

# НОВОСТИ НАУКИ



Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова № 1/2024

90-летие  
Физфака МГУ



## СОДЕРЖАНИЕ

|         |                        |
|---------|------------------------|
| 1.....  | 90-летие физфака МГУ   |
| 3.....  | Татьянин день в МГУ    |
| 4.....  | Физфак 2.0             |
| 8.....  | Новости науки          |
| 22..... | Диссертации            |
| 24..... | Премии/награды         |
| 28..... | Диссертационные Советы |
| 29..... | Ученые физфака МГУ     |

В 2023 году наш факультет отметил очень важную дату — 90-летие физического факультета! С 27 ноября по 5 декабря, кроме традиционных торжественных заседаний, были проведены интеллектуальные игры, шоу в общежитии, студенческий концерт, концерт классической музыки и другие мероприятия.

Ректор МГУ Виктор Антонович Садовничий поздравил коллектив факультета с 90-летием и объявил благодарность коллективу «За плодотворную работу по совершенствованию учебного процесса, активной деятельности в области научных исследований, значительного вклада в дело подготовки высококвалифицированных специалистов и в связи с 90-летием факультета».

Хорошо срежиссированное театрализованное представление дало впечатляющую развернутую картину истории физического факультета МГУ. Игра артистов-студентов сопровождалась демонстрацией выразительного видеоряда.

ISSN 2500–2384



Юбилей физического  
факультета МГУ



## ПЕРЕЧЕНЬ ПРОШЕДШИХ МЕРОПРИЯТИЙ

**27 ноября**

Студенческая интеллектуальная викторина,  
посвященная физическому факультету

**28 ноября**

Открытое торжественное заседание Ученого совета и  
Профессорского собрания физического факультета

Юбилейный студенческий "семейный" ужин в  
общезитии

**29 ноября**

Концерт клуба классической музыки

**30 ноября**

Кубок физического факультета по "Что? Где?  
Когда?"

**1 декабря**

Студенческий концерт оригинальной версии  
"COVER"

**2 декабря**

Шахматный турнир, посвященный юбилею физи-  
ческого факультета

**5 декабря**

Юбилейное собрание коллектива физического  
факультета. Выступление ректора Московского  
университета. Театрализованное представление об  
истории факультета





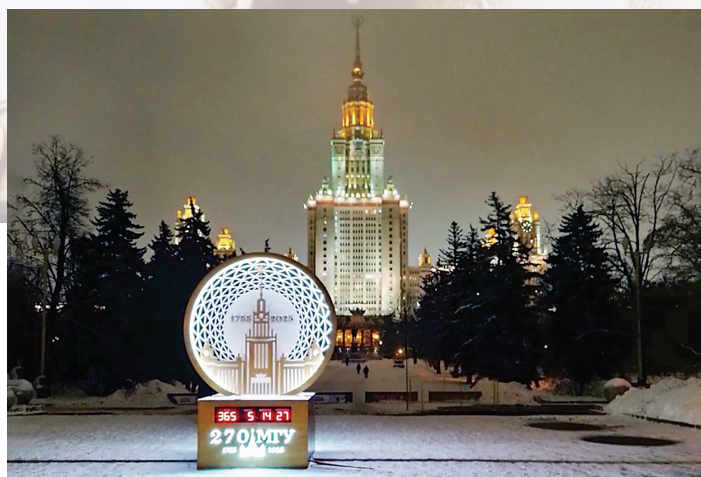
Торжественное заседание, посвященное 269-летию Московского университета

# Татьянин день в МГУ

25 и 26 января Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова торжественно отметил 269-летие основания университета, Татьянин день и День российского студенчества. Одним из центров большого праздника студентов и преподавателей ведущего университета страны стал актовый зал главного здания МГУ на Воробьевых горах, где с участием ректора академика В.А. Садовниченко 25 января прошло торжественное заседание и праздничный вечер.

В день основания Московского университета, перед главным зданием на Воробьевых горах, в сквере у памятника М.В. Ломоносову, включили огромные часы, которые будут отсчитывать время до 270-летнего юбилея ведущего университета страны. Символическую кнопку обратного отсчета перед грядущим 270-летием ректору помогли нажать две именинницы — студентка социологического факультета Татьяна Годилов и студентка Высшей школы государственного аудита Татьяна Иванова. Ректор Московского университета академик В.А. Садовнический: «Сегодня мы отмечаем Татьянин день — день

рождения главного университета страны и праздник всего российского студенчества. А уже через год мы будем праздновать и наш большой юбилей. Чтобы каждый день был наполнен не только текущими делами и событиями, но и особой атмосферой в преддверии нашего общего праздника, напомним об этом мы включили таймер обратного отсчета. 270-летие Московского университета — это не просто века в истории МГУ, это знаковое событие для отечествен-



ной высшей школы. Это особый праздник и для Москвы, и для всей России, потому что нет ни одного региона, где не работал бы наш выпускник».

26 января в ходе торжественных мероприятий, посвященных 269-летию Московского университета, ректор МГУ академик В.А. Садовнический поздравил победителей 43-го конкурса научных работ, традиционно проводимого Советом молодых ученых, который отмечает свое 55-летие.

По итогам 43-го конкурса научных работ лауреатом I премии стал старший научный сотрудник кафедры биофизики, доктор физ.-мат. наук



**ГУДИМЧУК  
Никита  
Борисович**

*Поздравляем!*



# ФИЗФАК 2.0

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНКУРС НА РАЗРАБОТКУ АРХИТЕКТУРНОЙ КОНЦЕПЦИИ КОМПЛЕКСА ЗДАНИЙ НОВОГО ЛАБОРАТОРНОГО КОРПУСА ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ имени М. В. ЛОМОНОСОВА



*От лица МГУ имени  
М. В. Ломоносова  
я с большой радостью  
приветствую  
участников конкурса  
на разработку  
архитектурной  
концепции комплекса  
зданий нового*

*лабораторного корпуса физического факультета  
МГУ!*

*С искренними пожеланиями удачи.*

*Садовничий Виктор Антонович,  
академик, ректор МГУ имени М. В. Ломоносова*

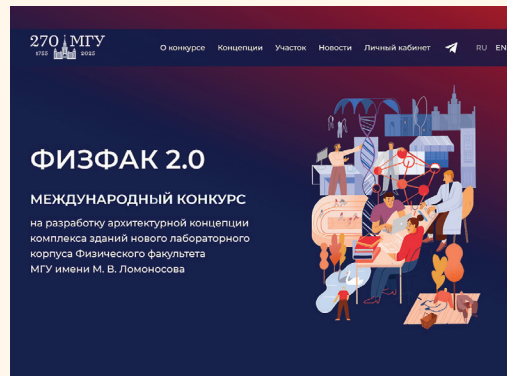
**13 июля 2023 года** началась работа специалистов из России, Китая и Великобритании над концепцией нового физического факультета МГУ.

Инициатор конкурса — МГУ, оператор конкурса — компания **Citymakers**.

Цель конкурса — разработать узнаваемый облик нового корпуса физического факультета, который будет расположен на новой территории кампуса МГУ. Участники разработают планировочные, объемно-пространственные и ландшафтные решения для самого здания и окружающей территории. Корпус будет рассчитан на 4000 человек, а общая площадь участка проектирования составит 2,68 Га.

30 мая 2023 г. на физическом факультете прошел первый круглый стол, на котором были определены ближайшие шаги по проектированию и строительству нового корпуса физического факультета МГУ.

Владимир Белокуров, и.о. декана физического факультета МГУ открыл дискуссию для сбора мнений/предложений по вопросу строительства нового лабораторного корпуса физического факультета.



Руководитель проекта «Физфак 2.0» Александр Петров в своем докладе рассказал о современных трендах проектирования современных научных корпусов, текущем состоянии физического факультета МГУ, инфраструктуре кампуса, численности и технико-экономических параметрах нового корпуса физического факультета МГУ.

С участниками круглого стола поделились видением нового корпуса: его технико-экономическими параметрами, расположением и функциональной моделью. Представителям кафедр рассказали о предстоящем архитектурном конкурсе на разработку концепции нового корпуса физического факультета МГУ, про shortlist бюро, план-график проведения конкурса, состав работ. Было предложено сформировать группу технического заказчика для подготовки требований к будущему корпусу.

Все кафедры физического факультета МГУ были приглашены к активному участию в проекте на всех этапах проектирования.

19 июня 2023 г. на физическом факультете прошел круглый стол представителей кафедр, на котором обсуждалось техническое задание для конкурса на разработку архитектурной концепции нового корпуса физического факультета МГУ.

Руководитель проекта Александр Петров представил список общих требований к зданию и открыл дискуссию по расширению перечня.

В конце совещания было объявлено о формировании профильных рабочих групп для проработки специальных требований к лабораторным помещениям.



# Архитектурные концепции нового лабораторного корпуса физического факультета

## ASADOV



*Новый корпус физического факультета — это многофункциональный кластер с инфраструктурой для исследований, дружелюбной средой для нетворкинга и точками притяжения и интереса для широкой аудитории. Концепция архитектурного бюро «Asadov» отражает принцип «от прошлого к будущему» сочетанием различных фасадных приемов: в формах видна и традиционная архитектура МГУ, и новые решения.*

Само здание представляет собой разноэтажный объем, от одного до шести этажей. Все разделено функционально на лабораторные и учебные корпуса, объединенные общественными пространствами, галереями и атриумами. В подземной части есть паркинг, технические помещения и лаборатории. На первом этаже — вход, конференц-зал, коворкинг, ресторан и зоны ресепшена. На втором и третьем этажах — учебные зоны и лаборатории. Четвертый и пятый этажи — гибкие лаборатории. На втором, четвертом и пятом этажах — зоны для отдыха и исследований.



## ROCCO / MLA+

### Гонконг/Россия

Новое здание физического факультета спроектировано по принципу «город в городе». Корпус с точки зрения архитектурного подхода разделен на пять тематических блоков, образующих четыре «кластера», объединенных вокруг центральной «гостиной». Эта функциональная модель является образом микромасштабируемого «города», создавая возможность для синергии и сотрудничества между различными корпусами.



В здании спланирована матрица социальных пространств с различной иерархией приватности, соединяющая функциональные программы воедино. «Городская гостиная» и различные социальные пространства обеспечивают площадку для встреч представителей различных научных сообществ и интеллигенции для освещения событий, встреч и обмена идеями. Каждый «городской кластер» оснащен необходимыми функциями поддержки и обучения, образуя автономные модули для посетителей факультета

Чтобы поддержать традиции прошлого и навести мосты в будущее, новое здание физического факультета призвано продвигать четыре основные ценности посредством архитектурного проекта — «Исследование», «Сплоченность», «Самовыражение», «Новаторство». В каждом блоке будет размещаться одна из ценностей



в качестве принципа планирования; и блок должен отражать ценности пространственно и архитектурно. Таким образом, это город, объединяющий четыре основные ценности, создающий яркие пространства для студентов и научных сотрудников.

## СТУДИЯ 44

### Россия



В концепции архитектурного бюро «Студия 44» новый корпус физфака не копирует образ классических зданий университета, но наследует и воспроизводит как их системообразующие черты — регулярность, осевую симметрию, ортогональную геометрию, так и приметы фирменного стиля — квадратные формы, ступенчатые построения, ритм вертикальных элементов в тектонике здания.

Перед зданием разместится площадь, похожая на большой газон перед МГУ, но с инвертированным ландшафтом: там, где у МГУ был газон, у нового здания Физфака будет пешеходная площадка — и наоборот. Эта площадь станет частью будущего Парка науки, который окружит здания Физфака и получит продолжение внутри в виде четырех дворов для отдыха и общения.

