920 г.:

«Едем со скоростью 15 верст в час; до Саратова будем тащиться 2 1/2 суток. В нашем распоряжении 1/2 вагона III класса, сидим по 2–3 человека на длинной лавке. Ночью все спали; пока удавалось оттаивать места от посторонней публики, тем более, что у одного из едущих нашелся вагонный ключ. Получили по 2-е селедки, конфеты и хлеб. Селедки пойдут на обмен, т.к. я решительно запротестовал против разведения грязи в вагоне <...>. Неприятно, что часть окон забита решетками, точно в арестантском вагоне, а часть просто досками». [6, с. 55].

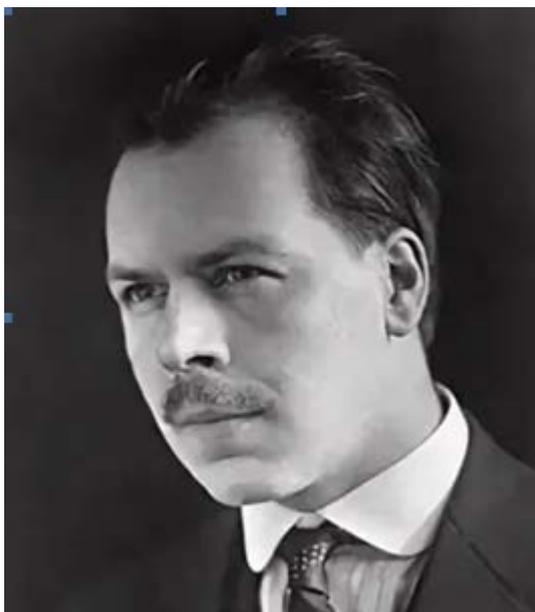
Приезжавшие в Саратов надеялись здесь запастись продуктами. По этому поводу С. И. Жегалов сообщает:

«Муки не привез, купить ее можно только из-под полы, надо искать и знать, где цена около ста рублей пуд. Зато купил пуд разной крупы; провез благополучно, пугали очень обысками в поездах, но сейчас, по-видимому, смотрят не так строго; проходили раза три, но вытаскивали из-под лавок только большие мешки с мукой; запакованных вещей не трогали. В Саратове при взвешивании товарищу показалось подозрительным, что при малом объеме мои вещи много весят, и он пробовал их ощупывать, но толчея и давка была так велика, что найти ему ничего не удалось. Запаковал я крупу на совесть, думаю, что если бы и открыли корзину, то вряд ли бы скоро нашли» [6, с. 55, 56].

Разместили участников съезда в помещениях агрономического факультета на Театральной площади. Бытовое обеспечение участников съезда было едва ли не самой главной задачей организаторов.

4 июня 1920 г. с докладом «Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости» на съезде выступил профессор Николай Иванович Вавилов. В докладе содержался «ключ» к познанию закономерностей эволюции культурных растений, к рассмотрению морфологии, анатомии и систематики растений с генетических позиций, к научному подходу в селекционном деле. В документах, отзывах участников и последующих многочисленных научных комментариях

выступление Н. И. Вавилова отнесено к одному из наиболее выдающихся достижений отечественной и мировой науки.



Профессор Саратовского университета
Николай Иванович Вавилов (1887–1943)

На съезде присутствовали крупные ботаники, растениеводы, селекционеры, агрономы, руководители опытных станций, представители Наркомзема и Губземотдела. Реакция собравшихся на доклад Н. И. Вавилова была восторженной. Вот что написал в тот же день представлявший Петровскую сельскохозяйственную академию С. И. Жегалов о том, с каким энтузиазмом был встречен аудиторией этот доклад:

«Заседание это было исключительно интересным и оставило на редкость сильное впечатление. Это был большой триумф Николая Ивановича, который будет продолжаться при каждом его выступлении. Он сделал интересный, исключительно интересный доклад с громадным количеством удивительно хороших демонстраций. Когда он кончил, к кафедре подошел старый ботаник Заленский и взволнованным голосом заявил: «Господа, настоящее заседание уже стало историческим, и биологи могут приветствовать своего Менделеева». Напоминание о Менделееве имело большой смысл по сути доклада и вместе с тем отмечало значение последнего. Настроение аудитории поднялось до большой высоты, а собрание было очень многолюдным и происходило в большой и прекрасной аудитории Физического института. В дальнейшем это настроение лишь поддерживалось, и завтра съезду будет предложена резолюция, отмечающая исключительную важность работ Николая Ивановича и необходимость предоставить в его распоряжение все необходимые средства для работы» [6, с. 55].

Атмосфера, царившая на съезде во время выступления Н. И. Вавилова, отражена и в опубликованных в 1987 г. воспоминаниях доктора сельскохозяйственных наук, профессора Петра Петровича Бегучева, бывшего в год проведения съезда практикантом при кафедре садоводства и огородничества агрономического факультета:

«... Главное, что отложилось в памяти из работы съезда, – это доклад Николая Ивановича о законе гомологических рядов в наследственной изменчивости. Заседание происходило в крупнейшей (физической) аудитории Саратовского университета, заполненной до отказа. С напряженным вниманием при абсолютной тишине был выслушан доклад. Затем после какого-то короткого периода молчания из первых рядов отделилась импозантная фигура профессора В. Р. Заленского – выдающегося физиолога, автора известного закона Заленского, тоже одного из любимых наших учителей. Опершись руками на стол и нагнувшись к участникам съезда, он, голосом, взволнованным от гордости и радости за нашу науку, за ее достижения, сказал: «Перед нами Менделеев в растениеводстве!» Гром аплодисментов покрыл слова маститого ученого» [7, с. 145].

В «гущу» подготовки к съезду была ученица Н. И. Вавилова Александра Ивановна Мордвинкина:

«На третий год пребывания в Саратове Вавилов затратил много энергии и сил на организацию III Всероссийского съезда по селекции и семеноводству, созывавшегося Саратовским областным комитетом по опытному делу. Несмотря на то, что жизнь в стране не вошла в нормальное русло, извещение о съезде нашло горячий отклик. В лаборатории шла усиленная подготовка к докладу Николая Ивановича, оформляли таблицы, готовили выставку <...> Открылся съезд в самой большой аудитории университета. Ни один доклад впоследствии не производил на меня такого сильного впечатления, как выступление Николая Ивановича. Он говорил вдохновенно, все слушали его с затаенным дыханием, чувствовалось, что перед нами открывается что-то большое, новое в науке. Когда раздались бурные, долго несмолкающие аплодисменты, Вячеслав Рафаилович Заленский сказал: «Это биологи приветствуют своего Менделеева». У меня в памяти особенно запечатлелись слова Николая Максимовича Тулайкова: «Что можно добавить к этому докладу? Могу сказать одно: не погибнет Россия, если у нее есть такие сыны, как Николай Иванович» [7, с.139].

5 июня 1920 г. съезд принял специальную резолюцию по докладу Н. И. Вавилова. В ней констатировалось, что «профессору Н. И. Вавилову удалось уловить в процессах изменчивости закономерность, которая открывает перед нами в данной области новую эпоху». Съезд рекомендовал: а) напечатать работу Н. И. Вавилова «в возможно достойном виде» на русском и английском языках; б) «отвести одно из вполне оборудованных советских хозяйств для продолжения в широком масштабе опытов Н. И. Вавилова по скрещиванию и выведению новых

пород культурных растений»; в) «продолжить работы Н. И. Вавилова по собиранию культурных пород из различных стран земного шара» [5, с. 248].

От имени съезда была направлена телеграмма в Совнарком – А. В. Луначарскому, наркому просвещения, и С. П. Серее, наркому земледелия, в которой говорилось:

«На Всероссийском селекционном съезде заслушан доклад проф. Н. И. Вавилова с изложением основ теории изменчивости, основанной главным образом на изучении материала по культурным растениям. Теория эта представляет крупнейшее событие в мировой биологической науке, открывает самые широкие перспективы для практики. Съезд принял резолюцию о необходимости обеспечить развитие работ Вавилова в самом широком масштабе со стороны государственной власти и входит об этом со специальным докладом» [5, с. 249].

Сущность открытия Н.И. Вавилова разъяснялась и в материале для газеты «Известия».

Протоколы заседаний III селекционного съезда в полном объеме «по горячим следам» издать не удалось. Вышел первый (и оставшийся единственным) сборник трудов [1]. В нем приведены данные об участниках (членах) съезда (177 человек), приведена классификация поступивших к 17 мая 1920 г. 42 докладов (по общим вопросам, по отдельным вопросам, по организационным вопросам) и опубликовано 22 тезиса и 11 полных докладов, которые дают представления о проблемах селекции и генетики, рассматривавшихся на съезде. Доклад Н. И. Вавилова, согласно решению съезда, был издан отдельной брошюрой.

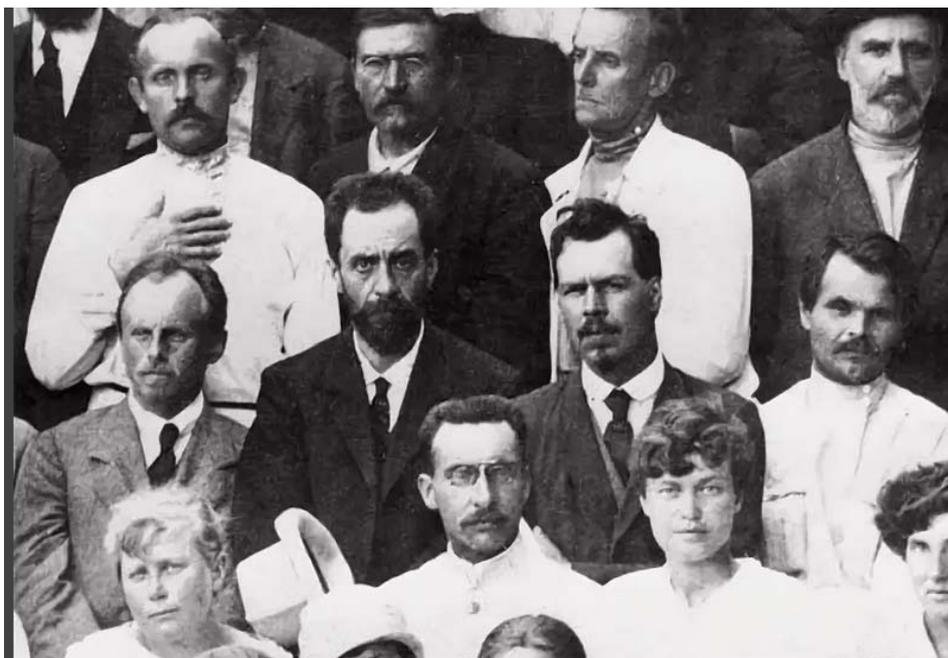
Исторический интерес представляют съездовские заметки С. И. Жегалова, которые он ежедневно заносил в свою записную книжку. Он зафиксировал во всех подробностях доклад самого Николая Ивановича, попутно восхищаясь при этом его знаниями систематики, а также выступления таких авторитетных специалистов. Так, 4 июня С. И. Жегалов отметил:

«Тулайков – забываешь, что ты в Саратове, в физической аудитории. Думаешь, что в старейшем ботаническом обществе, удивительное обилие и проработка материала гомологических рядов химии и ботаники. Радость за молодежь. Чувство, что мы не погибли» [6, с. 56].

Доклады на съезде были актуальны для своего времени и посвящались проблемам эффективного растениеводства в различных климатических зонах, вопросам сортоиспытания, селекции, защиты сельскохозяйственных культур от вредителей, организации селекционной деятельности в стране.

В первый день работы съезда делегаты сфотографировались во дворе университета.

Спустя 18 лет, 15 августа 1928 г., в Большой физической аудитории прошло заключительное заседание VI съезда Российской ассоциации физиков. Одним из руководителей съезда был младший брат Н. И. Вавилова – Сергей Иванович Вавилов, впоследствии возглавивший Академию наук СССР [8–10].



Ректор В. Д. Зёрнов и профессор Н. И. Вавилов (в центре) среди участников съезда (фрагмент фотографии)

В 1997 г. в Большой физической аудитории в память о докладе Н. И. Вавилова был установлен бюст Николая Ивановича. Ежегодно в этой аудитории в рамках международной конференции Saratov Fall Meeting проходит одна из её секций, посвященная пропаганде последних достижений в области физики среди учащихся старших классов школ.