Архитектура лабораторного корпуса построена по принципу фрактала — множества, сформированного из самоподобных элементов. Дворы-оранжереи, оформленные каждый в своем стиле, образуют систему композиционных ядер здания, его коммуникационных узлов и центров отдыха и общения.







## VIAD/Дружба Китай / Россия

Новый факультет физики МГУ имени Ломоносова будет экологичным футуристическим корпусом, где будут проводиться научные эксперименты, будет расположена кафедра гуманитарных наук, учебные помещения и комнаты отдыха и досуга.

Дизайн-план делает ставку на тесное взаимодействие ландшафта и внутренней территории. Концепция описывает многоуровневое ландшафтное пространство с множеством функциональных маршрутов, двором для отдыха и зеленой технологической архитектурой. Новое здание создано с учетом устойчивых решений, которые продлят эксплуатацию и улучшат жизнь пользователей.

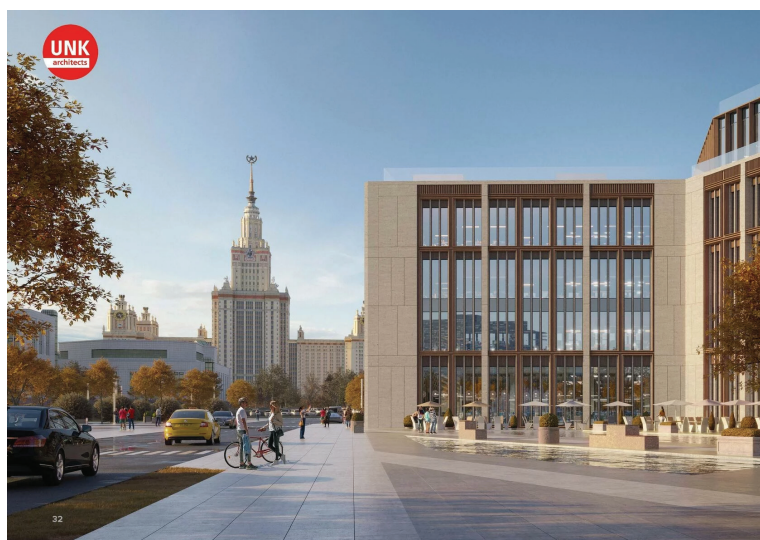


Новое здание факультета физики будет не только иметь все необходимые функциональные зоны (лабораторные, учебные, общественные и служебные), но и сможет дать место для коммерческих площадей — например, для аренды, для стартапов на особых условиях.

## UNK project Россия

Принятая в проекте бюро UNK центрическая система организации пространства нового здания МГУ свойственна кристаллическим структурам, что отражает дух физического факультета. Форма здания позволяет сократить количество коридоров и эффективно организовать связи между общественной, научной и вспомогательной функциями, с возможностью объединения, а также обособления либо трансформации пространств.

Крыша — это отдельная важная функциональная зона. Здесь есть большой сад-амфитеатр под открытым небом, где можно проводить лекции, выступления, отдыхать и работать на свежем воздухе. Сад опоясывает круговая дорожка с зонами для воркаута и йоги. Над блоками лабораторий располагаются функциональные кровли для размещения оборудования.



Дизайн корпуса вдохновлен симметрией, свойственной большинству зданий комплекса МГУ. А пластика фасадов отсылает к традиционным для интерьеров главного здания деревянным панелям. Порттики нового корпуса также решены в свойственной для главного здания МГУ манере, с использованием колоннады.



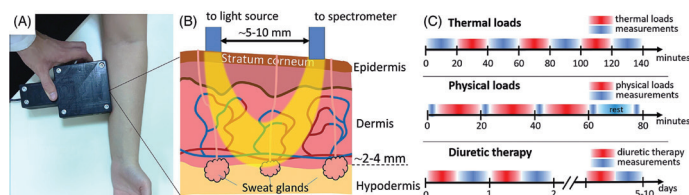
# Оптический метод оценки гидратации организма

Сотрудниками физического факультета и МНОЦ МГУ — участниками Научно-образовательной школы МГУ «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина» — разработан оптический метод для оценки уровня гидратации организма. Используя пространственно-разрешенную спектроскопию диффузного отражения, исследователи провели мониторинг процессов дегидратации и регидратации кожи при термических и физических нагрузках у здоровых добровольцев, а также во время диуретической терапии у пациентов с отечным синдромом. Данная работа способствует созданию портативных устройств для мониторинга гидратации кожи, которые найдут применение в клинической практике и спортивной медицине.

D. A. Davydov, G. S. Budylin, A.V. Baev, D.V. Vaipan, E. M. Seredenina, A.A. Kamalov, E.A. Shirshin. "Skin dehydration monitoring with optical spectroscopy allows assessment of water content in the organism: Thermal and physical loads, diuretic therapy". First published: 07 January 2024 <https://doi.org/10.1002/jbio.202300509>

Уровень гидратации организма человека является ключевым фактором, определяющим его здоровье и функционирование. Вода выполняет множество жизненно важных функций: от регуляции температуры тела и транспорта питательных веществ до поддержания метаболических процессов в клетках. Недостаточное потребление жидкости может привести к обезвоживанию, что негативно сказывается на работе всех систем организма, а одним из последствий может явиться летальный исход. Существующие методы определения содержания воды в организме, такие как взвешивание и анализ биожидкостей (кровь, слюна и др.), не подходят для быстрого и точного анализа состояния гидратации.

Ученые с физического факультета в сотрудничестве с коллегами из Университетской клиники (МНОЦ МГУ) провели исследование, направленное на изучение процесса дегидратации организма человека с использованием пространственно-разрешенной спектроскопии диффузного отражения. В рамках этого исследования были проведены эксперименты, включающие тепловые и физические нагрузки, а также диуретическую терапию. Используя разработанный оптический метод, ученые смогли измерить изменения в уровне гидратации до и во время данных воздействий.



Оценка уровня гидратации велась, в основном, по величине оптического поглощения воды в коже. Была обнаружена корреляция между уменьшением массы тела и уровнем гидратации кожи: потеря массы тела на 1% соответствует снижению гидратации кожи на 10%. Тепловые нагрузки влекут за собой монотонное снижение относительной концентрации воды без восстановления, что указывает на продолжительное обезвоживание кожи после прекращения воздействия высоких температур. Физическая активность приводит к более заметным изменениям содержания воды: после первых 20 минут бега уровень содержания воды понижается на 10%, после чего фиксируется его восстановление до контрольного уровня. Таким образом, организм способен компенсировать потерю жидкости во время кратковременных физических нагрузок. Наиболее существенное снижение уровня гидратации (до 30%) наблюдалось при диуретической терапии добровольцев с диагностированным отечным синдромом.

Полученные результаты доказывают, что оптическая спектроскопия является удобным неинвазивным инструментом для оценки уровня гидратации организма. «В дальнейшем планируется разработка портативного устройства для диагностики отечного синдрома, — рассказал один из авторов работы, аспирант физического факультета МГУ Денис Давыдов. — Это позволит удаленно корректировать диуретическую терапию, что может снизить нагрузку на стационарное отделение медицинских учреждений».



# Биосенсоры на основе полевых транзисторов

*Группа ученых физического, химического факультетов и НИИЯФ МГУ представили систему для детектирования специфичных биообъектов (антитела, аптамеры, олигонуклеотиды), которую можно использовать многократно. Исследования проводились в рамках Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».*

Сам сенсор представляет собой транзистор — устройство, состоящее из трех электродов — сток, исток и затвор. Электрический ток между стоком и истоком контролируется напряжением на третьем электроде — затворе. Отличие используемого транзистора от классического в том, что затвор сделан в виде очень узкого нанопровода из кремния (ширина которого составляет 80 нанометров, а длина 3–5 микрон), что позволяет детектировать биообъекты с рекордной чувствительностью. На чип с сенсором были добавлены нагреватели и измерители температуры. Такая терморегулирующая система — важный элемент устройства, благодаря которому возможно проводить сами измерения в оптимальных для каждого из детектируемых объектов температурных режимах. Кроме этого, он позволяет очищать сенсор от остатков биоматериала и использовать его многократно.

Междисциплинарные научные исследования по разработке и созданию наноразмерных биосенсоров на основе полевых транзисторов с каналом-нанопроводом уже несколько лет ведутся в лаборатории «Криоэлектроника» совместно с кафедрой химической энзимологии химического факультета МГУ.

Учеными разрабатывается система для детектирования в режиме реального времени ключевых биохимических биомаркеров и генов устойчивости к лекарственным препаратам. Детектирование биомаркеров осуществляется с помощью кремниевого чипа, на котором созданы очень чувствительные сенсоры. Такие сенсоры представляют собой полевой транзистор с каналом-нанопроводом. В транзисторах электрический ток между стоком и истоком контролируется напряжением на третьем электроде — затворе (который своим электрическим полем «перекрывает» или, наоборот, «открывает» канал протекания тока между стоком и истоком). Кроме этого, канал представляет собой очень тонкий нанопровод, благодаря которому канал протекания тока будет крайне чувствителен к внешнему электрическому полю.

Чтобы детектировать какие-нибудь определенные биологические объекты, к поверхности нанопровода «пришиваются» специальные распознающие биомолекулы — «замки», которые захватывают и удерживают нужные биологические объекты («ключи») вблизи поверхности нанопровода сенсора. Так как практически все биологические объекты имеют ненулевой электрический заряд, то порождаемое ими электрическое поле влияет на ток через нанопровод. Так осуществляется детектирование специфических биологических объектов: белков, вирусов, нуклеиновых кислот и др.

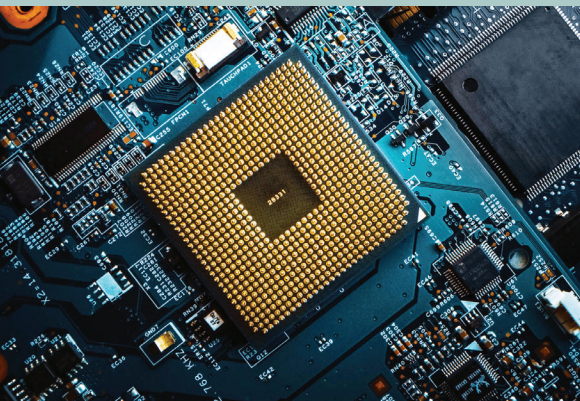
Чувствительность подобных сенсоров экстремально высока и достигает уровня аттомолей, а в отдельных случаях позволяет добиться детектирования одиночных молекул или частиц.

«Одной из проблем создания ДНК-сенсоров является низкая селективность определения при комнатной температуре и трудности с разрушением комплексов для многократного использования сенсоров, — рассказал один из авторов работы, Олег Снигирев, заведующий кафедрой физики полупроводников физического факультета МГУ. — Для решения этой проблемы был разработан биосенсор со встроенным терморегулятором, который позволяет проводить стадии инкубации и отмывки при повышенных температурах. В результате гибридизация ДНК происходит наиболее эффективно, что позволяет повысить специфичность и избежать ложноположительных результатов, а также сократить время анализа. Возможность нагревания до 85–90 градусов Цельсия позволяет использовать такие устройства многократно».

И.И. Циняйкин, Г.В. Преснова, И.В. Божьев, А.А. Скорик, М.Ю. Рубцова, А.С. Трифонов, О.В. Снигирев, В.А. Крупенин, Д.Е. Преснов. "Наноразмерный биосенсор со встроенным терморегулятором для ДНК диагностики." Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2023. № 2. 2320701.



# Концепция квантового мемристора на ультрахолодных ионах



*Ученые физического факультета МГУ совместно с коллегами из Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук впервые предложили использовать ультрахолодные ионы для создания квантовых мемристоров и проведения квантовых нейроморфных вычислений. Это позволяет объединить преимущества квантовых вычислений и нелинейной мемристивной динамики изменения параметров, осуществлять хранение информации и проведение вычислений в рамках одного объекта. Ученые пришли к выводу, что ионная платформа обладает рядом преимуществ по сравнению с предложенными ранее, поскольку в рамках нее открывается возможность создания целой последовательности связанных единичных мемристоров для проведения логических операций. Исследования проводились в рамках НОШ МГУ «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».*

Нейроморфные вычисления, которые проводятся, в основном, с использованием классических мемристоров (устройств, электрическое сопротивление которых зависит от заряда, протекшего через них в предыдущие моменты времени) доказали свою эффективность при решении ряда задач, таких, например, как распознавание образов и речи, прогнозирование, обобщение. Вместе с тем, в настоящее время активно развиваются квантовые вычисления, которые имеют неоспоримые преимущества по сравнению с классическими, благодаря высокому уровню параллелизма, масштабируемости, принципу суперпозиции и запутанности. Возникла естественная идея найти такой класс устройств, который позволил бы проводить нейроморфные квантовые вычисления. К таким устройствам относятся квантовые мемристоров.

«К настоящему моменту направление развития квантовых мемристоров и их использования в нейроморфных вычислениях находится еще в зачаточной стадии. Предложена реализация квантовых мемристоров на нескольких платформах, на которых как раз и развиваются квантовые вычисления: квантовая фотоника и сверхпроводящие схемы. На некоторых из них уже реализуются методы машинного обучения. Однако, за рамками рассмотрения оказалась ионная платформа, которая продемонстрировала свои уникальные преимущества в квантовых вычислениях», — отметил автор исследования, заместитель декана по научной работе физического факультета МГУ Павел Форш.

Для реализации концепции квантового мемристора необходимо поместить ультрахолодный ион в ловушку Пауля, облучить его двумя лазерными полями, частота колебаний электромагнитного поля которых попадает в резонанс с последовательными переходами между уровнями иона. Такое воздействие позволяет инициировать осцилляции Раби населенности между специально подобранными тремя уровнями иона. Измеряя населенность одного из выбранных уровней, внося тем самым частичную декогерентность общему состоянию системы, на определенном временном отрезке, можно модифицировать частоту осцилляций населенностей Раби, изменяя параметры лазерного поля (интенсивности излучения, длительности импульса) для последующего интервала времени. Тем самым осуществляется эффективное управление динамикой населенностей уровней трёхуровневой системы. В результате чего, определяя входной сигнал в качестве населенности выбранного уровня после действия одночастотного поля, а выходной сигнал в качестве населенности того же уровня после действия двух лазерных импульсов и осуществляя управление параметрами полей, можно получить гистерезисную зависимость выходного сигнала при изменении входного сигнала.

Предложенная идея была подтверждена проведенной серией численных расчетов. Кроме того, на примере  $171\text{Yb}^+$  были предложены конкретные уровни, которые соответствуют необходимым условиям для осуществления мемристивной динамики, а также



являются удобными для экспериментальной реализации квантового мемристора.

«Таким образом, мы впервые сформулировали идею создания квантовых мемристоров на ионной платформе, предложили конкретную схему для экспериментальной реализации предложенного объекта. Кроме того, продемонстрировали преимущество ионной платформы реализации квантового мемристора, которое заключается в том, что квантовое состояние мо-

жет быть передано другому связанному силами кулоновского взаимодействия иону по цепочке за счет низкочастотной колебательной моды центра масс. Это позволит задействовать два и более ионов для проведения логических операций, формируя нейронную сеть. Вместе с тем, обилие уровней даже в одиночном ионе, позволяет предложить схему связанных квантовых мемристоров в рамках одного иона, когда последовательное действие резонансных полей позволяет передавать состояние от мемристора

к мемристор. Наличие двух и более групп уровней на одном ионе с предложенной схемой передачи информации по цепочке связанных ультрахолодных ионов позволит создавать многослойные квантовые персептроны, которые являются основой нейронных сетей», — подвел итог работы профессор физического факультета МГУ Сергей Стремоухов.

S. Stremoukhov, P. Forsh, K. Khabarova, N. Kolachevsky. "Proposal for Trapped-Ion Quantum Memristor". *Entropy*, 2023, 25(8), 1134.

## Эффективные способы генерации перепутанных состояний фотонов

Интерес к разработке эффективных источников перепутанных состояний фотонов возник давно — сначала в рамках фундаментальных исследований квантовой оптики, а потом в связи с появлением прикладных областей квантовых коммуникаций и квантовых вычислений. Очень часто возможность практической реализации квантовых алгоритмов приводит к необходимости генерировать специальные перепутанные состояния и, как следствие, сама возможность построить квантовую сеть или оптический квантовый вычислитель во многом зависит от того, насколько эффективно можно генерировать такие состояния.

«До недавнего времени исследователи интересовались только максимально перепутанными состояниями, т.к. известны рецепты построения квантовых компьютеров на их основе. В на-

шей работе мы рассмотрели генерацию всех возможных двухкубитных состояний и исследовали возможность создания простых оптических схем, которые бы генерировали любое состояние из этого класса. В частности, мы интересовались пределами эффективностей, с которыми можно генерировать двухкубитные состояния с помощью интерференции фотонов в интерферометрах и их измерений — это так называемая линейно-оптическая генерация оптических состояний», — рассказал младший научный сотрудник физического факультета МГУ и Российского квантового центра Сурен Флджян.

Работа является частью большого исследования по созданию квантовых вычислителей с использованием фотонов и интерферометров, которые ведутся в Центре квантовых технологий МГУ совместно с Российским

Ученые Центра квантовых технологий МГУ нашли более эффективные способы генерации произвольных двухкубитных перепутанных состояний. Такие состояния являются основой для построения квантовых оптических сетей и создания оптических квантовых компьютеров.

Ученые обнаружили, что ранее известные методы генерации таких состояний были далеки от возможного предела эффективности и в результате исследования были предложены новые методы получения таких состояний. Они необходимы для создания оптических квантовых компьютеров и для построения квантовых оптических сетей.

Исследования выполнены в рамках Дорожной карты РФ по квантовым вычислениям, Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ «Фотонные и квантовые технологии: Цифровая медицина» и поддерживаются фондом «БАЗИС».







# Метод понижения частотного интервала оптических гребенок

Оптические частотных гребенки — одна из наиболее модных тем последнего десятилетия в области фотоники. Создание оптических частотных гребенок с различными расстояниями между «зубцами» является актуальной задачей, и работы в этой области вызывают несомненный интерес. Акустооптическое взаимодействие — дифракция света на ультразвуковой волне в кристаллах — позволяет создавать разнообразные электрически перестраиваемые оптические приборы. Вполне логично использовать акустооптическое взаимодействие для получения оптических гребенок с изменяемыми характеристиками. Важным направлением в данной области является изучение методов понижения величины частотного интервала между компонентами радиочастотного спектра гребенок, реализуемое при помощи взаимодействия двух или более когерентных гребенок с различными величинами данного интервала, генерируемых в одной системе.

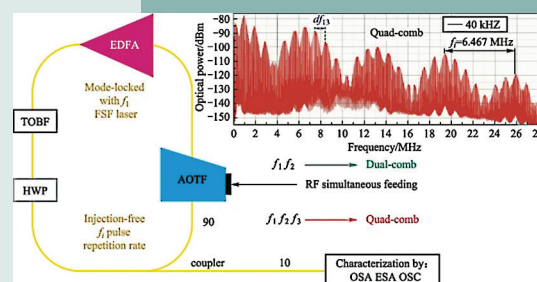
Одной из оптических систем, в которых возможна генерация гребенок, являются так называемые безмодовые лазеры (frequency-shifted feedback (FSF) laser). Они состоят из оптоволоконной петли обратной связи и оптического усилителя, являющегося, за счет наличия спонтанного излучения, источником оптической накачки. Акустооптический фильтр входит в систему обратной связи, замыкая ее при существовании акустооптической дифракции и сдвигая частоту дифрагированного света на частоту звуковой волны за счет эффекта Доплера. При многократном прохождении света через обратную связь и при выполнении определенных условий формируется последовательность коротких импульсов (режим синхронизации мод безмодового лазера), спектр которых представляет собой эквидистантные по частоте пики, то есть оптическую частотную гребенку. Частота следования импульсов определяется временем задержки в петле обратной связи и не зависит от частоты ультразвука.

В работе впервые предложено генерировать двойные и четверные оптические гребенки в безмодовом лазере. Такая возможность появилась благодаря использованию многочастотной акустооптической дифракции в одном акустооптическом устройстве, реализуемой при одновременной подаче на пьезопреобразователь акустооптического фильтра нескольких различных радиочастотных сигналов. При подаче смешанного радиосигнала в акустооптическом кристалле одновременно возбуждается несколько акустических волн, и свет дифрагирует на каждой из них независимо. Следовательно, получаются световые волны с различными частотными сдвигами. Эти волны усиливаются волоконным усилителем и взаимодействуют друг с другом, формируя гребенки сложного вида.

Варьируя количество и значения частот ультразвука, можно получать одинарные, двойные и четверные гребенки. При этом величина спектрального интервала между их линиями будет определяться не временем задержки в цепи обратной связи, а разностью частот возбуждаемых ультразвуковых волн, то есть ее можно легко перестраивать.

«Таким образом, акустооптическое взаимодействие позволяет создать достаточно простой перестраиваемый прибор, генерирующий частотные гребенки самых разных вариантов, что несомненно, будет востребовано во множестве приложений», — прокомментировал работу профессор физического факультета МГУ Сергей Манцевич.

Ученые кафедры физики колебаний физического факультета МГУ и Российского квантового центра продемонстрировали возможность последовательного понижения величины частотного интервала при взаимодействии одной и более пар оптических гребенок (двойные и четверные гребенки), генерируемых с помощью единственного перестраиваемого акустооптического фильтра. Результаты работы поддержаны грантом РНФ.



S. N. Mantsevich, E. I. Kostyleva, A. N. Danilin & V. S. Khorokin. "Generation of dual and quad-optical frequency combs in the injected radiation free mode-locked frequency-shifted feedback laser." *Frontiers of Optoelectronics*, **16**, Article number: 21 (2023).

# Новые фоны и методы обработки для теневого фонового метода

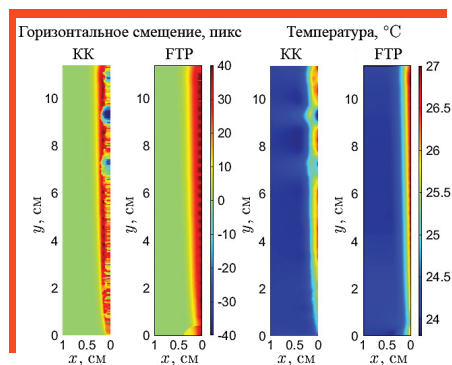
Сотрудники кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества предложили новые методы обработки изображений для количественной рефрактометрии в экспериментальной гидродинамике. Они позволяют проводить измерения температуры, плотности, концентрации примесей в течениях, содержащих резкие перепады показателя преломления, например, ударные волны или тонкие тепло- или диффузионные слои.