На Дне науки для школьников, проведенном в рамках конференции Saratov Fall Meeting

Литература

1. Зёрнов В. Д. Записки русского интеллигента. М.: Изд-во «Индрик», 2005, 400 с.
2. Аникин В.М. // УФН. - 2016. - Т. 186. - Вып. 2. - С. 169-173.
3. Аникин В. М. // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. - 2014. - Т. 14. - Вып. 1. - С. 53–58.
4. Зёрнов В. Д. // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. - 2014. - Т. 14. - Вып.1. - С. 59–64.
5. Вавилов Н. И. Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости. Л.: Наука, 1987. 256 с.
6. Полумордвинова И. В. // Известия ТСХА. – 2012. - Вып. 4. - С. 50–60.
7. Николай Иванович Вавилов: Очерки, воспоминания, материалы. М.: Наука, 1987. 488 с.
8. Вавилов С. И. // Научное слово. - 1928. - № 8. - С. 95–101.
9. Аникин В. М. // Вестник Российской академии наук. - 2020. - Т. 90. - № 1. - С. 81–88.
10. Усанов Д. А., Аникин В. М. // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. - 2019. - Т. 19. - Вып. 2. - С. 153–161.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРЕПОДАВАНИЯ ОПТИКИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ И СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Л.А. Романченко

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»

В работе рассматривается проблема преподавания оптики студентам геологических специальностей и направлений. Геологические направления и специальности представляют собой широкий круг научных областей - от нефтегазового дела и технологии геологической разведки до технологии обработки драгоценных камней и металлов. Основной трудностью, с которой сталкиваются преподаватели при преподавании физики и оптики как одного из ее разделов, является формирование рабочей программы дисциплины с учетом особенностей уровня подготовки студентов и требований, предъявляемых к будущим выпускникам работодателями. Оптические методы исследования активно применяются в геологии, поэтому их физические основы должны изучаться студентами в рамках раздела “Оптика”, являясь базой для дальнейшего освоения специальных дисциплин и прохождения практик. Методической задачей, решение которой предлагается, является устранение несогласованности между запросом работодателей к качеству знаний выпускников и традиционным подходом к преподаванию оптики в вузе.

При реализации компетентного подхода от обучающегося требуется приобрести необходимые для дальнейшей работы компетенции, прописанные в ФГОС и закрепленные учебным планом. Т.е., начиная с 1 курса, ВУЗ должен готовить выпускника, способного сразу после получения диплома специалиста или бакалавра продемонстрировать потенциальному работодателю необходимые для работы знания, умения, владения теми или иными методами и методиками, которые помогут ему стать востребованным на рынке труда. Ориентация на требования работодателя с самого начала обучения требует от преподавателя нового подхода к преподаванию всех без исключения дисциплин. Наиболее сложно перестроиться в преподавании общих дисциплин, для которых всегда существовала сложившаяся и отработанная методика преподавания. В более ранних государственных стандартах образования приводился перечень разделов дисциплины, необходимых для изучения. В настоящее время преподавателю приходится ориентироваться на закрепленные в учебном плане компетенции, руководствоваться собственным педагогическим опытом и согласовывать рабочую программу своей дисциплины с выпускающей кафедрой.

Геологические направления и специальности представляют собой широкий круг научных областей - от нефтегазового дела и технологии геологической разведки до технологии обработки драгоценных камней и металлов. Среди них есть направления и специальности, для которых

особенное значение имеет изучение оптики. Так, например, для программ подготовки бакалавров и магистров по направлениям «Геология», «Технология художественной обработки металлов» и для программ подготовки специалистов по специальности «Прикладная геология» знание оптики необходимо в качестве базы для освоения некоторых дисциплин как на младших, так и на старших курсах. Например, профильные геологические дисциплины, изучаемые на младших курсах (1 и 2 курсы бакалавриата, 1-3 курсы специалитета) «Минералогия», «Кристаллография», «Кристаллофизика», «Петрография», которые в том или ином виде входят практически во все учебные планы указанных направлений и специальностей, предполагают знание оптических методов исследований и владение оптическими приборами для проведения исследований структуры минералов, пород и руд.

Дисциплины, изучаемые на старших курсах бакалавриата, специалитета и в магистратуре - «Технологическая минералогия и геммология», «Специальные методы исследований минералов», «Лабораторные методы изучения минералов, пород и руд», «Диагностика камней», - лишь небольшая часть широкого спектра профильных дисциплин, для которых необходимо знание дисперсии, интерференции, дифракции, поляризации. В рамках изучения данных дисциплин используются специальные методы исследований минералов, пород, металлов:

- ☐ эмиссионный спектральный анализ,
- ☐ микрорентгеноспектральный (микрорентгеновский) метод анализа,
- ☐ рентгенорадиометрический анализ,
- ☐ атомно-абсорбционный спектральный анализ,
- ☐ рентгенофлуоресцентный анализ.

Изучение оптики в рамках дисциплины «Физика» на 1 курсе программ подготовки бакалавров и специалистов происходит, как правило, во 2 семестре в том случае, если весь курс физики рассчитан на два семестра обучения. На оптику традиционно отводится 4-6 часов лекций и столько же практических и/или лабораторных занятий. В силу того, что лекционные потоки объединяются и включают в себя группы студентов, относящиеся к различным направлениям (специальностям), преподавание необходимых для каждого из данных направлений разделов физики в рамках только лекционных занятий достаточно сложно обеспечить [1]. Чтобы в столь сжатые сроки успеть дать обучающимся необходимые знания и научить основам методов оптических исследований, необходимо концентрировать усилия преподавателя на наиболее важных разделах волновой оптики. Так, совершенно необходимым представляется выполнение лабораторных работ, связанных с дифракцией («Дифракция от щели»), интерференцией («Кольца Ньютона»), поляризацией света («Поляриметр») и решение соответствующих задач на

практических занятиях. В рабочих программах дисциплины «Физика» для указанных направлений и специальностей (бакалавриат и специалитет) данные разделы должны быть обязательно представлены.

Однако, образовательные организации и кафедры, на которых ведется преподавание физики, сталкиваются с проблемой сокращения количества аудиторных часов и увеличения часов, отводимых на самостоятельную работу студента, что затрудняет освоение компетенций, связанных с применением физических методов исследований. Другая проблема - недостаточное оснащение учебных лабораторий - как правило, связана с тем, что приоритеты при распределении средств на улучшение материальной базы отдаются специализированным выпускающим кафедрам, обеспечивающим развитие научных направлений вуза. Решением данной проблемы может являться работа «невыпускающих» общих кафедр в области профориентации, привлечения студентов колледжей, школьников. При проведении профориентационных мероприятий требуется использование лабораторной базы вуза, поэтому закупку лабораторного оборудования можно осуществлять, преследуя одновременно две цели - привлечение абитуриентов в вуз и обеспечение требований работодателей к качеству выпускника, а именно к его компетенциям, отражающим способность проводить исследования в профессиональной области. Третья проблема, с которой сталкивается вуз при преподавании в том числе оптических дисциплин, - отсутствие в структуре организации музея физических приборов [2-4]. Наличие таких музеев позволяет организовать внеаудиторную работу со студентами, где у них появляется возможность расширить свои знания по физике. Физические демонстрации по оптике всегда особенно эффектны, поэтому их проведение как в часы лекционных занятий, так и во время экскурсий всегда вызывает неподдельный живой интерес аудитории и мотивирует студентов и будущих абитуриентов к дополнительному изучению продемонстрированных явлений. Это, безусловно, не может заменить практических или лабораторных занятий, но в условиях ограниченности времени, отводимого на изучение оптики, может явиться прекрасным дополнением к процессу обучения. Не каждый университет располагает музеем физических приборов, поэтому необходимо сотрудничество вузов в данном направлении как часть решения обозначенных проблем.

Таким образом, для эффективного преподавания оптики в вузах, где проводится обучение по направлениям и специальностям геологического профиля, для дальнейшего удовлетворения требований потенциальных работодателей, необходимо включать в программу по физике изучение волновой оптики, подкрепляя традиционные формы обучения - лекции, практические и лабораторные занятия, - проведением экскурсий в Музеи физических приборов, проведением лекционных демонстраций, а также включать в рабочие программы дисциплин в качестве обязательных лабораторные работы по изучению дифракции, интерференции, поляризации.

Литература

1. Романченко Л.А. О проблеме совместного обучения студентов с различным уровнем базовых знаний по физике // Физика и физическое образование: развитие, проблемы, достижения: Сборник научных трудов. – Саратов: Саратовский источник, 2020. – С. 170-173.
2. Романченко Л.А., Соколов Н.Н., Рафиенко В.А., Игнатъев А.А. Об опыте использования музеев физических приборов в образовательном процессе // Инновации и рискологическая компетентность педагога: Сборник научных трудов. В 2 ч. Ч.2 - Саратов: Саратовский источник, 2020. - С. 169-173.
3. Игнатъев А.А., Куликов М.Н., Данке О.Г. // Гетеромагнитная микроэлектроника. - 2012. - Вып. 13. - С. 108-117.
4. Верещагина М.Д., Курбанов Н.Х., Рафиенко В.А., и др. // Горная промышленность. - 2019. - № 5. - С. 94.

КРУГЛЫЙ СТОЛ

**«ЧЕЛОВЕК И СВЕТ В ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ И
ХУДОЖЕСТВЕННОЙ КАРТИНЕ МИРА»**

(модератор Медведев Б. А.)

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

Представлены тезисы докладов участников круглого стола «Человек и свет в естественнонаучной и художественной картине мира» секции «История, методология и философия оптического образования» XXIV международной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике для молодых ученых и студентов, прошедшей в Саратовском национальном исследовательском государственном университете 28 сентября –2 октября 2020 г.

Участники:

профессор кафедры геометрии СГУ, д.ф.-м.н., Розен В. В. ;доцент РАНХиГС, Поволжский ин-т управления им. П.А. Столыпина, к. ф.-м.н., Зайко Ю.Н.; профессор кафедры математики и моделирования СГТУ, д.ф.-м.н., Паршков О. М.; доцент кафедры общей физики СГУ, к. ф.-м.н., Медведев Б. А.; профессор кафедры физики полупроводников СГУ, д.ф.-м.н., Роках А. Г.; профессор кафедры морфологии и экологии животных СГУ, д.б.н., Аникин В.В.; профессор кафедры органической химии СГУ, д.х.н., Сорокин В.В.; доцент кафедры дискретной математики и информационных технологий СГУ, к.ф.-м.н., Бродская Ю. А.; профессор кафедры философии СГТУ, д.ф.н., Дуплинская Ю.М.; заведующая кафедрой общей физики Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе, к.т.н., доцент, Романченко Л. А.; доцент кафедры философии СГТУ, к.ф.н., Довгаленко Н. В.; доцент кафедры геометрии СГУ, к.ф.-м.н., Шимельфениг О.В.

ГРАВИТАЦИЯ: СИЛА ИЛИ ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА?

В.В. Розен

Гравитация играет крайне важную роль в структуре и эволюции Вселенной. Именно гравитационные взаимодействия определяют ключевые условия равновесия и устойчивости космических систем. Гравитация устанавливает связь между плотностью Вселенной и скоростью её расширения, а гравитационное сжатие является основным источником энергии на поздних стадиях эволюции звёзд.

В рамках классической механики гравитация описывается законом всемирного тяготения Ньютона. Согласно концепции Ньютона гравитация рассматривается как сила, с которой любые две массы «притягиваются» друг к другу, причем тела действуют друг на друга без материальных посредников, через пустоту и на любом расстоянии. Такое взаимодействие осуществляется с бесконечно большой скоростью, то есть мгновенно (принцип дальнего действия).

Наиболее простой задачей небесной механики является гравитационное взаимодействие двух точечных (или сферических) тел в пустом пространстве. Эта задача в рамках классической механики имеет аналитическое решение, которое часто формулируется в виде трёх законов

Кеплера. При увеличении числа взаимодействующих тел задача резко усложняется. Так, уже знаменитая задача трех тел не имеет аналитического решения. При численном решении задачи трех (или более) тел достаточно быстро наступает неустойчивость решений относительно начальных условий. В применении к Солнечной системе эта неустойчивость не позволяет предсказать точно движение планет во временных масштабах, превышающих 100 миллионов лет.

Ньютоновский закон всемирного тяготения дает лишь приближенное описание гравитации, которое может быть использовано при малых по сравнению со скоростью света скоростях и слабых гравитационных взаимодействиях.

В общем случае гравитация описывается с помощью общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна. В рамках ОТО гравитация рассматривается не как силовое взаимодействие, а как проявление искривления пространства-времени. Это искривление вызвано неравномерным распределением и движением масс во Вселенной. Таким образом, в ОТО гравитация интерпретируется как геометрический эффект, в результате которого нарушается евклидовость физического пространства. Математически искривленное пространство-время рассматривается в рамках римановой (точнее – псевдоримановой) геометрии. При этом в ОТО гравитационное поле отождествляется с полем метрического тензора, а напряженность гравитационного поля – с аффинной связностью искривленного пространства-времени. Стандартной задачей ОТО является определение компонент метрического тензора в рассматриваемой системе четырехмерных координат по известному распределению источников энергии-импульса, что задает метрику пространства-времени. В свою очередь, знание метрики позволяет рассчитывать в данной системе координат движение пробных частиц в поле тяготения.