Теневой фоновый метод (ТФМ) — это современный метод количественной визуализации в гидродинамике, наследник классических теневого и шлирен методов. Он очень прост в реализации: фотокамера дважды снимает изображение фонового узора, первый раз через оптически однородную среду, второй раз через исследуемое течение. Изменения показателя преломления в течении приводят к рефракционному отклонению лучей и видимому смещению элементов узора на втором снимке по сравнению с первым. Если с помощью компьютерной обработки найти распределение смещения, из него можно потом восстановить мгновенное поле показателя преломления и поля величин, с ним связанных: температуры, плотности, концентрации примеси. Традиционно в теневом фоновом методе применяется кросскорреляционный метод сравнения изображений, взятый из другого метода —

цифровой трассерной визуализации. Он определяет наиболее вероятное смещение группы пятен. Но если в течении присутствуют области с резким изменением показателя преломления, соседние пятна сместятся по-разному, изображения пятен деформируются, форма группы нарушится и кросскорреляционный метод не сможет определить правильное распределение смещения.

Группа под руководством профессора Уварова А.В. применила в ТФМ другие использующие фоновые изображения специального типа методы определения смещения: фурье-профилометрию для периодических фонов и метод M-array BOS, основанный на специальной цветной кодировке пятен, стоящих в узлах регулярной решетки. Такая кодировка позволяет, используя всего несколько цветов, легко различимых камерой, сделать каждое пятно на фоне уникальным и избежать путаницы изображений соседних пятен, даже если их смещения многократно превышают расстояние между пятнами. Было проведено сравнение точности, пространственного разрешения и достоверности результатов в зонах с большой второй производной показателя преломления для предлагаемых методов и для уже используемых в ТФМ — кросскорреляции, методов оптического потока Хорна-Шунка и Лукаса-Канаде. Новые методы показали существенно лучшее пространственное разрешение, позволяющее измерять тонкие структуры с большим перепадом показателя преломления.

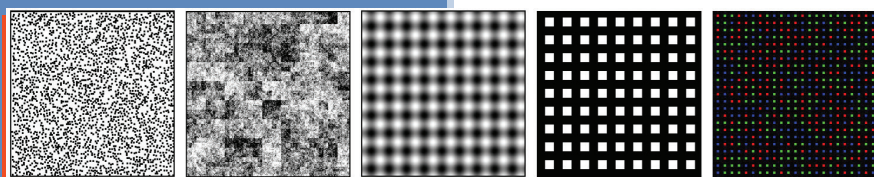
При измерениях тонких диффузионных слоев в жидкостях было обнаружено интересное оптическое явление: образование множественных (двойных или тройных) изображений одного и того же пятна, расположенного вблизи границы раздела. Учет информации об этих изображениях позволяет повысить точность определения перепада показателя преломления для объектов с сильной рефракцией.



Результаты ТФМ-измерений естественной конвекции в воде вблизи вертикальной нагретой пластины. Кросскорреляция (KK) не справляется с большим градиентом смещения, фурье-профилометрия (FTP) дает правильные гладкие распределения смещения и температуры в пограничном слое.

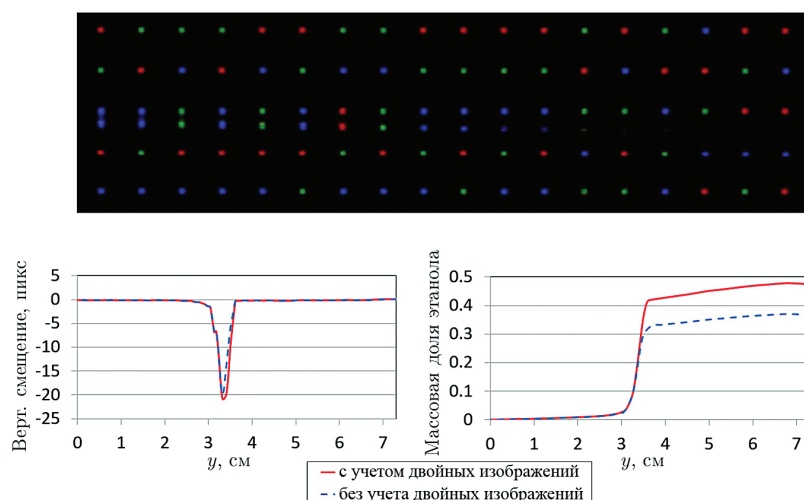
N.A. Vinnichenko, A.V. Pushtaev, Yu.Yu. Plaksina, A.V. Uvarov.  
“Performance of Background Oriented Schlieren with different background patterns and image processing techniques.” *Experimental Thermal and Fluid Science*, 147, 110934 (2023).

N.A. Vinnichenko, A.V. Andrianova, A.V. Pushtaev, Yu.K. Rudenko, Yu.Yu. Plaksina, A.V. Uvarov.  
“Color-encoded M-array Background Oriented Schlieren for measurements of strongly refracting objects.” *International Journal of Thermofluids*, 18, 100364 (2023).



Различные фоны для ТФМ. Слева направо: традиционный фон для кросскорреляции, вейлетный фон для методов оптического потока, периодический фон для фурье-профилометрии, его бинарный вариант, специальный цветной фон для M-array BOS.





Измерения диффузии в системе вода–50% раствор этилового спирта с помощью M-array BOS: фрагмент снимка с образованием двойных изображений пятен и полученные вертикальные распределения смещения и массовой доли этанола.

## Физики и нейробиологи МГУ создали искусственные синапсы

Сотрудничество физиков и нейробиологов МГУ позволило создать искусственные синапсы, реагирующие на импульсы света подобно биологическим синапсам и обладающие кратковременной и долговременной памятью. Реализация вычислительных архитектур на основе подобных элементов может приблизить нас к созданию энергоэффективных систем искусственного интеллекта.



Одним из главных ограничений для развития искусственного интеллекта является ограниченность вычислительных ресурсов и их энергопотребления. Традиционная цифровая архитектура фон Неймана, хоть и служит основой многих компьютерных систем, сталкивается с ограничениями в скорости обработки и энергоэффективности из-за разделения оперативной памяти и центрального процессора. Эти ограничения становятся особенно критичными при выполнении задач искусственного интеллекта, которые требуют постоянного доступа к памяти.

Человеческий мозг, при всей своей сложности, обладает выдающейся энергоэффективностью среди всех существующих интеллектуальных систем и потребляет по некото-

рым оценкам всего 20 Вт. Эффективность человеческого мозга достигается, в том числе, за счет импульсного режима передачи информации и объединенной функциональности обработки информации и хранения памяти в нейронах. Даже частичная реализация его способностей в устройствах обработки информации может стать технологическим прорывом для систем искусственного интеллекта.

Сотрудники лаборатории нейроморфной фотоники МГУ под руководством профессора физического факультета Андрея Федянина в сотрудничестве с химиками и нейробиологами продемонстрировали биоподобные свойства оптоэлектрических структур на основе оксида цинка. Фотопроводимость этих структур демонстрирует импульсный тип отклика на сигнал, близко напоминающий поведение биологических синапсов. Это означает, что он может эффективно передавать и обрабатывать информацию, подобно тому, как нейроны общаются друг с другом. Группе ученых удалось поставить ряд экспериментов, которые позволили создать оптоэлектронные искусственные синапсы и продемонстрировать их нейроморфные свойства.

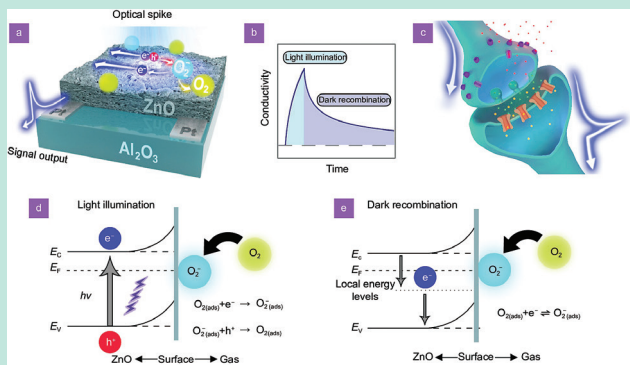


Figure 1. (a) 3D schematic illustration of light-stimulated artificial synapse based on nanocrystalline ZnO film. (b) Postsynaptic conductivity modulation induced by light. (c) 3D schematic illustration of a biological synapse. (d, e) Energy level diagrams of an optoelectronic synapse for light stimulation and dark electrons recombination.

Это исследование стало возможным во многом благодаря налаженным межфакультетским связям в МГУ и содействию некоммерческого фонда развития науки и образования «ИНТЕЛЛЕКТ».

«Слышали историю о том, как физик, нейрофизиолог, специалист в области искусственного интеллекта и химик собрались в одной команде? Нет, это не завязка для нового панчлайна, это было начало нашей научной саги, результаты которой оказались на обложке журнала Opto-Electronic Science. Мы разрабатываем новый подход к искусственному интеллекту, создавая биоинспирированные искусственные синапсы, активируемые светом и обрабатывающие импульсные сигналы. Кроме того, мы наткнулись на несколько удивительных открытий: эти синапсы вызывают чувство

депрессии (да, даже искусственные синапсы могут быть подавлены), тоническое возбуждение и отсроченные ускоренные ответы, которые возникают при периодическом облучении импульсами света. Эти синапсы как рок-звезды в мире технологий, они адаптируются и запоминают прошлые стимулы, как никто до них», — рассказывает Игорь Балашов, аспирант физического факультета.

Один из самых интригующих аспектов этого искусственного синапса — его способность к запоминанию. Он обладает как кратковременной (STM), так и долговременной памятью (LTM), что очень важно для решения многих когнитивных задач. LTM сохраняется в течение длительного времени, что делает ее ценным решением для хранения и воспроизведения информации в нейроморфных системах.

Еще одно примечательное свойство этого искусственного синапса — парно-импульсная фасилитация (PPF). Это явление, когда второй импульс вызывает более сильный ответ, чем первый, является чрезвычайно важной особенностью нейронных систем и имеет большое значение для обработки информации и обучения.

Кроме того, этот искусственный синапс сохраняет память о предыдущих воздействиях, что определяет свойства непрерывного обучения и адаптации. Эта способность хранить и воспроизводить информацию, полученную в прошлом, позволяет ему адаптироваться к изменяющимся условиям и повышать свою производительность с течением времени.

«Возможно, самым интересным аспектом этой работы является открытие адаптации частоты спайков. Это свойство, характерное для биологических нейронов, позволяет искусственному синапсу настраивать свою реакцию в зависимости от частоты входящих сигналов. Такая адаптация обеспечивает дополнительный уровень сложности и разнообразия, необходимый для эмуляции сложного функционирования человеческого мозга. Таким образом, адаптивный искусственный синапс на основе нанокристаллической пленки оксида цинка — это значительный шаг на пути к созданию нейроморфных вычислительных систем, повторяющих эффективность и адаптивность человеческого мозга. Его способность воспроизводить базовые синаптические характеристик, делает его перспективным кандидатом для будущих нейроморфных чипов и сенсорических систем», — рассказал Андрей Грунин, сотрудник лаборатории нейроморфной фотоники МГУ.

Balashov I. S., Chezhegov A. A., Chizhov A. S., Grunin A. A., Anokhin K. V., et al. "Light-stimulated adaptive artificial synapse based on nanocrystalline metal-oxide film." J. Opto-Electronic Science. (2023) 2. 10. p. 230016.