Подводя некоторый итог сказанному выше, можно отметить, что в методологическом плане современная физика идет по пути, намеченному еще в XVII веке Галилеем. В примерной формулировке этот тезис может быть представлен в следующем виде. *Вместо ответа на вопрос «Почему происходит некоторое явление» наука должна ответить на вопрос – как оно происходит». А ответ на этот вопрос обычно дается на математическом языке.*

RIEMANN HYPOTHESIS FROM THE PHYSICIST POINT OF VIEW

Y. Zayko

The question of the validity of the proof of any hypothesis, and even more so the one such as RH, always causes numerous discussions. Moreover, the present time is rich in publications devoted to this issue. To verify this, one can visit the website of the Cornell University electronic library ArXiv.org. However, there are no discussions on this topic. The only exception is the report of M. Atiyah . John

Derbyshire tried to highlight the reasons for this decline in interest in the subject under discussion in his book [1]. He's writing:

“There are breakthroughs followed by outbursts of enthusiasm, and there are stalemates followed by spells of apathy. My impression of the current (mid-2002) state of affairs— though, to be sure, it is only the impression of a noncombatant—is that researchers are stalemated. We are in a lull. The great burst of interest generated by Deligne’s proof of the Weil Conjectures in 1973 and by the Montgomery-Odlyzko developments of 1972–1987 seems to me to have spent itself.... Sir Michael Berry, who has a way with words, has coined the concept of the “clariton,” which he defines to be “the elementary particle of sudden understanding.” In the realm of the RH, claritons are currently in short supply.”

This was written in the year the book was published [1] - 2003. What happened in the following years did not at all contribute to a revival of interest in RH. Here is an excerpt from a letter from M. Berry dated September 5, 2019, to the author about the work [2]:

“The Riemann hypothesis is mathematics, so it cannot be proved using physics. Your relativistic analysis is an unusual formalism, and people are probably unwilling to make the effort to follow your arguments. But any formalism can be transformed into any other, so it would help readers if you translate your arguments into a more conventional mathematical language”.

A reason for the successful proof of RH in [2] was its connection with overcoming the Turing barrier in calculating the roots of the Riemann zeta function due to relativistic effects. The term “relativistic computer” (RC) first appeared in the work of I. Nemeti (with co-authors) in 1987 [3]. It was supposed to use relativistic effects to overcome the limitations imposed on the calculations carried out in the framework of the model of the classical Turing machine (MT) - “Turing barrier”. In particular, it was suggested that the RC can be used to solve the so-called non-computable tasks that cannot be solved on classical MT (requires infinite time). For this, it was proposed to use the achievements of relativistic physics - Kerr-Newman black holes, the space-time metric near which has singularities that ensure the natural adopting of infinity in the number of allowed computation time values. However, since the implementation of such projects to this day remains problematic, they have no practical consequences. In the works of the author the idea of the RC received a practical embodiment in the form of developing an algorithm for calculating the sums of divergent series — a task also related to the problems which are non-computable on MT.

It can be assumed that the failure of previous attempts to prove the Riemann hypothesis, both purely mathematical and involving physical methods, the equivalence of which is indicated by Sir M. Berry is since they were carried out within the framework of the Turing paradigm.

References

1. Derbyshire J. *Prime Obsession: Bernhard Riemann and the Greatest Unsolved Problem in Mathematics*, Joseph Henry Press, Washington, DC, 2003.
2. Zayko Y.N. // *International Journal of Theoretical and Applied Mathematics*. – 2017. – Vol. 3. - № 6. - P. 219-224.
3. Nemeti I., David G. // *Applied Mathematics and Computation*. - 2006. - Vol.178. - P. 118-142.

МЕЖДУ ДВУМЯ МИРАМИ

О.М. Паршков

Макроскопические и микроскопические явления описываются законами классической и квантовой механики соответственно. Так как макроскопические объекты состоят из микроскопических, большинство исследователей считает, что классическая механика является предельным случаем квантовой. Одним из важных направлений в поиске связи между классической и квантовой механикой является создание условий, при которых макроскопические объекты могли бы находиться в чистых квантовых состояниях и демонстрировать специфические квантовые свойства. Отметим, что обычно макроскопические тела находятся в смешанных квантовых состояниях, в которых эти свойства не проявляются.

Следует иметь в виду, что для наблюдения макроскопического квантового поведения следует выделить в изучаемой системе макроскопический параметр, эволюция которого подчиняется квантовым законам. Например, это может быть центр тяжести системы или сила тока в проводнике, или что-то ещё. Выбор следует осуществить таким образом, чтобы выполнялись следующие условия [1]: эволюция макроскопического параметра не должна зависеть от микроскопических степеней свободы, температура должна быть достаточно низкой, возбужденное квантовое состояние макроскопического параметра должно обладать малой энергией. Выполнение всех этих условий вызывает значительные экспериментальные трудности.

Первые удачные попытки наблюдения квантового поведения макроскопических систем связаны с наблюдением квантового туннелирования в Сверхпроводящих Квантовых Интерференционных Устройствах, именуемых в литературе СКВИДа́ми. СКВИД – это кольцо из сверхпроводящего металла, разорванное барьером из изолятора. При низких температурах в СКВИДе возникает явление сверхпроводимости. Сверхпроводящее состояние является чистым квантовым состоянием и описывается единой волновой функцией, зависящей от одной переменной – разности её фаз на краях непроводящего барьера. Зависимость потенциальной энергии СКВИДа от разности фаз имеет локальный минимум, отделённый от области, где потенциальная энергия равна нулю, потенциальным барьером. Согласно законам классической механики разность фаз должна оставаться всё время в районе локального минимума. При этом для протекания тока по кольцу СКВИДа требуется приложить некоторое напряжение. Однако, в эксперименте наблюдался эффект Джозефсона, – ток внутри СКВИДа протекал даже без приложения напряжения от внешнего источника. Это возможно только в том случае, если значение разности фаз преодолело потенциальный барьер и вышло в область нулевой потенциальной энергии.

Рассмотренный эффект является эффектом квантового туннелирования, реализуемым в макроскопическом объекте. В простейшей интерпретации суть квантового туннелирования заключается в возможности того, что частица, находящаяся в потенциальной яме, проникнет через потенциальный барьер в соседнюю область. В случае СКВИДа вместо координаты центра масс частицы рассматривается разность фаз волновой функции, а область, в которую разность фаз туннелирует, соответствует области возникновения эффекта Джозефсона.

Литература

1. Гринштейн Дж., Зайонц А. Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой теории. Изд. Дом "Интеллект", Долгопрудный, 2008.

К 95-ЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ СПИНА ЭЛЕКТРОНА. ИСТОРИЧЕСКИЙ И ФИЛОСОФСКИЙ АСПЕКТ

Б.А. Медведев

Доклад посвящен 95-летию открытия спина электрона С. Гаудсмитом и Дж. Уленбеком. История открытия, которому предшествовала идея А. Комптона о наличии углового момента у электрона, сопровождалась столкновением различных точек зрения, постановкой вопросов приоритета и острой полемикой в том числе В. Паули, и Р. Кронига, П. Эренфеста и Х. Лоренца, В. Гейзенберга и Н. Бора [1,2,3]. Но неоспоримыми доводами принятия спина электрона были интерпретация опыта О. Штерна и В. Герлаха, объяснение дуплетов спектральных линий щелочных металлов и эффекта П. Зеемана. В историческом аспекте, в 1925 году Паули формулирует принцип запрета, Ральф Крониг за несколько месяцев до Уленбека и Гаудсмита делится с Паули своей работой о введении в физику понятия углового момента электрона. Паули беспощадно высмеивает идею Р. Кронига, после чего Крониг отказывается от публикации. В это же время Эренфест предлагает Уленбеку поработать вместе с Гаудсмитом над атомными спектрами. Из воспоминаний Уленбека от доклада Паули о принципе запрета... «Я был впечатлен, но поскольку все было исключительно формально, мне это казалось абракадаброй. Не было ни одного образа, который связывал бы, по крайней мере, качественно, формализм Паули со старой атомной моделью». Уленбек и Гаудсмит рассказывают о своей идее спина Эренфесту, последний просит совета у Лоренца, и тот, используя классическую теорию электрона, показывает, что представление о вращательном движении электрона ведет к глубокому противоречию. Уленбек и Гаудсмит окончательно решают не публиковать работу и сообщают об этом Эренфесту. Много лет спустя Уленбек и Гаудсмит вспоминали об ответе профессора: «Я уже отправил вашу работу в печать несколько дней назад, и она выйдет в журнале на следующей неделе. Вы ещё молоды и можете позволить себе некоторые глупости». Работа Гаудсмита и Уленбека вышла в журнале *Naturwissenschaften* («Естественные науки») 20 ноября 1925 года. Всего на одной странице излагалась идея углового момента электрона, связанного с четвертым

квантовым числом, введенным Паули, классическим образом которого была заряженная сфера, вращавшаяся вокруг собственной оси. Только в 1926 Паули приходит к пониманию, что его оценка работы Кронига была некорректной. Нобелевская премия никому не присваивается. А идея спина, в дальнейшем, получает свое блестящее воплощение в открытии спина протона и нейтрона, создании статистик Ферми - Дирака и Бозе - Эйнштейна... *Философский аспект открытия*. Пол Фейерабенд: *«Не существует идеи, сколь бы устаревшей и абсурдной она ни была, которая не способна улучшить наше познание»*. В этом контексте интересен переход к фрагменту из Физики Аристотеля: «природе свойственно сходное поведение во всех случаях» и далее «...живое существо, как мы говорим, само себя движет. <...> Если же это возможно для живого существа, почему это не может происходить и со всей вселенной? Ведь, если это имеет место в маленьком космосе, значит и в большом...» В докладе, следуя эвристической функции философии, дискутируется вопрос: Не могло ли принятие дедуктивных рассуждений к положению Аристотеля о самодвижении вселенной вместе с «Искусством делать открытия» по Лейбницу, а также использованием категории самодвижения Гегеля, способствовать более ранним срокам открытия спина электрона, непосредственно, вслед за созданием планетарной модели атома Резерфорда (1911) и атома Бора в 1913 году?!

Литература

1. Carretero Juan Antonio Caballero. Танец электронов. Паули. Спин. Наука. Величайшие теории: выпуск 48. Пер. с итал. М.: Де Агостини, 2015.
2. Гаудсмит С. // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 93. - Вып.1. - С.151-158.
3. Беркович Е. // Наука и жизнь. – 2018. - №10. - С.48-55.

АНОМАЛЬНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАК ШИРОКО ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ, НО МАЛОИЗВЕСТНЫЙ ФЕНОМЕН

Роках А.Г.

Тонкопленочные транзисторы (ТПТ), разработка которых началась в конце 50-х – начале 60-х гг. прошлого столетия на основе сульфида и селенида кадмия, в отличие от монокристаллических транзисторов, работали на канале, обогащенном основными носителями заряда (электронами). Нами было предположено, что это связано с особенностями экранирования электрического поля в широкозонных полупроводниках. Эта особенность теоретически исследовалась на контакте слабо и сильно легированных полупроводников n- типа проводимости, на котором был получен «необычный» результат: электрическое поле глубже проникало в более легированный полупроводник. В настоящее время ТПТ в качестве нелинейного элемента встроены в каждый пиксель дисплеев компьютеров, телевизоров, ноутбуков, мобильных телефонов. Несмотря на широкое использование, причина такого поведения остается

малоизвестной. Здесь на основе ранее проведенных расчетов предлагается простое качественное объяснение этого явления. Современные дисплеи требуют матричной организации. В свою очередь, матрица нуждается в доступе к каждому своему элементу. Это требует наличия нелинейного элемента (или элементов) в каждом пикселе, который позволит избавиться от влияния всех остальных пикселей матрицы. С этой целью используются полевые транзисторы, в частности тонкопленочные, коих в каждом пикселе может быть несколько.

Особенностью ТПТ является высокое сопротивление, поскольку они обычно согласуются с жидкокристаллическими фильтрами общей подсветки экрана. А для высокоомных (широкозонных) полупроводников глубина проникновения электрического поля в определенном диапазоне концентраций может быть аномальной, т.е. растущей с ростом концентрации свободных носителей. Рассматривая зависимость глубины ослабления электрического поля в e раз в квазиоднополярном полупроводнике, содержащем только доноры, С.М. Рывкин заметил, что при наличии компенсирующей примеси эта зависимость от концентрации свободных носителей может выходить «на полку». Это означает, что глубина проникновения поля перестает зависеть от концентрации свободных носителей, равной в данном случае концентрации ионизированных доноров. [1,2] Моделирование нами подобной ситуации с использованием рекомбинационной модели Роуза для контакта двух однополярных полупроводников n -типа с разной степенью легирования показало, что глубина проникновения электрического поля в более легированный полупроводник может быть больше, чем в менее легированный [1]. В свое время это удивило главного редактора журнала «Физика и техника полупроводников» С.М. Рывкина, и он вызвал авторов статьи на экспертное совещание. Убедившись, что это возможно, он тут же отдал распоряжение опубликовать нашу статью. Характерно, что ранее поданную статью, одним из авторов которой был А.Я. Шик, и которая содержала примерно те же выводы относительно экранирования, он депонировал. Впоследствии на эту статью мы ссылались, т.к. ранее она не была нам известна и получена, исходя из другой модели. На пальцах этот феномен объясняется тем, что в широкозонных полупроводниках «глубокие» центры принимают участие в экранировании электрического поля, неся положительный заряд, благодаря чему поле не проникает глубоко. Свободные электроны, уменьшая количество положительно заряженных глубоких центров, увеличивают глубину проникновения электрического поля в полупроводник и возможность полевого управления проводимостью канала ТПТ. В этом и состоит модель аномального экранирования и некоторые ее проявления.

Литература

1. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: ГИФМЛ. 1963. С. 313, 319-321.
2. Баранов Л.И., Гаманюк В.Б., Роках А.Г. и др. // ФТП. - 1976. - Т. 10. - Вып. 10. - С. 1053-1955.

THE WAVE PROCESS OF DISTRIBUTION OF INVASIVE INSECT SPECIES IN
THE VOLGA REGION IN THE XXI CENTURY

V. V. Anikin

A large group of insects, pests and potential pests in natural biotopes, parks and urban plantations of the Volga region are leaf-eating Lepidoptera, Coleoptera, Diptera, including mining and weaving insects. Invasion species of gracillariid moths (Lepidoptera: Gracillariidae) in the XXI century became the most important pests of urban plantations, that leads to impairment of plantings and reduces their aesthetic appearance. Often dendrophagous are the vector of spread for dendro-pathogenic organisms with subsequent death of the plants. A serious danger for native plants species is the insects, which invaded on the European part of the relatively recent and which are quickly expanding its range. Of these species, on the territory of the Volga-Ural Region is well known Lime leaf miner and Poplar moth. On the Upper Volga begins its spread the Horse-chestnut leaf miner.

In recent decades have been noted the penetration and reproduction of several invasive and adventive species in Russia and in the Volga region (horse-chestnut leaf miner – *Cameraria ohridella*, lime leaf miner – *Phyllonorycter issikii*, Poplar moth – *Phyllonorycter populifoliella*, potato tuber moth – *Phthorimaea operculella*, buckthorn hawk moth – *Hyles hippophaes*, mulberry moth – *Hyphantria cunea*, emerald ash borer – *Agrilus planipennis*, harlequin ladybird – *Harmonia axyridis*, elm zigzag sawfly – *Aproceros leucopoda*, California scale – *Diaspidiotus perniciosus* and some other.

Invasion species of these group of insects in recent decades became the most important pests of urban plantations, that leads to impairment of plantings and reduces their aesthetic appearance. Processes of front settlement distribution of the territory by populations of these species are observed in many areas of Russia. The first record in the region was made by V. B. Anikin in 2018 in Saratov near the Polytechnic University, which is probably the primary district of the species distribution in the Saratov Province [1]. The spread of the species from this center (Sartov) to other cities of the region – Engels, Balakovo, Volsk, Khvalynsk, Atkarsk, Krasnoarmeysk in 2019-2020 has the form of a directed wave. Such distribution has a wave character and has the form of a continuous wave. The nature of the spreading population wave of invasive species has a number of negative consequences. These include the processes of introduction of "alien" species and their "embedding" in the food chain and competitive relations existing in entomocomplexes on the community.

The examination of the spatio-temporal behavior of population wave dynamics systems shows that the development of the system, which includes increasing in the population size and its spread in space have complex and multi-stage pattern. With its speed of distribution, this species (50-100 km per year) can very quickly reach the cities of the Middle Volga – Kazan and Nizhny Novgorod where will meet with a descending wave of the type coming from Upper Volga (Yaroslavl). The meeting of two waves in the biological realization for this species will be ended the complete conquest of the town landscapes with

the introduced culture – horse chestnut in all Volga Region. It is necessary to monitor the state of the population of this species by the appropriate Supervisory and quarantine services of Volga cities. Otherwise, there will be massive damage of chestnuts as in Western Europe at the beginning of the 21st century (early fall of their foliage, it loses its decorative effect, turns yellow and dries up by the end of June). Then, many departments and city councils of various countries decided to completely replace horse chestnuts in urban plantings, which required huge financial investments. The city authorities of the Volga cities do not have such financial opportunities, and they should take the necessary measures now to avoid more financial losses in the future.

References

1. Anikin V.V. // Zootaxa. - 2019. - Vol. 4624(4). - P. 583–588.

ОПТИКА, ХИМИЯ, ФИЛОСОФИЯ

(Предпосылки и история фотографии от Аристотеля до наших дней)

В.В. Сорокин

Фотография: наука и искусство, технология и философия. Развитие фотографии чётко следовало за успехами науки и промышленности, но зачастую зависело от, казалось бы, неожиданных факторов. Мао-Цзы и Аристотель описали правнучку современных фотоаппаратов – камеру обскуру. С середины второго тысячелетия она активно служила науке и искусству, резко улучшив качество живописи в эпоху Ренессанса. Однако настоящая фотография начала зарождаться лишь с развитием химии. Свойство ляписа темнеть на свету было описано ещё в VIII веке (Джабир Ибн Хайян), а светочувствительность солей железа наблюдал в начале XVIII века А. Бестужев-Рюмин при изобретении своих знаменитых лечебных капель. В дальнейшем соли серебра явились основой чёрно-белой фотографии, а соли железа – цианотипии. Первоначальные трудности с закреплением серебряного изображения заставила Ньепса выбрать в качестве светочувствительного материала асфальтовую смолу, способную полимеризоваться на солнечном свете. Первая такая фотография на цинковой пластине была получена при экспозиции 8 часов (1826 г.). Л. Дагер изучил наработки Ньепса и вернулся к галогенидам серебра, предложив в качестве проявителя скрытого изображения пары ртути, тем самым создав в сороковые годы XVIII века индустрию дагеротипов. Открытие брома и йода позволило увеличить чувствительность галогенидов серебра и резко сократить экспозицию. В калотипии или тальботипии (1835 г.) впервые применена печать с прозрачных негативов (бумага, пропитанная воском). Мокрый (1851 г.) и сухой (1871 г.) коллоидные процессы явились прообразом современных эмульсионных материалов. Дальнейшее бурное развитие фотографии обязано чугуночной промышленности, давшей толчок коксохимическому производству с его многообразной продукцией ароматических соединений, а также изобретению способа связывания атмосферного

азота. До начала XX века была весьма распространена платиновая печать с потрясающим динамическим диапазоном и сроком хранения фотографии 1000 лет. Открытие в начале XX века каталитических свойств платины в реакции окисления аммиака до азотной кислоты «похоронило» платиновую фотографию, поскольку увеличило стоимость этого металла в десятки раз. С другой стороны, дешёвая азотная кислота стала основой для широкого производства ароматических нитросоединений, продукты восстановления которых (ароматические амины) дали путь к разнообразным красителям-сенсбилизаторам для чёрно-белой и цветной фотографии.

Первые цветные фотографии были основаны на трёх экспозиционном процессе через 3 светофильтра и использовали метамерию человеческого зрения (Джеймс Максвелл). Прокудин-Горский совершенствовал именно этот принцип, поскольку цветное изображение в виде трёх чёрно-белых негативов хранится очень долго. Особняком стоит метод Липпмана, основанный на интерференции световых волн в чёрно-белой толстой эмульсии, и позволяющий получать физически точное цветное изображение. В дальнейшем этот принцип получил развитие в голографии. Братья Люмьер в начале 20 века и независимо Фенлей предложили автохромный принцип (цветные зёрна крахмала в качестве маски перед чёрно-белым слоем). Автохромные изображения было невозможно тиражировать, однако до сих пор современные художники и фотографы восхищаются особой атмосферой тех фотографий.

Рывок в развитии тонкой органической химии, обусловленный, в частности, появлением квантовой химии и теории резонанса, дал возможность создавать многослойные фотографические материалы и процессы с совершенными свойствами.

В наше время фотография в большинстве своём перешла в цифровую форму, а философские аспекты фотографии переживают глубокое переосмысление, что связано с визуальностью современной культуры и глобальными трансформациями эпохи.

МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ В ПУЛЬМОНОЛОГИИ И ФТИЗИАТРИИ НА ПРИМЕРЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ БРОНХО-ЛЕГОЧНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Бродская Ю.А.

Одним из важнейших и наиболее давно и часто применяемых приложений математической теории распознавания образов (РО), в частности, анализа изображений, является медицинская диагностика [1,2]. В работе обсуждаются подходы к решению проблем, возникающих в этой сфере и предлагается к реализации метод РО для диагностики заболеваний выбранного класса торакальной области - бронхо-легочных заболеваний человека, в частности, такого опасного заболевания, как пневмония. Как известно, пневмония – заболевание, представляющее собой

серьезную угрозу здоровью человека и снижающее впоследствии качество жизни. Пневмония, вне зависимости от возбудителя, является важнейшей причиной смертности, следовательно, задача своевременной диагностики ее является наиболее актуальной. В общем объеме смертей от пневмонии составляет 1,5% (из них на долю ковид-пневмонии приходится 10%). Реализация системы диагностики посредством методов РО может существенно ускорить процесс диагностики бронхо-легочных заболеваний с заданной точностью. Полагается целесообразным подход, заключающийся в реализации и обучении с учителем сверточной нейронной сети, которая может оказать помощь врачам различного профиля (терапевтам, фтизиатрам, лучевой и функциональной диагностики) в вопросе ранней диагностики пневмонии, как бактериальной, так и вирусной (дифференцировать вирусную и бактериальную патологии), а также туберкулеза и онкологических заболеваний органов дыхания. Первичная бактериальная пневмония развивается очень быстро с резким повышением температуры, наблюдается кашель с продукцией мокроты, с прямым повреждением легочной ткани бактериями. Вирусная пневмония развивается в несколько этапов. В большинстве случаев вирус сначала поражает верхние отделы дыхательных путей, затем и нижние отделы респираторного тракта. Если, в дальнейшем, организм не способен побороть вирус и восстановить легочную ткань, возникает явление «аутоагрессии» и значительно повреждается легочная ткань с нарушением процесса обогащения крови кислородом. Одним из основных факторов, влияющих на развитие болезни, являются недавно перенесенные заболевания ОРВИ и гриппа, которые могут повлечь пневмонию в качестве осложнения. Основными методами диагностики пневмонии (в том числе ковидной пневмонии) являются рентгенологическое исследование легких, исследование мокроты, общий и биохимический анализ крови. Дополнительные методы диагностики – это КТ грудной клетки, биопсия плевры и легкого, бронхоскопия и др. Данные для обучения сети были взяты с сайта [kaggl.10. Dataset](https://www.kaggle.com/datasets/rajkrishna101/covid19-xray) содержит 5.863 изображений фронтальных рентгеновских снимков. Данные были разделены на три класса: норма, вирусная и бактериальная пневмония. Точность обучения на тестовых данных составила 82,79%. По результатам можно сделать вывод, что рентгенологическое исследование, как и КТ, не позволяют наверняка различить пневмонии внутри выделенного класса вирусных, то есть вызванных коронавирусом или гриппом – эти признаки ковид-пневмонии неспецифичны; не обнаружено существенной разницы между снимками грудной клетки пациентов с гриппом и ковид-19 (как и врачами исследователями). Однако, исследователями описаны небольшие различия: большинство поражений от covid-19 пневмонии были расположены в периферической зоне и вблизи плевры, а поражения от вируса гриппа пневмонии – диффузные или находятся в случайном распределении и дальше от плевры. Эффузия плевры чаще возникает при гриппозной пневмонии. Эти вопросы, как и учет поражений тканей за пределами легких, коморбидный фон,

требует дальнейшего исследования и уточнения для дифференциальной диагностики вирусных пневмоний.

Литература

1. Бродская Ю.А., Маринушкин Д.Н., Нечаев В.Н. и др. Теоретические предпосылки использования распознавания образов в прогнозировании преждевременного прерывания беременности. / Искусственное прерывание беременности. Сборник научных трудов. Научный центр акушерства, гинекологии и перинатологии РАМН. Саратов. Издательство Саратовского государственного медицинского университета, 2002 – 123 с. С. 33-37.
2. Прохорова А.В., Бродская Ю.А. Распознавание образов в диагностике некоторых классов заболеваний головного мозга. Проблемы оптической физики и биофотоники. SFV-2019: материалы 7-го Международного симпозиума и 23-й Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting-2019 / под ред. Г.В. Симоненко, В.В. Тучина. – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 2020- 106 с: ил.С.88-91.

РАССЛОЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАЛЬНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Ю.М. Дуплинская

Что понимается под расслоением реальности, поясним на простом примере. В нашем восприятии реальность расщепляется, сообразно пяти каналам рецепции: зрение, слух, осязание, обоняние, вкус. Цвет, запах, вкус, плотность - такая дифференциация качеств обусловлена не структурой «самой» реальности, а различием кодирования реальности в органах восприятия. Впрочем, для фундаментальной науки это расслоение не составляет серьезной проблемы, а потому перейдем к более нетривиальному примеру. Расслоение реальности может быть обусловленным структурой языка. Вследствие разных способов кодирования в семиотической системе, один и тот же объект может дублироваться: как *предмет*, *действие данного предмета* и *качества данного предмета*. Но на сколько объективна такая классификация отражает «реальные» границы между «предметами», их «действиями» и их «качествами»? В самом деле, чем отличается «сам» предмет от набора совершаемых им «действий» или «качеств»? Как показали исследования Э.Сепира и Б.Уорфа, наша «естественная» интуиция различий между *предметами* и *действиями*, *вещами* и *событиями* - в основе суть интуиция лингвистическая. Она имеет своим источником классификацию слов на существительные (предметы), глаголы (действия), прилагательные (качества) и т.д. и может варьироваться, в зависимости от языкового криптотипа. Например, в языке индейцев хопи граница между «предметами» и «действиями» проводится иначе, чем в индоевропейской семье языков. События краткой длительности (вспышка, молния) там могут быть только глаголами. А события, продолжающиеся долго (пребывать, упорствовать)- только существительными.

А вот - еще более нетривиальный аспект проблемы. Это - *расслоение реальности во времени*. «Прошлое», «настоящее» и «будущее» в ряде философских направлений (А.Бергсон, Э.Гуссерль, М.Хайдеггер, Ж.Делез) трактуются не как последовательные смещения точки «теперь», а как качественно различные способы кодирования реальности (интенциональности

сознания). Им соответствуют не последовательно сменяющиеся друг друга моменты, а *качественно различные* интендируемые миры, которые *сосуществуют* вместе. Различные способы кодирования мира-во-времени производят расслоение реальности следующим образом. (1) Реальность «вещей» формируется интенциональностью воспоминания (прошлое). *Мир «вещей» - это «запаздывающий мир»: мир, который смещен в прошлое.* (2) Реальность в срезе актуальности настоящего формирует мир событий: действия и взаимодействия. (3) Реальность «сил» (потенций) формируется интенциональностью предвосхищения (будущее). *Мир «сил» - это опережающий мир: мир, который смещен в будущее.* Поясним. С точки зрения нейрофизиологии, восприятие реальности в образах «вещей» возможно лишь в том случае, когда *восприятие запаздывает за актом непосредственного ощущения.* Без отсрочки между актами ощущения и восприятия, реальность может восприниматься не в образах «вещей», а лишь в динамике действий: ударов, касаний и т.д.

Но вот вопрос: имеет ли место в «самой» физической реальности подобная демаркация между «вещами», «событиями» и «силами»? Или только наше сознание, совершая расслоение мира-во-времени, интендирует: *запаздывающий («вещи»), актуальный («события») и опережающий («силы») миры?* В том числе, не являются ли демаркация между фермионами, событиями взаимодействия и бозонами лишь модификацией подобного расслоения реальности по типам кодирования времени в сознании? Во всяком случае, демаркации между вещами и силами; между вещами и событиями их взаимодействия могут варьироваться, в зависимости от временных ритмов субъекта восприятия. Если представить реальность, с точки зрения существ, воспринимающих мир в ином темпоральном режиме, - для них демаркации между «вещами», «событиями» и «силами» будут проводиться иначе.

Результатом данных рассуждений является вывод: *нагромождение сложностей в теоретическом аппарате фундаментальной науки, возможно, обусловлено не сложностью «самой» физической реальности, а расслоением изучаемого объекта в разных системах кодирования информации.* Один и тот же объект, качество, отношение может дублироваться в различных системах кодирования, что создает иллюзию *разных* объектов, качеств, отношений. Многообразие способов кодирования не совпадает с многообразием аспектов «самой» реальности; одно накладывается на другое нетривиальным образом.

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ПОЗНАНИИ ПРИРОДЫ

Б.А. Медведев

Доклад посвящен эволюции метафизических и философских идей неопределенности в познании природы от понятия апейрона Анаксимандра до представлений «Об ученом незнании» Н. Кузанского и далее от описания С. Л. Франком [1] реальности, в которой она «в качестве металогического единства не только трансдефинитна но и трансфинитна» до концепции «новой

рациональности» И. Р. Пригожина [2], «в которой наука более не отождествляется с определенностью, а вероятность с незнанием». Человек познает себя только в пути, и спустя века от детерминизма Лапласа, Декарта и Ньютона с возникновением квантовой механики приходит понимание того, что конструкция законов природы не может быть жёсткой. Детерминация любого явления является искусственной. Наши научные представления не могут вне пространства-времени пребывать в панцирях понятий. Закон, метафорически говоря, не всегда может представляться вершиной пирамиды, сложенной из множества неразличимых плит. Так, не приводит ли познание к великой магии факта? Не подвергаются ли мыслители тирании со стороны своих собственных идей? Не является ли то, что мы считаем очевидным сомнительным и, более того – иррациональным? Следуя за Гераклитом в том, что «Природа любит скрываться» акцентируем: очевидное маскирует потаённое. Возвращаясь на качелях времени к концепции гилозоизма эпох античности и Возрождения, мы полагаем, что природа противится познанию в силу ее тенденции - «инстинкта» к самосохранению. Поэтому можно утверждать, что бытие не только противится завершенности, но и его образам в нашем мышлении. Чем ближе мы в поисках к истине, тем искуснее она маскируется. Быть может и потому «...что, близясь к чаемому страстно, /Наш ум к такой нисходит глубине, /Что память вслед за ним идти не властна». /Данте/. Так, не поэтому ли случай есть проявление сущности. Случай – дитя хаоса, последний же выступает как бесконечный потенциал бытия и неопределенности его познания. Постулируем: *Чем ближе к сущности, тем дальше она от дефиниций*. Принцип неопределенности познания может быть сформулирован и аналитически в виде соотношения неопределенностей между сущностью и существованием, являясь отражением идей и принципов философии У. Оккама, Н. Кузанского, Г. Лейбница, а в физике микромира – концепцией Копенгагенской школы Нильса Бора. Из положения: *минимум сущности – максимум существования* следует принципиальная невозможность познания первопричины. И становится очевидным подход к метафизике. Из сентенции М. Хайдеггера «Метафизика в природе человека» мы выводим: *Следствие первое* - метафизика случайности нашего бытия, как и любого нечто от его возникновения до его уничтожения. *Следствие второе* – метафизика нашего сознания в его диалектической структуре, содержащей в качестве его самоотрицания не только коллективное, но и космическое бессознательное [3]. *Следствие третье* - онтологический статус неопределенности человеческого познания и его космические истоки.

Литература

1. Франк С.Л. Сочинения. – Мн.: Харвест, М.: АСТ, 2000.- 800с.
2. Пригожин И.Р. // Вопросы философии. – 1991. - № 6. - С. 46-52
3. Медведев Б.А. Квантовая парадигма образов микро и макромира в структуре сознания. Навстречу XXIII Всемирному философскому конгрессу: Философия как исследование и образ жизни. Программа и материалы докладов международной конференции, посвященной 45-летию Казанского государственного энергетического университета. 26-27 апреля 2013 г. Казань, С. 103-104.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРЕПОДАВАНИЯ ОПТИКИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ И СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Л.А. Романченко

Геологические направления и специальности представляют собой широкий круг научных областей - от нефтегазового дела и технологии геологической разведки до технологии обработки драгоценных камней и металлов. Среди них есть направления и специальности, для которых изучение разделов оптики имеет особенное значение. Так, например, для программ подготовки бакалавров и магистров по направлениям «Геология», «Технология художественной обработки металлов» и для программ подготовки специалистов по специальности «Прикладная геология» знание оптики необходимо в качестве базы для освоения некоторых дисциплин как на младших, так и на старших курсах. Например, профильные геологические дисциплины, изучаемые на младших курсах (1 и 2 курсы бакалавриата, 1-3 курсы специалитета) «Минералогия», «Кристаллография», «Кристаллофизика», «Петрография», которые в том или ином виде входят практически во все учебные планы указанных направлений и специальностей, предполагают знание оптических методов исследований и владение оптическими приборами для проведения исследований структуры минералов, пород и руд.

Дисциплины, изучаемые на старших курсах бакалавриата, специалитета и в магистратуре - «Технологическая минералогия и геммология», «Специальные методы исследований минералов», «Лабораторные методы изучения минералов, пород и руд», «Диагностика камней», - лишь небольшая часть широкого спектра профильных дисциплин, для которых необходимо знание дисперсии, интерференции, дифракции, поляризации. В рамках изучения данных дисциплин используются специальные методы исследований минералов, пород, металлов:

- эмиссионный спектральный анализ,
- микрорентгеноспектральный (микронзондовый) метод анализа,
- рентгенорадиометрический анализ,
- атомно-абсорбционный спектральный анализ,
- рентгенофлуоресцентный анализ.

Изучение оптики в рамках дисциплины «Физика» на 1 курсе происходит, как правило, во 2 семестре. На оптику традиционно отводится 4-6 часов лекций и столько же практических и/или лабораторных занятий. Чтобы в столь сжатые сроки успеть дать обучающимся необходимые знания и научить основам методов оптических исследований, необходимо концентрировать усилия преподавателя на наиболее важных разделах волновой оптики. Так, совершенно необходимым представляется выполнение лабораторных работ, связанных с дифракцией («Дифракция от щели»), интерференцией («Кольца Ньютона»), поляризацией света («Поляриметр») и решение соответствующих задач на практических занятиях. В рабочих

программах дисциплины «Физика» для указанных направлений и специальностей (бакалавриат и специалитет) данные разделы должны быть обязательно представлены.

ФЕНОМЕН ТЕХНОНАУКИ И ЕГО КУЛЬТУРНАЯ СРЕДА

Н.В. Довгаленко

Технонаука сегодня рассматривается как попытка соединения различных частей реальности с помощью инженерных манипуляций, навязав им устойчивость. Ее основными сферами выступают, прежде всего, нано-структуры, информационно-коммуникативная область, IT-технологии, когнитивный уровень сознания и био-структуры (NBIC). Существо и специфика технонаучных объектов, образующих новый порядок вещей, обладает актуальностью как в философском контексте (их вторжение в дискурсивные практики, конвергентность), так и в культурном (включение их в знаково-символические отношения).

Эра технонауки имеет глубинные связи с культурной стадией модерна, породившей научную рациональность, а также постмодерном, непосредственно предшествующей ей эпохой. Последняя опирается на идеи неопределённости, парадигму хаоса, относительность дискурса, «смерть» субъекта. Новая же культура демонстрирует качание в сторону устойчивости, уход от случайности, ценность конструктивизма, деятельностного подхода. Эти тенденции стали обозначаться новыми терминами: диджимодернизм, метамодернизм, постгуманизм и др. В них получила отражение и новая методология «пересборки» (Б. Латур), которая, в некоторой мере, потеснила деконструктивизм постмодерна.

Термин диджимодернизм активно продвигается в исследованиях А. Кёрби. Для автора он неоднозначно указывает на «digital» («цифровой»), так как этимологически включает и «digits» («пальцы»). Так, смысл современной культуры связывается не только с цифровой математизацией, визуализацией, но и тактильно-инструментальным обоснованием или набором, электронной бесконечностью текста [1, С. 53]. В текст включена предвзятость платформ, структуры, роль модераторов и пр. Когда в тексте меняется способ выражения он становится видеоигрой. Через нее реализуется творчество «новых миров», расширяются дискурсы и нарративы реальности, однако отсутствует стремление к сведению, соизмеримости одного мира с другим. Нормой становится субъективизм, доходящий до болезненности аутизма.

Другой формой описания вторжения технологий в культуру является автомодернизм (Р. Сэмюэлс), основанный на концептах прогрессирующего автоматического механицизма (технология) и автономности самого индивида (социология). Эти тенденции, по мнению автора, и порождают новую субъектность. Ее особенностью является самозамкнутость, размывание «частного» и «публичного» пространства, обесценивание культурных, языковых различий,

понимание творчества как «коллажа», доминирование сетевых связей. Автор подчеркивает маскировку капитала через монополизацию информационного контента. Политика ориентирована на «заботу» о повторении или конструктивистский ресурс социоинженерии. Наука не мыслит себя в отрыве от практицизма манипуляций, пребывая в иллюзии автономности, на самом деле, тоже жестко регулируется «денежными потоками».