# Новые данные о механизме формирования массы адронов

*Учеными МГУ получены первые и единственные в мире сечения электророзряда пар заряженных пионов на протонах в области масс нуклонных резонансов до 2.0 ГэВ и в интервале квадратов четырех импульсов виртуальных фотонов  $Q^2$  до 5.0 ГэВ<sup>2</sup>. В коллаборации МГУ / Hall B at JLab применен единственный в мире подход для извлечения амплитуд электровозбуждения  $N^*$  из реакций электророзряда  $p+r$  на протонах.*

Анализ имеющихся данных позволяет исследовать формирование массы адронов в области расстояний, где ожидается формирование менее 30% их массы. В экспериментах, выполняемых в настоящее время физиками НИИЯФ МГУ на детекторе CLAS12, будет получена информация об амплитудах электровозбуждения  $N^*$  при виртуальностях  $Q^2$  до 10 ГэВ<sup>2</sup>, что позволит исследовать механизмы формирования массы адронов в области расстояний, где возникает ~50% их массы. С увеличением энергии пучка до 22 ГэВ, будут получены амплитуды электровозбуждения  $N^*$  при  $Q^2$  до 30 ГэВ<sup>2</sup>. А это уже позволит исследовать всю область расстояний, где формируется доминирующая часть видимой массы адронов во Вселенной. Тем самым, будет решена ключевая открытая проблема Стандартной Модели о динамике формирования доминирующей части массы адронов сильным взаимодействием.

По словам старшего научного сотрудника НИИЯФ МГУ Евгения Исупова, «полученные результаты

значительно расширили перспективы доступа к механизмам сильного взаимодействия, определяющим формирование доминирующей части массы видимой материи во Вселенной. Исследования амплитуд электровозбуждения для большинства нуклонных резонансов обеспечивают уникальную информацию о многообразии проявлений динамики сильного взаимодействия наблюдаемой в формировании структуры различных  $N^*$ ».

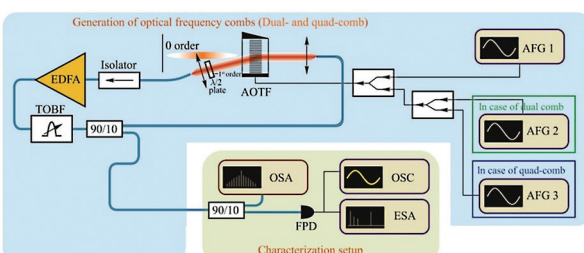
В Jefferson Lab эти работы рассматриваются как важное, приоритетное направление, на которое надо потратить сил столько, сколько нужно для решения фундаментальной открытой проблемы Стандартной Модели о механизмах формирования массы адронов.

Со стороны НИИЯФ и кафедры общей ядерной физики физфака МГУ в данном проекте участвуют: Эдуард Боос, Максим Давыдов, Анна Голубенко, Александр Булгаков, Виталий Чесноков, Алмаз Насретдинов, Евгений Исупов, Евгений Широков и Василий Шведун.

«В перспективе эти исследования позволят решить последние открытые проблемы Стандартной Модели о формировании массы и

структуры адронов и изучить в какой мере процессы формирования адронов из кварков и глюонов могут быть описаны на основе квантовой хромодинамики. Тем самым, будут открыты новые возможности для выхода за пределы границ Стандартной Модели. Решение этих фундаментальных задач требует эффективной международной коллаборации между экспертами в области эксперимента, феноменологии и фундаментальной теории сильных взаимодействий. Сотрудничество НИИЯФ, физического факультета МГУ и Hall B at Jefferson Lab — важный шаг в этом направлении», — отмечает Евгений Исупов.

A. Accardi, P. Achenbach, D. Adhikari, A. Afanasev, C.S. Akondi, N. Akopov, M. Albaladejo, H. Albataineh, M. Albrecht, B. Almeida-Zamora, M. Amarian, D. Androić, W. Armstrong, D.S. Armstrong, M. Arratia, J. Arrington, A. Asaturyan, A. Austregesilo, H. Avagyan, T. Averett, C. Ayerbe Gayoso, A. Bacchetta, A.B. Balantekin, N. Baltzell, L. Barion, P. C. Barry, A. Bashir, M. Battaglieri, V. Bellini, I. Belov, O. Benhar, B. Benkel, F. Benmokhtar, W. Bentz, V. Bertone, H. Bhatt, A. Bianconi, L. Bibrzycki, R. Bijker, D. Binosi, D. Biswas, M. Boër, W. Boeglin, S.A. Bogacz, M. Boglione, M. Bondi, E.E. Boos, P. Bosted, G. Bozzi, E.J. Brash, R. A. Briceño, P.D. Brindza, W.J. Briscoe, S.J. Brodsky, W.K. Brooks, V.D. Burkert, A. Camsonne, T. Cao, L.S. Cardman, D.S. Carman, M. Carpinelli, G.D. Cates, J. Caylor, A. Celentano, F.G. Celiberto, M. Cerutti, Lei Chang, P. Chatagnon, C. Chen, J-P. Chen, T. Chetry, A. Christopher, E. Christy, E. Chudakov, E. Cissani, I.C. Cloët, J.J. Cobos-Martinez, E.O. Cohen, P. Colangelo, P.L. Cole, M. Constantinou, M. Contalbrigo, G. Costantini, W. Cosyn, C. Cotton, A. Courtoy, S. Covrig Dusa, V. Crede, Z.-F. Cui, A. D'Angelo, M. Döring, M. M. Dalton, I. Danilkin, M. Davydov, D. Day, F. De Fazio, M. De Napoli, R. De Vita, D.J. Dean, M. Defurne et al. (344 additional authors not shown). "Strong Interaction Physics at the Luminosity Frontier with 22 GeV Electrons at Jefferson Lab" J. NuclearExperiment. 2023 Submitted on 13 Jun 2023 (1), last revised 24 Aug 2023 (this version, 2).



# Зависимость магнитных свойств магнитокалорических сплавов от параметров их синтеза



*Ученые кафедры магнетизма физического факультета МГУ с коллегами из других университетов исследовали зависимость магнитных свойств сплавов FeRhCr (железо-родий-хром) от скорости охлаждения после отжига. В статье представлены теоретические расчеты и экспериментальные данные, которые позволили расширить понимание механизмов, ответственных за взаимосвязь структурных и магнитных свойств. Результаты работы позволят оптимизировать процессы синтеза материалов с магнитным фазовым переходом первого рода с целью их улучшения.*

Ранее была выявлена зависимость магнитных свойств сплава FeRhRu от содержания рутения, однако оставался открытым вопрос о влиянии на них технологии синтеза соединения. Из обзора опубликованных данных ученые выделили общие тенденции и проверили их на сплаве FeRhCr.

Два образца с одинаковым составом отжигались в печи при 1000 градусов Цельсия в течение 72 часов. Затем один из образцов быстро охлаждался при погружении в воду, а другой медленно остывал в печи — это единственное различие между образцами. В результате дальнейших экспериментальных исследований ученые обнаружили существенные различия в свойствах образцов: намагниченности,

величине поля насыщения, параметрах кристаллической решетки, температуре фазового перехода, ширине температурного гистерезиса и т.д.

Для объяснения эффекта была выдвинута гипотеза, согласно которой при медленном охлаждении атомы легирующего элемента успевают вставать на позиции, соответствующие минимуму их энергии. При быстрой закалке имеет место процесс локального разупорядочения, в результате которого атомы хрома могут занимать как позиции железа, так и родия. Как следствие, в кристалле изменяются межатомные обменные взаимодействия и магнитные свойства.

Чтобы проверить гипотезу, ученые провели расчеты на основе теории функционала плотности для сплавов FeRhCr с различной концентрацией хрома (на одну суперячейку происходило замещение одним, двумя или тремя атомами хрома). Далее по минимуму свободной энергии были выделены наиболее выгодные конфигурации атомов в решетке.

В результате расчетов наиболее вероятное состояние для медленного охлажденного сплава соответствовало замещению атомами хрома атомами родия. Это контринтуитивный результат, так как ионный радиус хрома ближе к ионному радиусу железа. Наиболее вероятное среднее расстояние между парами атомов хрома составило 3.62 ангстрема.

По результатам расчета и сопоставления с экспериментальными данными для быстро ох-

лажденного сплава получилось, что наиболее вероятной является конфигурация, при которой 8% атомов хрома замещали атомы железа, а 92% замещали атомы родия. Среднее расстояние между атомами хрома варьировалось от 2.3 до 5.2 ангстрем.

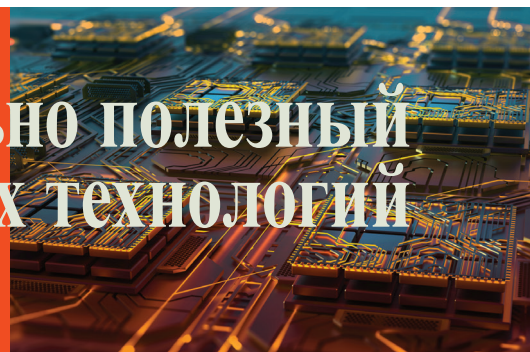
«По имеющимся данным мы сделали несколько важных выводов. Во-первых, быстро охлажденный сплав имеет больше дефектов, вблизи которых может происходить нуклеация новой фазы в процессе фазового перехода. Следовательно, производная намагниченности по температуре должна быть больше, чем у медленно охлажденного образца, что и подтверждается экспериментом. Во-вторых, замещение атомов может создавать вакансии в кристаллической решетке, а это может вызывать эффект отрицательного давления. Этот эффект приводит к изменению магнитных свойств объекта, в том числе температуры фазового перехода», — прокомментировал работу м.н.с. кафедры магнетизма Алексей Степанович Комлев.

Исследования выполнены при финансировании Министерства образования и науки, грант № 075-15-2021-1353.

A. S. Komlev, G. F. Cabeza, A.M. Chirkova, E. A. Sherstobitova, V. I. Zverev, R. Gimaev, N. V. Baranov, N. S. Perov. «Influence of Structural Disorder on the Magnetic Order in FeRhCr Alloys», *Metals*, 2023, **13**(10), 1650.



# Материал, потенциально полезный для квантовых технологий



Бурное развитие информационных технологий требует создания новых материалов, обладающих квантовыми свойствами, среди которых топологические изоляторы, низкоразмерные магнетики, сверхпроводники и др. Причем, на сегодняшний день сверхпроводящие материалы являются лидером квантовых технологий. Однако их использование требует чрезвычайно низких температур. Низкоразмерные магнетики могут оказаться применимыми уже в комнатных условиях. В их кристаллических структурах атомы переходных металлов образуют цепочечные, или слоистые фрагменты.

«Гидротермальный синтез является имитацией образования природных кристаллов — минералов. Этим методом нами при температуре 230°C и давлении водяного пара до 300 атмосфер были синтезированы монокристаллы аналога редкого минерала намибита,  $\text{Cu}(\text{BiO})_2\text{VO}_4\text{OH}$ , открытого в 1981 г. в северо-западной Намибии и названного в честь пустыни Намиб. Особенностью кристаллической структуры намибита является наличие цепочек из связанных ребрами медь-кислородных октаэдров, которые разделяются магнитно инертными катионами висмута. Такой мотив предполагает возможность существования спиновой запутанности между ионами двухвалентной меди», — прокомментировала ведущий научный сотрудник кафедры кристаллографии и кристаллохимии геологического факультета МГУ Лариса Шванская.

Квантовая запутанность — это квантово-механическое явление, при котором квантовое состояние системы многих тел описывается единой волновой функцией, независимо от того, насколько далеко друг от друга в пространстве находится каждое

отдельно взятое тело. Материалы, обладающие такими свойствами, являются основой для создания кубитов — «сердца» квантовых компьютеров.