Своеобразной попыткой, с одной стороны, включения идей технологического автоматизма, цифровизации, с другой, выхода за их границы к смыслам самой культуры является метамодернизм (Ф. Джеймисон). Он ставит невообразимые цели – сведение ценностей глобализма и человеческой субстанциальности, включение в границы технологии гуманистических идей и пр. Эстетическая синкретика, целостность, философия «колебаний» – таково новое описание реальности, в котором велика роль ожиданий, конструктивных идей постмодерна и культурного оптимизма.

Различные парадигмы культуры пока лишь констатируют переход к новой стадии реальности, делая акцент лишь на некоторых ярких особенностях. Исчерпывающее ее описание, раскрытие философских оснований, видимо еще дело будущего.

Литература

1. Kirby A. How new technologies dismantle the postmodern and reconfigure our culture. – N.Y.; L.: Continuum, 2009. – 282 p.
2. Павлов А.В. // Философские науки. – 2018. - № 10. – С. 97-113.

ТЕМНОТА БЕССОЗНАТЕЛЬНОГО КАК ДВИЖУЩАЯ СИЛА ЖИЗНИ

О.В. Шимельфениг

Вся человеческая культура во многом направлена на увеличение знаний о мире и на повышение осознанности и предсказуемости последствий нашей деятельности, управлению ей. Мы сейчас можем проектировать и создавать колоссальные предприятия по производству: разных необыкновенных материалов с заданными свойствами; машин и сложных систем из них – от нано размеров до кораблей величиной с немалую гору; транспортных средств на земле и под землёй, на воде и под водой, в воздухе и даже в космическом пространстве; управлять некоторыми генетическими программами живых существ; обмениваться гигантской информацией на огромных расстояниях и т.д. Так, уже сейчас можно построить город за полярным кругом под куполом с субтропическим климатом и плодами, с автономной атомной энергетической установкой. Казалось бы, дело идёт к тому, что мы будем становиться хозяевами всё большего объёма окружающего нас пространства.

Но скорейшему осуществлению этой идиллии мешают, по крайней мере, два фактора: случайные события в природе и проявления бессознательного в нас самих, приводящие к

спонтанным действиям, влекущим неожиданные последствия, которые могут быть как позитивными, так и трагическими, причём не только для их авторов, но даже для всего человечества, например, открытие атомной энергии и генетического кода можно использовать и на благо, и на гибель. Таким образом, последствия реализации наших сценариев, опирающихся на наши же технологии, вполне сравнимы по масштабам и силе с природными факторами. Но где возникают любые, в том числе, и самые грандиозные разрушительные замыслы? – В нашей психике, работающей во многом автоматически, без контроля сознания. Значит, ответственное осознанное управление ею может избавить нас, хотя бы, от рукотворных катастроф. Возможно ли это, и нужно ли, – вот в чём вопрос!

Многие сказки начинаются с нарушения какого-либо запрета [1], а многие действия в реальной жизни множества существ от животных до людей совершаются автоматически в результате срабатывания готовых программ или сценариев, без контроля сознания [2, С.333], что приводит часто к неожиданным и конфликтным ситуациям, которые являются началом новых драматических сюжетов жизни.

Проблема в том, что абсолютно рациональное, ориентированное на достижение определённых целей поведение превращает человека в интеллектуальную машину, которая, кстати, может генерировать и случайные ходы. Тем более, именно спонтанное, но одновременно ответственное, творчество сценариев во всех сферах жизни поднимает человека над автоматом [3].

Таким образом, тёмные глубины бессознательного, находящиеся, в конечном счёте, под контролем сознания, всегда будут необходимы для всестороннего развития общества.

Литература

1. Пропп В. Я. Фольклор и действительность (Избранные статьи). - М.: Наука, 1976, 325 с.
2. Харари Ю.Н. HomoDeus. Краткая история будущего. – М.: Синдбад, 2019.
3. Шимельфениг О.В. Живая Вселенная. Сюжетно-игровая картина мира. XXI век: «САМОЗАВЕТ» или «САМОАПОКАЛИПСИС». Саратов: Научная книга, 2005. – 688с.

Материалы конференции ТОМТИ'20

(Towards Optical and Multimodality Translational Imaging)

29 сентября- 1 октября 2020 года

Саратов-Москва

При поддержке Министерства науки и образования

(грант №14.W03.31.0023)

2020



PROCEEDINGS of TOMTI'20

(Towards Optical and Multimodality Translational Imaging)

September 29-October 1 2020

Saratov- Moscow

Supported by the Government of the Russian Federation

(Grant №14.W03.31.0023)

2020

Lentiviral Tet-On system for inducible expression of the fluorescent chimeras of dCas9 orthologs and its application.

Gerel Abushinova^{1,2}, Lilia Maloshenok^{1,2}, Victoria Zherdeva², Sergey Bruskin¹, Alexander Savitsky² и Alexei Bogdanov, Jr.²

¹*Vavilov Institute of General Genetics RAS, Laboratory of functional genomics, Russia*

²*FBRC RAS, Laboratory of Molecular Imaging, Russia*

gerelabushinova@yandex.ru

ABSTRACT

The aim of this study was to achieve inducible expression of genetically encoded chimeric sensor molecules based on catalytically inactive mutants of the Cas9 endonuclease family (dCas9) and fluorescent proteins (FP, including EGFP, mCherry as well as a photo switchable protein SAASOTI). Inducible expression of chimeric proteins is important for performing *in vitro* and *in vivo* studies of spatial organization of the genome under the conditions of reduced toxicity due to protein overexpression. It is critically important to prevent the accumulation of chimeric expression products in the cells at high concentrations, which may lead to cytotoxicity and phototoxicity. A lentiviral vector of the 3rd generation (FU-tet-o-hOct4) was chosen for obtaining constructs with regulated expression of the target construct upon the addition of doxycycline and rtTA (Tet-On system). The length of selected dCas9 ortholog sequences was limited to 4 KB due to lentiviral cassette capacity. We selected two nuclear localization sequences (NLS) - fused dCas9 orthologs from *Streptococcus pyogenes* (Sp) and *Neisseria meningitidis* (Nm). The ratio of dCas9: fluorescent protein (FP) was chosen as 1:1 for directing the obtained dCas9-FPs to nuclear DNA loci by NLS targeting and to achieve the assembly of DNA-bound and closely spaced pairs of fluorophores that may potentially engage in Förster resonance energy transfer (FRET). EGFP and mCherry were selected as FP capable of a FRET pair formation. Results: 1) a FU-tet-o-linker constructs carrying a polylinker with unique restriction sites for dCas9 and FP orthologs were made in various combinations; 2) constructs FU-Tet-o-spdCas9-EGFP and FU-Tet-o-nmdCas9-mCherry were engineered in order to achieve doxycycline-inducible in which dCas9-FP expression; 3) telomere-specific sequences were selected by using two dCas9 ortholog-specific PAMs; 4) genetically engineered constructs for guide RNA expression (pLH-spsgRNA-T, pLH-nmsgRNA-T) for telomere targeting were obtained. The obtained transfer vectors were used to assemble lentiviral particles. The resultant lentiviral particles were used to transduce HEK293T and A549 cells. The transduction efficiency in the case of NmdCas9-mCherry expression was 70%, and for the construct encoding SpdCas9-EGFP the expression was observed in approximately 50% of cells. Stable cell lines were obtained by using puromycin selection. Fluorescence microscopy of HEK293 and A549 cells was performed at 48 h after induction of expression of spdCas9-

EGFP and NmdCas9-mCherry protein chimeras by doxycycline (1 μ g/ml). The obtained samples were sorted on a cell sorter (Aria SORP, Beckton Dickinson) using a laser with a wavelength of 488 nm and 561 nm to select EGFP-positive and Cherry-positive cells correspondently; the results were processed using the BD software. The expression of dCas9-FP pair was observed with predominant localization of fluorescence in the nuclei in FACS-sorted A549 cells. In FACS-sorted (Division of Cell Biology and Histology, Biology Department, Moscow State University) A549 cells the expression of dCas9-FP pair was observed with predominant localization of fluorescence in the nuclei. Cells expressing Sp dCas9-EGFP provided homogeneous phenotype (i.e. morphology, localization of the construct with fluorescent protein, division rate). Cell lines expressing Nm dCas9-mCherry ortholog chimeric protein showed varying degrees of fluorescence in the nucleus as well as in the cytoplasm. The expression of dCas9-EGFP in human cells was then tested in the presence and the absence of the doxycycline. A complete absence of fluorescence was noted before the induction, and the development of fluorescence 24 hours after induction. There was a clear tendency of a decrease of nuclear transport of fluorescent chimeras over time, and with the accumulation of fluorescent products in the cytoplasm in the case of NmdCas9-mCherry. This suggests the need of improving nuclear transport of FP targeting to the nucleus further by using dCas9 optimization. There was a stable increase of fluorescent chimeric proteins in the nuclei over time in the case of SpdCas9-EGFP.

Conclusions: 1) Tet-On system for inducible expression of dCas9 was constructed and successfully tested by using lentiviral transduction of human cell lines; 2) the efficacy of nuclear transport as well as the cytoplasmic retention was found to be ortholog and NLS-dependent.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Government of the Russian Federation (grant no 14.W03.31.0023). We acknowledged the Faculty of Biology, Moscow State University for the provision of Aria SORP sorter (Beckton Dickinson) and research fellow of Department of cell biology and histology, certified sorter operator Daria Potahnikova for the cell sorting support.

Optical clearing of mouse skin samples using MR and X-ray agents

Nikita S. Chikalkin¹, Daria K. Tuchina,^{1,2} Olga A. Sindeeva,¹ Alexander P. Savitsky,³
Alexei A. Bogdanov, Jr.^{3,4} Valery V. Tuchin^{1,2,5}

¹*Saratov State University, Saratov, Russia;*

²*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia;*

³*Federal Research Center of Biotechnology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

⁴*University of Massachusetts Medical School, Worcester, MA, USA;*

⁵*Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia*

BACKGROUND/OBJECTIVE

One of the goals of biomedical optics is the development of methods for probing biological tissues with visible and near infrared (NIR) radiation, which enables visualization of their fine structure. The interest in developing these methods stems from the potential of optical imaging in developing safe and multiparametric diagnostics of biological tissues. Currently, the transparency window in the wavelength range from 650 to 1200 nm is used for optical sensing of biological tissues.

The penetration of light into the tissue at greater depths allows to obtain valuable information about the structure, physiological state and tissue pathology. Due to multiple scattering and absorption of light by tissue components/inclusions the light beam expands and weakens as it travels through the tissue thereby complicating gathering of such information. However, light scattering in biological tissues can be significantly reduced by using optical clearing agents (OCAs).

In this work, we investigated the possibility of using MRI and X-ray contrast agents: Gadovist, Magnevist, Dotarem and Visipaque, as OCAs. The use of these contrast agents may potentially facilitate multimodality imaging, i.e. bi- or tri-modal imaging including optical, MRI and CT simultaneously or sequentially.

Mouse skin samples were used as model biological tissue. The experimental study included measuring the collimated transmission of light at different wavelengths through the samples using a USB4000-Vis-NIR spectrometer (Ocean Optics, USA). OCA application was compared to 0.9% NaCl as control.

Based on the results of light transmission measurements the following conclusions were made: significant optical clearing was obtained using MRI and X-ray contrast agents. The application of clinical paramagnetic MR contrast agent Gadovist (gadobutrol) resulted in transmission increase by 5 times in 70 min, and the use of Magnevist (GdDTPAdimeglumine) resulted in the same level of optical clearing but required longer applications (180 min).

Dotarem and Magnevist during the course of their action on skin samples led to tissue swelling and showed the greatest weight gain in comparison to other agents. The weight of the samples immersed in Dotarem and Magnevist increased by 31% and 33%, respectively. Visipaque and Gadovist did not result in any significant swelling (measured as the increase of skin sample mass). In conclusion, our experiments show that concentrated paramagnetic and iodine-containing contrast agents available for clinical use are efficient as OCA of model tissue and may be useful for multimodality imaging that combines optical with magnetic resonance or CT imaging.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Government of the Russian Federation (grant no 14.W03.31.0023 to support scientific research projects implemented under the supervision of leading scientists at Russian institutions and Russian institutions of higher education).

Tyler Iorizzo,¹ Ilya Yaroslavsky² and Anna Yaroslavsky¹

¹*Advanced Biophotonics Laboratory, University of Massachusetts Lowell, USA*

²*IPG Medical, MA, USA*

tyler_iorizzo@student.uml.edu

BACKGROUND/OBJECTIVE

Lithotripsy procedures are used to break down stones trapped within a patient's urinary system. Artificial Bego stones are often utilized as phantoms in lithotripsy studies. To ensure accurate dosimetry in laser lithotripsy studies, the optical properties of stone phantoms must be characterized. Thus, the goal of this study was to determine the stone phantom optical properties, and to investigate the changes of the latter due to water.