Ученые провели теоретические и экспериментальные исследования синтетического намибита при низких температурах и в сильных магнитных полях. Изучение магнитной восприимчивости и теплоемкости, резонансных характеристик наряду с теоретическими расчетами параметров обменных взаимодействий между катионами меди в цепочке показало, что аналог минерала намибита демонстрирует свойства, присущие системам со спин-жидкостным поведением. В таком основном квантовом состоянии спины атомов находятся в постоянном движении и не переходят в упорядоченное состояние вплоть до температуры абсолютного нуля градусов вопреки закону термодинамики.

«Синтетический намибит не показывает перехода в магнитно-упорядоченное состояние вплоть до температуры 2 К, несмотря на наличие сильных антиферромагнитных взаимодействий в системе. Тем самым является уникальным объектом для изучения явления спиновой запутанности при комнатной температуре», — пояснил заведующий кафедрой физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ Александр Васильев.

Л. В. Шванская, Т. Д. Бушueva, А. Г. Иванова, З. В. Пчелкина, Т. М. Васильчикова, О. С. Волкова, А. Н. Васильев. "Низкоразмерный магнетизм в намибите  $\text{Cu}(\text{BiO})_2\text{VO}_4\text{OH}$ ." ЖЭТФ, 2023, 164, вып. 4 (10), стр. 599–606. 2023.

Ученые МГУ методом гидротермального синтеза получили монокристаллы аналога редкого минерала намибита, а также провели его теоретические и экспериментальные исследования при низких температурах и в сильных магнитных полях. Новый синтетический материал может быть полезным для развития квантовых технологий.

Синтетический аналог редкого вторичного минерала намибита,  $\text{Cu}(\text{BiO})_2\text{VO}_4\text{OH}$ , получен гидротермальным методом. В кристаллической структуре этого соединения присутствуют изолированные однородные цепочки медь-кислородных октаэдров, соединенных по вершине. Измерения магнитной восприимчивости  $\chi$  и намагниченности  $M$  не дают указаний на формирование дальнего магнитного порядка в интервале температур 2–300 К. Измерения теплоемкости  $C_p$  позволяют предположить формирование спинстекольного состояния при низких температурах. Электронный парамагнитный резонанс в X-диапазоне регистрирует только сигнал от примеси при низких температурах. Первопринципные вычисления определяют обменное взаимодействие в цепочках  $J = 555$  К, при том, что обменные взаимодействия между цепочками оказываются на один-два порядка меньшими. Тем самым, намибит представляет собой редкий пример неупорядоченной полупрочисленной спиновой цепочки.

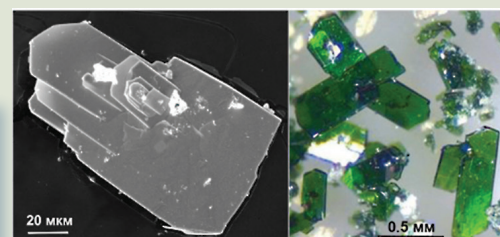
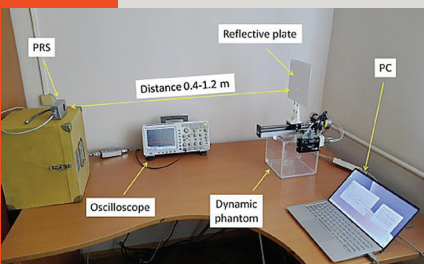


Рис. 1. Изображения кристаллов  $\text{Cu}(\text{BiO})_2\text{VO}_4\text{OH}$  в сканирующем электронном микроскопе (слева) и в оптическом микроскопе (справа).



# Разработан метод компенсации движения опухоли в процессе лучевой терапии

Представители научно-образовательной школы «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина» приняли участие в разработке высокоточного метода, позволяющего учесть дыхание пациента при проведении лучевой терапии на пучках протонов.

Физико-техническое обоснование метода выполнил Михаил Белихин, выпускник физического факультета МГУ, младший научный сотрудник Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Работа проводилась под руководством заведующего кафедрой физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета МГУ Александра Черняева.

Протонная лучевая терапия на сегодняшний день является одним из наиболее точных и эффективных методов радиотерапии. Это обусловлено особенностями взаимодействия протонов с веществом, в частности, наличием пика Брэгга — выраженного максимума переданной энергии в конце пути ускоренных протонов. Это позволяет доставить максимум дозы в опухоль, минимизировав воздействие на окружающие здоровые ткани.

«Протонная терапия демонстрирует ряд дозиметрических преимуществ перед традиционной фотонной терапией. Наиболее поздние исследования показывают, что применение протонов позволяет снизить риск развития лучевой пневмонии 3-ей степени при лечении ранних стадий мелкоклеточного рака легкого, а также, например, снизить дозовую нагрузку на сердце и легкие при терапии левостороннего рака молочной железы» — отмечает Михаил Белихин.

Однако при проведении протонной лучевой терапии дополнительной трудностью может стать движение опухоли и окружающих ее внутренних органов в процессе облучения.

«Такое движение называется интрафракционным. По большей части, оно вызвано дыханием и сердцебиением пациента. Движение приводит не только к смещению опухоли, но и к локальным изменениям плотности на пути пучка. В результате этих и других эффектов происходит искажения распределения поглощенной дозы, появляются локальные переоблученные и недооблученные области» — уточнил Михаил.

В результате работы был разработан новый метод компенсации движения опухоли. Разработанный метод является оптимальным с точки зрения доставки поглощенной дозы к движущейся опухоли на медицинских установках на основе протонных синхротронов.

Следует подчеркнуть, что разработанный метод позволяет минимизировать дозу в здоровых тканях, что снизит вероятность развития отдаленных последствий лучевой терапии. При этом длительность процедуры терапии увеличивается лишь на 25% по сравнению с лечением на свободном дыхании, в то время как использование других методов компенсации может увеличивать ее более чем на 120%.

M. Belikhin, A. Pryanichnikov, V. Balakin, A. Shemyakov, P. Zhogolev, A. Chernyaev. «High-speed low-noise optical respiratory monitoring for spot scanning proton therapy», *Physica Medica*, **112**, 102612, 2023.

M. A. Belikhin, A. A. Pryanichnikov, A.P. Chernyaev, A. E. Shemyakov. «Nonanthropomorphic Dynamic Water Phantom for Spot Scanning Proton Therapy». *Physics of Atomic Nuclei*. **85**, 1603–1607 (2022).

M.A. Belikhin, M.S. Grigoryeva, I.N. Zavestovskaya, A.A. Pryanichnikov, A.P. Chernyaev & A.E. Shemyakov. «Experimental study of the target motion effect on the dose distribution in spot-scanning beam proton therapy». *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. **49**, p. 132–136 (2022).



# Результаты изучения механизмов тушения фотолюминесценции углеродных точек

*Ученые кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ оценили вклады от нескольких механизмов тушения фотолюминесценции углеродных точек катионами тяжелых металлов. Полученные данные позволяют создать дешевые наносенсоры, способные бесконтактно определять концентрации катионов тяжелых металлов с высокой точностью за доли секунд. Работа проводилась в рамках гранта РНФ № 22-12-00138.*

Углеродные точки (УТ) — наночастицы, формой приближенные к шару диаметром до 10 нм. В УТ выделяют углеродное ядро и присоединенные к поверхности функциональные группы. Функциональные группы — различные молекулы, способные изменять физико-химические свойства УТ.

«Углеродные точки обладают интересными оптическими свойствами, среди которых выделяется интенсивная стабильная люминесценция — ее квантовый выход может достигать 50% и более, что мы исследовали в прошлых работах. Кроме большого квантового выхода, фотолюминесценция УТ отличается высокой чувствительностью к окружению — вплоть до наноконцентраций растворенных в воде веществ. На основе этого эффекта физики разрабатывают наносенсор тяжелых металлов. Каждый из этих металлов тушит фотолюминесценцию, но тушит ее по-разному — какой-то больше, какой-то меньше», — прокомментировала работу Галина Чугреева, аспирантка кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ.

На данный момент не существует аналитической теории, описывающей фотолюминесценцию УТ и ее поведение в зависимости от параметров окружения наночастиц, поэтому предсказать, каким образом какой-либо катион повлияет на свечение УТ, нельзя. Ученые выделяют несколько механизмов тушения ФЛ катионами, и вклад разных механизмов будет зависеть от типа катиона. В этой работе ученые впервые предложили подход оценки вклада каждого из механизмов.

Всего было рассмотрено четыре механизма.

1. Эффект внутреннего фильтра. Молекулы, которые находятся в растворе, поглощают часть фотонов, поэтому интенсивность светового сигнала уменьшается.
2. Изменение pH. Из-за того, что pH изменяется, функциональные группы могут брать на себя либо ионы  $H^+$ , либо  $OH^-$ , что также влияет на фотолюминесценцию УТ.
3. Статический механизм тушения. Ион подлетает к УТ и присоединяется к ней, в результате чего получается новая нелюминесцирующая структура.
4. Динамический механизм тушения. Ион подлетает к УТ, снимает с нее возбуждение и улетает. В результате фотолюминесценция тушится, однако сама УТ и ее структура остаются неизменными.

Физики оценили вклад каждого из четырех механизмов для каждого катиона. В водный раствор УТ добавлялся один тип катиона, например, медь, снимались спектры и считался процент тушения от каждого механизма. Это необходимо, чтобы предсказывать поведение УТ, когда в растворе может оказаться не один, а несколько типов ионов.

Как было отмечено ранее, на основе этих результатов возможно разработать наносенсор катионов тяжелых металлов. Такой наносенсор может детектировать концентрации веществ вплоть до наномасштабов, к тому же, его возможно быстро и дешево синтезировать в больших объемах. Процесс детектирования занимает доли секунд благодаря обработке спектров методами машинного обучения. Такие сенсоры могут использоваться для определения концентрации тяжелых ионов в воде. Ученые уже разработали наносенсор для трех катионов и одного аниона и в дальнейшем планируют расширять сетку катионов и их допустимую концентрацию.

A.S. Komlev, R.A. Makarin, K.P. Skokov, A.M. Chirkova, R.R. Gimaev, V.I. Zverev, N.V. Baranov & N.S. Perov. "Tuning Magnetocaloric Effect in Ternary FeRh-Based Alloys by Slight Doping." *Metallurgical and Materials Transactions A* (2023) 108 Accesses, 7 Altmetric 2023.



Старший научный сотрудник  
кафедры квантовой электроники  
Евгений Александрович Шириин

19 октября 2023 года

в диссертационном совете МГУ.013.6(01.08)

**Евгений Александрович Шириин**

защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора  
физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика

на тему:

## «ОПТИКА ЭНДОГЕННЫХ ФЛУОРОФОРОВ: ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ»

Обладая рядом принципиальных преимуществ, оптические методы нашли широкое распространение в исследовании живых систем. В то же время использование оптической диагностики в решении задач клинической практики затруднено, поскольку использование внешних (экзогенных) меток, применяемых в научных исследованиях для повышения чувствительности и специфичности, в большинстве случаев невозможно при измерениях на людях *in vivo*. Таким образом, интерес представляет использование эндогенного контраста — оптического сигнала от молекул и систем молекул, уже присутствующих в образце (клетке, биожидкости, ткани). Основной целью диссертационной работы являлось исследование фотофизических процессов в эндогенных флуорофорах, а также создание новых методов диагностики и визуализации с использованием фотофизических параметров эндогенных флуорофоров клеток и биотканей человека.

В работе было показано, что появление у биомолекул, в том числе, в клетках, эндогенной флуоресценции и поглощения в видимой и ближней ИК области спектра связано с образованием гетерогенных систем флуорофоров, появляющихся за счет химических модификаций. Продemonстрирована общность механизмов формирования спектральных свойств и свойств кинетики релаксации флуоресценции на временах от 100 фс до 10 нс для гетерогенных систем флуорофоров, образованных в результате подходов снизу вверх

(путем воздействий на растворы простых молекул) и сверху вниз (на примере широкого класса соединений — природного органического вещества). Полученные результаты объясняют механизм формирования ИК флуоресценции живых систем и закладывают основы для диагностики патологических процессов и флуоресцентной навигации в хирургии.

Предложен метод визуализации микрососудов с помощью двухфотонной эндогенной флуоресценции и доказано, что природа данного сигнала связана с генерацией флуоресцирующих фотопродуктов гемоглобина. Развита методика детектирования субпопуляций клеток в тканях путем анализа параметров релаксации флуоресценции эндогенных флуорофоров в них, с помощью которой впервые визуализированы иммунные клетки *in vivo*. На основании измерения сечения двухфотонного поглощения методом нелинейной флуориметрии доказано отсутствие резонансного возбуждения меланина при двухфотонной микроскопии. Предложен новый метод микроскопии насыщения флуоресценции, позволяющий визуализировать сечение двухфотонного поглощения флуорофоров по образцу, в частности, в живых клетках. Таким образом, в работе были развиты универсальные подходы для визуализации объектов в биотканях и анализа их функционального состояния, что является важным для биомедицинской диагностики.



Доцент кафедры общей физики и молекулярной электроники  
Владимир Борисович Зайцев

19 октября 2023 года  
в диссертационном совете МГУ.013.3 (МГУ.01.01)  
**Владимир Борисович Зайцев**  
защитил диссертацию  
на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности  
1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

на тему:



## «АКТИВНЫЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СИСТЕМЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ»

Для создания устройств современной микроэлектроники, для оптоэлектроники, нано- и биоэлектроники, также и для молекулярной электроники требуется детальное изучение интерфейса между молекулярной и твердотельной подсистемами сложных устройств. Для решения многих проблем на этом пути перспективно изучение модельных упрощенных систем состоящих из диэлектриков или полупроводников с адсорбированными на их поверхности активными органическими молекулами.

Объектами исследования являлись активные органические молекулы — молекулы различных органических красителей, в том числе фотокислот — нафтолов, способные обмениваться с поверхностью твердого тела энергией или заряженными частицами (электронами, ионами), а также молекулы органических полупроводника (фталоцианина ванадила), сегнетоэлектрика (поливинилиденфторида) и жидкого кристалла (паратетрадецилокси-бензилиденамино-2-метилбутилцианоцинномата). Все эти типы объектов являются перспективными для применения в современной микро- и нанoeлектронике.

В работе установлены закономерности электронных, колебательных и ионных процессов в различных низкоразмерных органических структурах на поверхности твердых тел. Показана взаимосвязь этих процессов в поверхностной фазе и их влияние на свойства получаемых структур на разных стадиях генезиса молекулярной пленки — при адсорбции отдельных молекул на поверхности, при образовании молекулярных кластеров и при создании ориентированных молекулярных слоев, а также при структурных перестройках и фазовых переходах в сверхтонких органических слоях. Практическую значимость имеют, разработанный новый физический принцип построения высокоселективных полупроводниковых газовых сенсоров; развитый метод люминесцентных молекулярных зондов для исследования поверхностей разной природы с изменяющейся при различных воздействиях степенью гетерогенности, а также для исследования тонких органических пленок; продемонстрированная возможность создания новых материалов с управляемыми свойствами для нелинейной оптики, микро- и молекулярной электроники на основе органических пленок с внедренными в молекулами органических красителей.



Указом Президента Российской Федерации от 4 декабря 2023 года № 919 за «заслуги в научно-педагогической деятельности, подготовке квалифицированных специалистов и многолетнюю добросовестную работу» профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета

## УВАРОВ Александр Викторович



награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени. Сердечно поздравляем.



Премию имени А. А. Фридмана РАН 2023 года за цикл работ "Новые направления в теории гравитации и космологии", а также почетное звание "Заслуженный профессор Московского университета" по итогам 2023 года получил профессор кафедры теоретической физики

## ГАЛЬЦОВ Дмитрий Владимирович



По итогам 2023 года премию имени М.В. Ломоносова за педагогическую деятельность получил доцент кафедры общей физики и молекулярной электроники

## ЗАЙЦЕВ Владимир Борисович



Премию имени И.И. Шувалова за научную деятельность II степени получил профессор кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем

## СТРЕМОУХОВ Сергей Юрьевич

за докторскую диссертацию "Механизмы генерации произвольно поляризованного излучения в интенсивных лазерных полях."

Почетное звание "Заслуженный профессор Московского университета" получил заведующий кафедрой экспериментальной астрономии, профессор

## РАСТОРГУЕВ Алексей Сергеевич



ПОЗДРАВЛЯЕМ!



Почетное звание "Заслуженный преподаватель Московского университета" по итогам 2023 года получили:

*доцент кафедры математики*

**ВОЛКОВ**  
**Владимир**  
**Тарасович**

*и старший преподаватель кафедры общей физики*

**ПАНЧИШИН**  
**Иван**  
**Михайлович**



Почетное звание "Заслуженный научный сотрудник Московского университета" по итогам 2023 года получили:

*ведущий научный сотрудник кафедры физики полупроводников и криоэлектроники*

**СОЛДАТОВ**  
**Евгений**  
**Сергеевич**

*и ведущий научный сотрудник кафедры физики полупроводников и криоэлектроники*

**КРУПЕНИН**  
**Владимир**  
**Александрович**







Почетное звание "Заслуженный работник Московского университета" по итогам 2023 года получили:

*ведущий инженер кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем*

**ДРОЗДОВА**  
**Елена**  
**Владимировна**

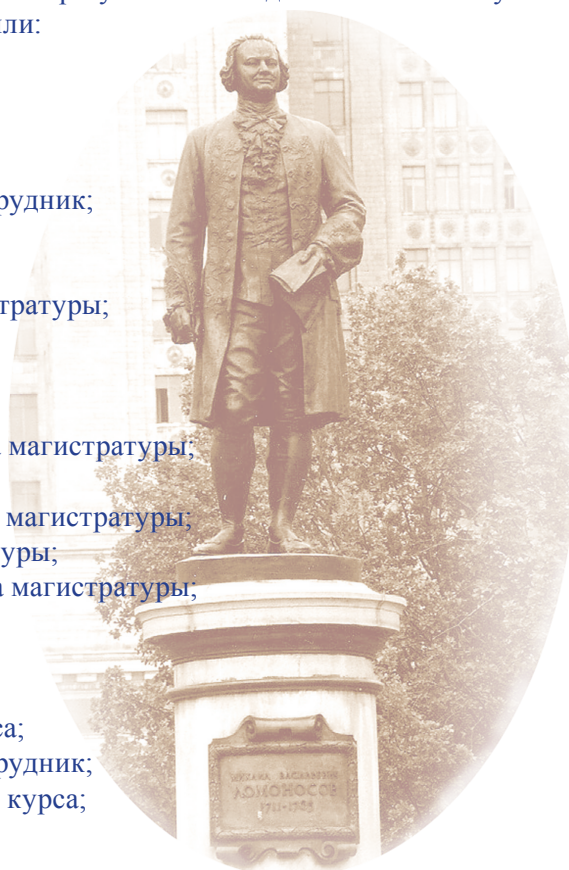
*и механик-оптик кафедры квантовой электроники*

**СОУСТИН**  
**Виталий**  
**Иванович**



Стипендии Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова молодым сотрудникам, аспирантам и студентам, добившимся значительных результатов в педагогической и научно-исследовательской деятельности, на 2024 год получили:

**БОБКОВА Екатерина Сергеевна**, студент 2 курса;  
**БОГАЦКАЯ Анна Викторовна**, доцент;  
**ГРИГОРЬЕВ Кирилл Сергеевич**, ассистент;  
**ГУМЕРОВ Рустам Анрикович**, старший научный сотрудник;  
**ДАНИЛИН Андрей Николаевич**, аспирант;  
**ЖУРАВИЦКИЙ Сергей Алексеевич**, аспирант;  
**ЗУБРИЦКАЯ Яна Васильевна**, студент 2 курса магистратуры;  
**КОВАНКИН Александр Сергеевич**, студент 1 курса;  
**КОРЕПАНОВА Анисия Алексеевна**, студент 4 курса;  
**КОСТЫЛЕВА Екатерина Ильинична**, аспирант;  
**КЫТИНА Екатерина Владимировна**, студент 1 курса магистратуры;  
**МАКАРЬИН Родион Алексеевич**, аспирант;  
**НУРИАХМЕТОВ Ислам Фанилевич**, студент 1 курса магистратуры;  
**ПЕТРОВ Петр Евгеньевич**, студент 2 курса магистратуры;  
**ПЕТРУШОВ Андрей Александрович**, студент 2 курса магистратуры;  
**ПОНОМАРЧУК Екатерина Максимовна**, аспирант;  
**РУБЕКИНА Анна Александровна**, аспирант;  
**САИТОВ Шамиль Рашитович**, аспирант;  
**САНКОВСКИЙ Дмитрий Евгеньевич**, студент 1 курса;  
**СТАНКЕВИЧ Константин Леонидович**, научный сотрудник;  
**СТАРОДУБЦЕВА Екатерина Михайловна**, студент 1 курса;  
**ЧУГРЕЕВА Галина Николаевна**, аспирант;  
**ШОРОХОВ Александр Сергеевич**, доцент.



ПОЗДРАВЛЯЕМ!

# ДИССЕРТАЦИОННЫЕ СОВЕТЫ МГУ С ЗАЩИТАМИ В 2023 г.

## МГУ.013.3 (МГУ.01.01)

Председатель – Хохлов Алексей Ремович, д.ф.-м.н., проф., акад. РАН  
Зам. председателя – Орешко Алексей Павлович, д.ф.-м.н., проф.  
Уваров Александр Викторович, д.ф.-м.н., проф.  
Уч. секретарь – Малышкина Инна Александровна, к.ф.-м.н., доц.

14.12.2023

1. **КАЗАРЯН Полина Суменовна** «Омнифобные полимерные покрытия, получаемые в сверхкритических средах» 1.4.7 – Высокомолекулярные соединения. Кандидатская диссертация.
2. **БОЛЫШИН Даниил Сергеевич** «Электрокинетические явления в потоке электролита на поверхности гидрогеля как основа источника электроэнергии для имплантируемых устройств» 1.3.8 – Физика конденсированного состояния. Кандидатская диссертация.

21.12.2023

1. **КРУЧИНИН Никита Юрьевич** «Формирование структуры и конформационная динамика полимерных цепей на поверхности адсорбентов, включая поверхности нанотел» 1.3.8 – Физика конденсированного состояния. Докторская диссертация.

## МГУ.013.4(МГУ.01.13)

Председатель – Андреев Анатолий Васильевич, д.ф.-м.н., проф.  
Зам. председателя – Макаров Владимир Анатольевич, д.ф.-м.н., проф.  
Уч. секретарь – Коновко Андрей Андреевич, к.ф.-м.н.

23.11.2023

1. **КУЗНЕЦОВ Никита Юрьевич** «Топологические особенности непараксиальных световых полей в задачах линейной и нелинейной дифракции» 1.3.19 – Лазерная физика. Кандидатская диссертация.
2. **МИТИНА Екатерина Владимировна** «Формирование регулярных массивов филаментов и генерация терагерцового излучения слабосфокусированными и коллимированными фемтосекундными лазерными пучками» 1.3.19 – Лазерная физика. Кандидатская диссертация.