MATERIALS AND METHODS

Total transmittance, collimated transmittance, and diffuse reflectance measurements of stone samples were made using an integrating sphere spectrophotometry system and a 1940 nm Thulium Fiber Laser. An Inverse Monte Carlo technique was used to determine absorption coefficients, scattering coefficients, and anisotropy factors of samples from the measured transmittance and reflectance data. To analyze the effects of water on stone optical properties, samples were soaked in distilled water and measurements were made again. Measurements were made after samples were soaked for 24 and 72 hours.

RESULTS

Two stone samples were investigated so far. Prior to soaking in water, samples had an absorption coefficient of $1.47 \pm 0.18 \text{ mm}^{-1}$, scattering coefficient of $30.5 \pm 5.93 \text{ mm}^{-1}$, anisotropy factor of 0.85 ± 0.01 , and reduced scattering coefficient of $4.61 \pm 0.66 \text{ mm}^{-1}$. After soaking in distilled water for 24 hours, the absorption coefficient was $1.42 \pm 0.04 \text{ mm}^{-1}$, scattering coefficient was $42.3 \pm 4.63 \text{ mm}^{-1}$, anisotropy factor was 0.92 ± 0.01 , and reduced scattering coefficient was $3.52 \pm 0.14 \text{ mm}^{-1}$. And after 72 hours, soaked stone samples had an average absorption coefficient of $1.56 \pm 0.04 \text{ mm}^{-1}$, scattering coefficient of $53.0 \pm 11.7 \text{ mm}^{-1}$, anisotropy factor of 0.93 ± 0.01 , and reduced scattering coefficient of $3.80 \pm 0.11 \text{ mm}^{-1}$.

FUTURE WORK

Future studies will focus on determining the optical properties of natural stones. Comparing the optical properties of artificial and natural stones will assess the role of stone phantoms for optimizing laser-based lithotripsy procedures.

Investigation of apoptosis in tumor cells using genetically encoded sensors of caspases activity

Alena GAVRINA¹, Marina SHIRMANOVA¹, Varvara DUDENKOVA^{1,2}, Tatiana KOVALEVA¹,
Konstantin LUKYANOV^{1,3}, and Elena ZAGAYNOVA^{1,2}

1Privolzhskiy Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russia

2Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia

3Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry, Moscow, Russia

gavrina.alena@mail.ru

ABSTRACT

A complex cascade of molecular events occurs in apoptotic cells. Cisplatin was established to primarily induces cell death of cancer cells by apoptosis. The defect in apoptotic signaling could confer cisplatin resistance. It becomes increasingly clear that along with formation of platinum–DNA adducts, that inhibit replication and transcription and induce cell death, cisplatin activates other cellular responses. It is supposed that a contribution of targets other than DNA is an important factor in the molecular mechanisms of unresponsiveness of cancer cells to cisplatin and other platinum-based drugs. Early mechanisms of apoptosis accompanied by caspases activation is poorly understood. Study of these events can provide valuable data on molecular mechanisms of apoptosis and identification of reasonable target for chemotherapeutic treatment.

The aim of this study was to analyze caspases cascade activation in living cancer cells in vitro during cisplatin treatment using fluorescence lifetime imaging microscopy (FLIM). We performed imaging of apoptosis used genetically encoded FRET-based sensors for caspase-3 activity mKate2-DEVD-iRFP [1] and caspase-8/9/3 activity mScarlet-LEND-DEVD-iRFP670 to during cisplatin treatment in cultured cancer cells.

Activation of caspase-3 in the cells was detected in the same time as the emergence of morphological evidence of apoptosis after 24 h exposure to cisplatin. The mean fluorescence lifetime (τ_m) of a donor protein mKate2 in the cells was 1.61 ± 0.05 ns. Loss of FRET reaction led to significant increase in mKate2 fluorescence lifetime to 2.25 ± 0.09 ns, which indicated the activation of caspase-3 and the initiation of apoptosis [2].

Activation of caspase-8/9/3 in the cells was detected before morphological manifestation of apoptosis (after 0.5 h). The mean fluorescence lifetime (τ_m) of a donor protein mScarlet in the cells was 2.21 ± 0.09 ns and as a result of the loss of FRET reaction significant increase of fluorescence lifetime to

2.70 ± 0.10 ns was observed in those cells in which we subsequently observed morphological signs of apoptosis.

We also imaged endogenous metabolic cofactor NAD(P)H in the same cells using FLIM. Analysis of the ratios of the relative contributions of the free to protein-bound NAD(P)H (a_1/a_2) in the tumor cells showed a significant decrease in the a_1/a_2 ratio starting from 24 h after cisplatin treatment. The observed changes testify to a switch toward an OXPHOS after cisplatin treatment

Therefore, multiparameter fluorescence lifetime imaging enables simultaneous analysis of metabolic activity and caspases activation in cancer cells during apoptosis. Our results indicate that the new sensors can provide valuable data on the early event in cancer cells undergoing apoptosis in response to chemotherapy.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant No20-14-00111)

REFERENCES

1. Zlobovskaya, et al. // BioTechniques. 2016. Vol. 60. p. 62-68.
2. Shirmanova et al. // Proc. of SPIE. 2018. Vol. 10498. p. 1049807-2.

FLIM assessment of cells heterogeneity: machine learning-based approach

Alexey Gayer¹, Elena Nikonova¹, Boris Yakimov¹, Gleb Budylin², Maria Lukina³, Varvara Dudenkova³,
Vladislav Shcheslavskiy³, Marina Shirmanova³, Evgeny Shirshin^{1,2}

¹*Department of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, 1/2 Leninskie gory, Moscow 119991,
Russia*

²*Institute of spectroscopy of the Russian Academy of Sciences, 5 Fizicheskaya str., Moscow 108840, Russia*

³*Institute of Experimental Oncology and Biomedical Technologies, Privolzhskiy Research Medical
University, Minin and Pozharsky Sq., 10/1, 603005 Nizhny Novgorod, Russia*

gaier.av16@physics.msu.ru

ABSTRACT

Fluorescence lifetime imaging (FLIM) technique is extensively used for label-free analysis of cells heterogeneity and cells response to treatment with external agents. The parameters of fluorescence decay curves are used to assess the presence of subpopulations of cells and as indicators of metabolic alterations. For instance, the shift of the average fluorescence lifetime distribution can be used as a marker of cancer cells response to chemotherapy. Two approaches can be used to analyse the FLIM data. The first one requires fitting the fluorescence decay curves pixel by pixel for the whole image and further assessment of distribution of fluorescence decay parameters. The second approach is based on the analysis of distributions of FLIM parameters of single cells. Both approaches are used in the FLIM literature, however, the question of sensitivity of whole image and single cells fluorescence parameters distributions to alteration of metabolic state was not investigated. In this work, we present the first numerical analysis of sensitivity of FLIM parameters, calculated using different algorithms, to changes in the metabolic state of the cells. We first demonstrate when two subpopulations of cells with different parameters can be detected, in other words, when can one observe bimodality in fluorescence lifetime distributions. Secondly, we present experimental results on treatment of cancer cells with chemotherapy agents and demonstrate that different FLIM processing algorithms yield different sensitivity of analysis. Namely, the most important outcome of the present work is that detection of cells subpopulations can not be performed without image segmentation and analysis of fluorescence decay over single cells.

ACKNOWLEDGEMENTS

The studies are supported by the Russian Science Foundation (grant #20-65-46018).

In vitro testing of new Ir(III) complexes as phosphorescent sensors of molecular oxygen for cancer studies

Anastasia KOMAROVA^{2,1}, Maria LUKINA¹, Varvara DUDENKOVA¹, Leonid BOCHKAREV³, Ilya KRITCHENKOV⁴, Sergey TUNIK⁴ and Marina SHIRMANOVA¹

1. Privolzhskiy Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russia

2. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

3. G.A. Razuvaev Institute of Organometallic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

4. Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

komarova.anastasii@gmail.com

ABSTRACT

Analysis of the molecular oxygen content in tissues and cells is of great interest for oncology. Hypoxia is one of the main factors underlying metabolic changes in tumor cells, their aggressive behavior and resistance to therapies. Phosphorescence lifetime imaging (PLIM) is a powerful method to determine oxygen concentration in biological tissues based on measuring the phosphorescence lifetime of oxygen-sensitive dyes. The phosphorescence lifetime decreases with increasing oxygen concentration. Currently, an urgent task is to develop phosphorescent sensors that have a high degree of oxygen-dependent phosphorescence quenching, can effectively accumulate in target cells or tissues and do not have severe toxicity.

The purpose of our study is to investigate the possibility of using new iridium (III) complexes as phosphorescent sensors of molecular oxygen in cancer cells.

Several water-soluble polymers with Ir(III) were tested as phosphorescent oxygen sensors: RP7, RP8, RP9 (IOC RAS) and IR-1 (SPbSU). The phosphorescence of sensors in solutions in the presence of oxygen and in vacuum was evaluated using a two-channel FLIM/PLIM confocal macroscanner (Becker&Hickl, Germany). In vitro studies were performed on CT26 tumor cells (mouse colorectal cancer). The cytotoxicity of iridium complexes was determined by the MTT assay. The ability of sensors to penetrate cells in vitro was studied using a laser scanning microscope LSM 880 (Carl Zeiss, Germany).

It was found that the RP7, RP8, RP9 and IR-1 complexes have a high degree of oxygen-dependent phosphorescence quenching. For example, for the RP7 the phosphorescence lifetime in the presence of 21% oxygen was 1.243 μ s, in vacuum – 2.410 μ s, for the IR-1 it was 1.03 μ s and 4.3 μ s, correspondingly. RP7, RP8, and RP9 did not penetrate into the cells up to 6 hours of incubation, whereas IR-1 accumulated in the cell cytoplasm after 1 hour. None of the dyes showed cytotoxic effects at the concentrations used in cellular experiments.

We conclude that the RP7 and IR-1 complexes have a great potential for using as oxygen sensors in biological applications.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Russian Science Foundation, project 18-73-10021 (IR-1) and the Russian Foundation for Basic Research, project 20-03-00102 A (RP7, RP8, and RP9).

Planar imaging for preliminary assessment of optical clearing effect in tumor bearing mice

Asiya N. Saydasheva, Natalia I. Kazachkina, Victoria V. Zherdeva, Alexander P. Savitsky, Alexei A. Bogdanov

FBRC RAS, Laboratory of Molecular Imaging, Russia

nkazachkina@inbi.ras.ru

BACKGROUND/OBJECTIVE

Optical clearing (OC) allows observation of events occurring in opaque tissues at a depth of some millimeters. The OC effect is based, in particular, on the equalization of the refractive index in various tissues. Recently, we have shown that gadobutrol (Gadovist), a contrast agent for magnetic resonance imaging, is a promising agent for optical clearing of tissues *in vivo* (Tuchina et al. 2020). The aim of this study was to investigate the effect of gadobutrol on the fluorescence intensity of tumors expressing colored proteins.

MATERIALS AND METHODS

The experiments were carried out in nu/nu mice bearing Hep-2 tumor expressing the red color protein TagRFP. Gadobutrol was used in the form of a 1.0 M aqueous solution or a 0.7 M aqueous solution with the addition of 5% dimethyl sulfoxide (DMSO). Gadobutrol was applied to the tumor growth area and kept for 15 minutes then the residue was removed. Tissue fluorescence was studied by *in vivo* planar imaging. Fluorescent images were obtained on an iBox automated system (UVP, USA) before and 15, 30, 60 min after application. Fluorescence was excited with light in the wavelength range of 502-547 nm and registered in the range of 570-640 nm. Image analysis was performed using the ImageJ software. The average fluorescence intensity of the tumor was normalized to the average fluorescence intensity of different skin areas during mathematical processing.

RESULTS

It was shown that the fluorescence of tumors increased by 1.1 - 1.5 times in various animals under the influence of gadobutrol. The increase in intensity was more pronounced when using 0.7 M gadobutrol with the addition DMSO (Fig. 1). This is apparently due to the greater depth of its penetration compared to 1.0 M gadobutrol, which was facilitated by the presence of DMSO. Skin penetration of the OC solution was further independently confirmed by magnetic resonance imaging, capable of detecting the penetration of paramagnetic contrast agents into the subcutaneous space by changing the T1-weighted signal.

Thus, the topical application of gadobutrol as an OC agent makes it possible to enhance the fluorescence yield of subcutaneous tumors expressing fluorescent proteins, and the presence of paramagnetic properties allows parallel detection of the OP agent in tissues to determine the depth of its penetration through the skin of experimental animals.

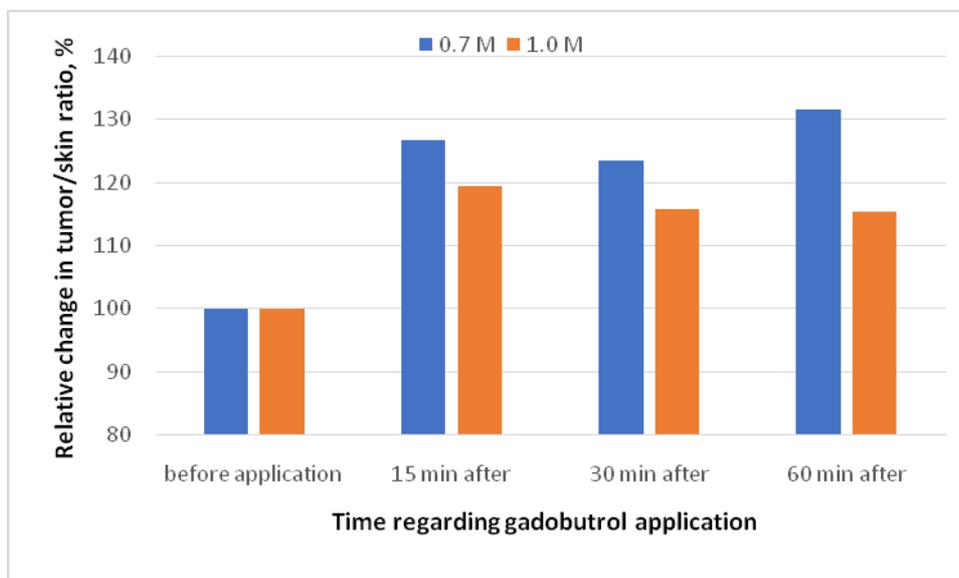


Fig. 1. Changes in the normalized fluorescence of a tumor expressing the color protein TagRFP before and after the application of gadobutrol: the fluorescence intensity of the tumor was normalized to that of the skin area located near the tumor. There were 5 and 4 mice in the groups of animals treated with 0.7 M and 1.0 M gadobutrol, respectively.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Government of the Russian Federation (grant no 14.W03.31.0023).

REFERENCES

Tuchina D. K., Meerovich I. G., Sineeveva O. A. et al. // J Biophotonics. 2020. Vol. 20. No 19. p.60249.

**INSIGHTS INTO METABOLIC ASPECTS OF TUMOR GROWTH WITH FLUORESCENCE
AND PHOSPHORESCENCE TIME-RESOLVED TECHNIQUES**

Marina SHIRMANOVA¹, Maria LUKINA¹, Liubov SHIMOLINA¹, Vladislav SHCHESLAVSKIY¹,
Varvara DUDENKOVA¹, Vladimir ZAGAINOV², Anna ORLOVA³, Ilya KRITCHENKOV⁴, and Elena
ZAGAYNOVA¹

¹*Institute of Experimental Oncology and Biomedical Technologies, Privolzhskiy Research Medical
University, Russia*

²*Volga District Medical Center, Russia*

³*Institute of Applied Physics RAS, Russia*

⁴*Chemistry Department, Saint Petersburg State University, Russia*

shirmanovam@gmail.com

ABSTRACT

Cancer cells and tissues are different in many ways from other cells and tissues in the body. The key features of cancer are abnormal cell growth, invasion and metastasis, *metabolic plasticity with a high contribution of glycolysis to energy production, hypoxia tolerance*, genetic and phenotypic *heterogeneity*.

In our studies, we investigate some biological characteristics of tumors using fluorescence lifetime imaging (FLIM) and phosphorescence lifetime imaging (PLIM). Currently available time-resolved imaging systems enable to visualize fluorescence and phosphorescence from a micro- to a macroscopic scale, which opens the opportunity to explore cancer from cellular to a whole tumor level.

FLIM enables the detection of endogenous fluorescence from the metabolic coenzymes reduced nicotinamide adenine dinucleotide (phosphate) NAD(P)H and oxidized flavin adenine dinucleotide (FAD). FLIM of the autofluorescence has already proved to be a useful approach for quantitative assessments cellular metabolic state. The results of our studies on animal tumor models and patients' tumor samples demonstrate the possibility to detect metabolic differences between tumor and healthy tissue on the basis of NAD(P)H fluorescence lifetime parameters [1,2]. An important feature of patients' tumors was a significant degree of metabolic heterogeneity at the cellular level.

PLIM can be used to assess tissue oxygen by measuring phosphorescence lifetime of oxygen-sensitive synthetic probes. Phosphorescence intensity and lifetime decrease with the increase of O₂ concentration due to quenching of phosphorescence by molecular O₂. Using Ir(III)-based complexes, we observed lower oxygen content in a mouse tumor than in a muscle in vivo [3,4] and decreased oxygen level in a tumor after chemotherapy with topoisomerase I inhibitor irinotecan.

In general, the specifics of tumor metabolism identified by FLIM of NAD(P)H and PLIM with chemical sensors open up novel opportunities for tumor prognosis and monitoring of therapy.

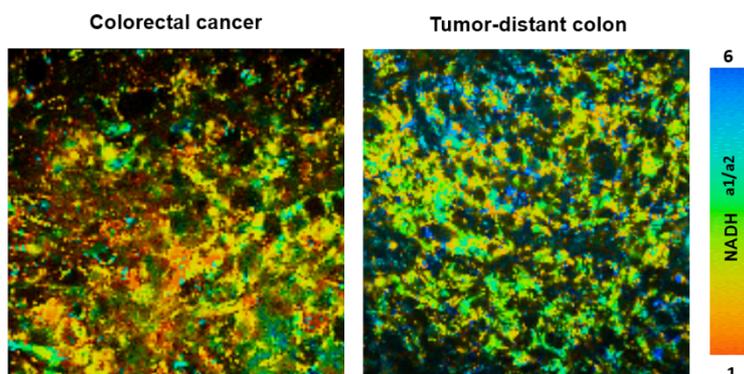


Fig. 1. FLIM-microscopy of NAD(P)H in patients' tissues ex vivo. a_1/a_2 is the ratio of relative contributions of free and protein-bound NAD(P)H fractions.

ACKNOWLEDGEMENTS

The studies are supported by the Russian Science Foundation (project # 20-65-46018, FLIM; project #18-73-10021, PLIM).

REFERENCES

1. Shcheslavskiy V., et al., // Opt. Lett. 2018. Vol. 43. No13. p. 3152–3155
2. Lukina M. et al. // Methods Appl. Fluoresc. 2020. Vol. 8. p. 014002
3. Lukina M. et al. // Opt. Lett. 2017. Vol. 42. No 4. p.17
4. Solomatina A. et al. // RSC Adv.2018. Vol. 8. p.17224

Genetically encoded autonomous bioluminescence in eukaryotes

Ilya YAMPOLSKY¹¹*Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry**Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

ivyamp@ibch.ru

ABSTRACT

Many living organisms emit light, a phenomenon known as bioluminescence. The energy required for light production is generated by the oxidation of a small organic molecule – luciferin, catalyzed by a specific enzyme – luciferase. Luminous taxa have currently been reported from about 800 genera. The chemical nature and mechanisms of action of the few known types of bioluminescence substrates (luciferins) are as diverse as their phylogenetic distribution. Despite being widely used in reporter technologies, bioluminescent systems are largely understudied. Of at least forty different bioluminescent systems thought to exist in nature, molecular components of only ten light-emitting reactions are known, and the full biochemical pathway leading to light emission is only understood for two of them.

In this talk, the recently discovered bioluminescent systems, namely those of the Siberian soil worm *Fridericia*, marine polychaete “fireworm” *Odontosyllis* and higher fungi (mushrooms) will be presented. Particularly, the chemical structures of the new luciferins, their mechanisms of luminescent oxidation and biosynthesis will be highlighted [1]. Finally, the use of fungal bioluminescence enzymatic cascade termed “the caffeic acid cycle” for creating autonomously glowing eukaryotes will be demonstrated [2] (Fig. 1).

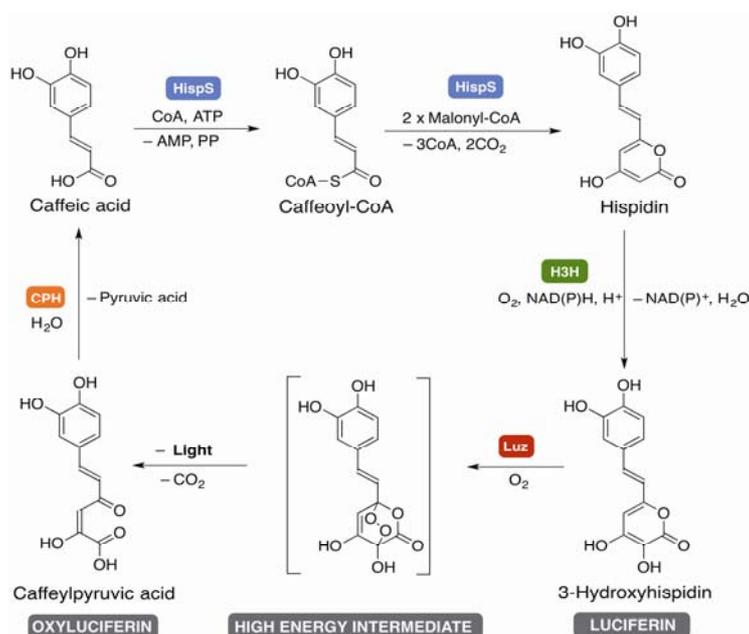


Fig. 1. The caffeic acid cycle enzymatic cascade, enabling genetically encoded luminescence in eukaryotes.

ACKNOWLEDGEMENTS

The reported studies were supported by the Russian Science Foundation grant 17-14-01169p and by the President of Russian Federation grant for Leading Scientific Schools LS-2605.2020.4.

REFERENCES

1. Kaskova Z.M., Dörr F.A., Petushkov V.N., et al. // *Science Advances*. 2017. Vol. 3. No 4. p.e1602847.
2. Mitiouchkina T, Mishin A.S., Somermeyer L.G., et al. // *Nat Biotechnol*. 2020. Vol. 38. p.944–946.

Assessment of melanin distribution from the basal membrane to the stratum corneum in vivo by fluorescence and Raman microspectroscopy

B.P. Yakimov^{1,*}, E.A. Shirshin^{1,2}, J. Schleusener³, V.V. Fadeev¹, M.E. Darwin³

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of physics, 1-2 Leninskie Gory, Moscow, 119991,
Russia*

²*Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences, Fizicheskaya Str., 5, 108840, Troitsk,
Moscow, Russia*

³*Charité – Universitätsmedizin Berlin, corporate member of Freie Universität Berlin, Humboldt-
Universität zu Berlin, and Berlin Institute of Health, Department of Dermatology, Venerology and
Allergology, Center of Experimental and Applied Cutaneous Physiology, Charitéplatz 1, Berlin, 10117,
Germany*

*e-mail: bp.jakimov@physics.msu.ru

ABSTRACT

Melanin, the pigment mainly responsible for skin color, exhibits photoprotective, antioxidative, and photosensitizing properties and is directly involved in the life cycle of the healthy and pathological epidermis, including such a severe malignancy as melanoma [1]. Melanin localization can be assessed ex vivo and in vivo using its distinctive optical features, such as its characteristic Raman spectrum and discernible near-infrared excited fluorescence. Yet, a detailed analysis of the capabilities of depth-resolved confocal Raman and fluorescence microspectroscopy in the evaluation of melanin distribution in the skin is missing.

Here we demonstrate how the melanin fraction at different depths in the human epidermis can be estimated in vivo from its Raman bands at 1380 and 1570 cm⁻¹ utilizing multiple analysis techniques of Raman spectra, including simple ratiometric approach, spectral decomposition, and non-negative matrix factorization. We show that introduced approaches can be successfully applied to gain insights into the melanin distribution in the epidermis and might also provide information about the location of other skin constituents, such as collagen in the dermis and natural moisturizing factor in the stratum corneum. We also found that NIR excited fluorescence correlates well with melanin fraction, and its spectral band shape properties are correlated with the molecular organization of melanin. It was also found that the high NIR fluorescence is also observed in the dermis, suggesting that other molecular sources, such as oxidized proteins and lipids, might contribute to the red endogenous fluorescence. We believe that not only information about the distribution of melanin, but also insights into its molecular organization can be assessed by the combined Raman and NIR-fluorescence approach, which, in turn, can provide a new understanding of the behavior of melanin in healthy and pathological skin.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 19-32-90260).

REFERENCES

1. Brenner, M., Hearing, V. J. // *Photochem. Photobiol.* 2019. Vol. 84. p.539–549.