12.12.2023

1. **АГАПОВ Дмитрий Павлович** «Фантомная поляриметрия в классических и квантовых световых полях в формализме Джонса» 1.3.19 – Лазерная физика. Кандидатская диссертация.
2. **ЗАЛОЗНАЯ Елизавета Дмитриевна** «Свойства экстремально сжатого волнового пакета среднего инфракрасного диапазона в объеме прозрачной среды» 1.3.19 – Лазерная физика. Кандидатская диссертация.

07.12.2023

1. **СИНЬКО Антон Сергеевич** «Генерация и взаимодействие терагерцового излучения с молекулярными кристаллами» 1.3.19 – Лазерная физика. Кандидатская диссертация.

## МГУ.013.7 (МГУ.01.12)

Председатель – Федянин Андрей Анатольевич, д.ф.-м.н., проф., проф. РАН  
Зам. председателя – Вятчанин Сергей Петрович, д.ф.-м.н., доц.  
Кузев Михаил Викторович, д.ф.-м.н., проф.  
Рахимов Александр Турсунович, д.ф.-м.н., проф.  
Черныш Владимир Савельевич, д.ф.-м.н., проф.  
Уч. секретарь – Карташов Игорь Николаевич, к.ф.-м.н.

7.12.2023

1. **ГАЛИЕВ Рамзиль Раушанович** «Оптимизация режима затягивания частоты полупроводникового лазера высокочастотным микрорезонатором» 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики. Кандидатская диссертация.



# Валерий Петрович КАНДИДОВ (1937–2023)

Очень трудно и тяжело писать о Валере в прошедшем времени — он ушел очень быстро и совершенно внезапно. В это просто невозможно поверить, ощущение того, что он всегда был, есть и остается с нами и именно так и должно быть все время, никак не проходит. Иногда непроизвольно возникает мысль позвонить ему и что-то спросить, но...

Так случилось, что Валера сыграл заметную роль в определении моей судьбы. Во-первых, он был одним из организаторов дня Архимеда и представления одноименной оперы. Об этом упомянуто в книге Светы Ковалевой «Ты помнишь, физфак»: "Члены комитета комсомола во главе с Кандидовым получили взыскания за аполитичное представление и за учиненные беспорядки: за толпы "посторонних" на территории университета, за сломанные двери ДК и т. д.". Для меня премьера праздника и оперы стали решающим фактором в выборе вуза после школы, и в том же году я поступил на физфак. Более того, в коллективе оперы я провел свыше 50 лет и приобрел множество друзей, включая жену.

Во-вторых, Валерий Петрович — один из организаторов движения студенческих строительных отрядов (ССО) на физфаке. Мое знакомство с Валерой произошло в Северном Казахстане в стройотряде «Ветеран-20», организованном Сергеем Литвиненко по случаю 20-летнего юбилея ССО в 1978 г. из участников первых отрядов.

Последние 18 лет мои контакты с Валерой были в основном связаны с нашей совместной научной деятельностью, поэтому я также достаточно хорошо знаком с этой частью его биографии. Еще до начала наших работ Кандидов долгое время занимался аэродинамическими проблемами. Им была посвящена его кандидатская диссертация, и именно за решение насущных проблем в этой области он получил госпремию СССР (1985). Начиная с 1978 г., его научные интересы резко переместились в область нелинейной оптики, основы которой были заложены на кафедре трудами Р. В. Хохлова, С. А. Ахманова и их сотрудников. Основной темой стали исследования по самовоздействию мощного светового излучения, возникающего вследствие того, что в сильном световом поле наряду с линейной поляризацией значительный вклад в отклик среды вносит нелинейная поляризация, которая



*Валерий Петрович Кандидов — заслуженный профессор МГУ, лауреат Государственной премии СССР (1985), лауреат Ломоносовской премии (1977) хорошо известен не только своими научными достижениями, но и как активный общественник, комсомольский лидер, профсоюзный активист, организатор учебного и научного процесса на Физическом факультете МГУ. Но для меня он был просто Валерой и одним из лучших друзей.*

пропорциональна нечетным степеням электрической напряженности. Физические причины возникновения нелинейного отклика среды весьма разнообразны. Степень проявления того, или другого механизма оптической нелинейности определяется как конкретными свойствами самой среды, так и такими характеристиками излучения, как длительность импульса, поперечный размер пучка, интенсивность, поляризация и длина волны.

Эффекты самовоздействия занимают особое место среди прочих нелинейных процессов, т.к. во многих случаях они начинают проявляться уже при достаточно малых мощностях, приводя к возникновению множества других нелинейных эффектов за счет лавинообразного увеличения концентрации световой энергии при распространении лазерного излучения в



прозрачных средах. Интерес к исследованию эффектов самовоздействия связан с такими важными проблемами как перенос энергии при распространении мощного лазерного излучения в турбулентной атмосфере, удаленная диагностика загрязняющих веществ, лазерное зондирование окружающей среды.

Вначале исследования В. П. Кандидова касались в основном проблем тепловой самофокусировки в газах и неоднородных средах и связанной с этим статистики. Этим же вопросам была посвящена его докторская диссертация 1987 г. Начиная с 1993 г. акцент переместился на работы по филаментации импульсов фемтосекундного диапазона с активным участием его студентки и, затем, аспирантки Ольги Косаревой. Это связано с прогрессом в создании мощных фемтосекундных лазерных установок, что сделало доступным эксперименты с излучением, мощность которого значительно превышает критическую мощность самофокусировки в воздухе атмосферного давления, и позволило получать протяженные филаменты с высокой плотностью энергии лазерного излучения при распространении коллимированного излучения в газообразных средах.

Филаментация — явление локализации светового поля при распространении мощного фемтосекундного лазерного излучения в прозрачных диэлектриках, поддерживаемой динамическим балансом керровской самофокусировки в среде и дефокусировки в наведенной лазерной плазме в условиях дифракции и материальной дисперсии. Вследствие высокой концентрации энергии в филаменте, значительной его длины и стабильности параметров усиливается нелинейно-оптическое взаимодействие светового поля со средой и существенно трансформируются пространственно-временные и спектральные характеристики излучения. При филаментации происходит суживание частотного и углового спектра фемтосекундного импульса — генерация суперконтинуума. Концентрация энергии лазерного излучения в протяженном филаменте, генерация суперконтинуума, терагерцового излучения, плазменных каналов и другие эффекты, сопровождающие фемтосекундную филаментацию, сразу привлекли внимание специалистов возможными практическими применениями в экологии, биофизике, атмосферной оптике, микрооптике и других практических приложениях. В качестве примеров можно упомянуть доставку энергии на километровые расстояния для получения плазмы оптического пробоя и сигнала флуоресценции, удаленную диагностику загрязняющих веществ, широкополосное лазерное зондирование окружающей среды, использование плазменных каналов фемтосекундных филаментов для направленной передачи СВЧ излучения, создание элементов микрооптики.

Практически все работы группы В. П. Кандидова в этот период посвящены эффектам в газах, иногда с примесью водяных капель. В 1999 г. были проведены

лабораторные эксперименты по филаментации в воздухе коллимированного фемтосекундного излучения в Канаде в лаборатории доктора Чина и опубликован ряд интересных результатов. Исследования Кандидова и его группы касались в основном численного моделирования уже проведенных, так и планируемых экспериментов. Для излучения фемтосекундной длительности нелинейно-оптические эффекты, связанные с поглощением лазерной энергии (тепловое самовоздействие, рефракция на акустических волнах и т.п.), являются слишком медленными, и его взаимодействие со средой определяется нелинейной поляризацией при электронном Керр-эффекте (характерное время установления —  $10^{-15}$ – $10^{-16}$  с.) и нелинейностью лазерной плазмы, возникающей при фотоионизации в сильном световом поле филамента.

Надо сказать, что большая протяженность филамента, высокая концентрация энергии, при которой интенсивность на оси лавинообразно нарастает, и фемтосекундное время взаимодействия излучения со средой при фемтосекундной филаментации создают условия для эффективного нелинейно-оптического преобразования излучения, приводящего к суживанию частотно-углового спектра импульса, генерации высших гармоник и терагерцового излучения, компрессии импульса, оптической анизотропии и других нелинейно-оптических эффектов. Поэтому проведение полномасштабного вычислительного эксперимента, полностью воспроизводящего все аспекты формирования, распространения и взаимодействия протяженных филаментов, крайне затруднительно, и для проведения расчетов требуются значительные вычислительные ресурсы, так что полноценный анализ явления филаментации может быть выполнен только на мощных системах с распределенной памятью, таких как вычислительные кластеры. Кроме того, вычислительные трудности при решении задачи о филаментации фемтосекундного импульса не ограничиваются только ее высокой размерностью. Не менее существенным обстоятельством является многомасштабность задачи. Например, линейный размер поперечного сечения импульса или радиус пучка на выходе лазерной системы, как правило, на 3 порядка превышает характерный поперечный масштаб образующихся филаментов.

Для ускорения численного решения уравнения, описывающего филаментацию фемтосекундного импульса, В. П. Кандидовым разработаны алгоритмы расщепления по физическим факторам, где задачи дифракции, дисперсии и нелинейного набега фазы решались отдельно, каждая в своих переменных, схемы с равномерными и неоднородными расчетными сетками, адаптивным шагом интегрирования по эволюционной координате и другие приемы, повышающие эффективность численного анализа. В наиболее известном обзоре по филаментации А. Куарона и А. Мизировича, вышедшем в 2007 г., содержится более 40 ссылок на работы Кандидова этого периода.



Возвращаясь к истории вопроса, замечу, что в бытность мою студентом физфака МГУ я достаточно часто слышал про самофокусировку. Я заканчивал только что созданную кафедру Р. В. Хохлова, которая была названа кафедрой волновых процессов. Это были 1964–65 гг., когда термин «самофокусировка» был уже известен, особенно сотрудникам кафедры, занимавшимся исключительно нелинейной оптикой. Каждый понедельник Рэм Викторович устраивал совещание (в просторечии его называли «втык»), куда приглашались как сотрудники и аспиранты, так и студенты-дипломники. Экспериментально самофокусировка еще не наблюдалась, поэтому постановка такого рода эксперимента активно обсуждалась. В 1965 г. сотруднику кафедры Н. Ф. Пилипецкому вместе с Азимом Рустамовым удалось впервые в мире зарегистрировать это явление.

Как-то мне попалась обзорная работа Кандидова по филаментации в газах, и я обнаружил в ней экспериментальные картинки распределения интенсивности лазерного излучения по сечению пучка при увеличении энергии импульса, показавшиеся мне до боли знакомыми — подобные мы наблюдали и в неодимовом стекле, где порог самофокусировки на 3 порядка меньше, чем в атмосферном воздухе. На очередной встрече я рассказал это Валере и предложил ему ездить не в Канаду, а к нам в Троицк, что гораздо ближе и дешевле. Валера был удивлен: «А разве у вас есть фемтосекунды?». Конечно, энергия в импульсе нашего лазера была существенно меньше энергий, с которыми Кандидов работал в Канаде. Было понятно, что на эксперименты с атмосферным воздухом нам ее не хватит и можно работать только с прозрачными диэлектриками, где порог самофокусировки на 3 порядка меньше. Зато мы имели такое существенное преимущество как возможность перестройки лазера в очень широком диапазоне длин волн. Кроме того, Кандидов сказал, что, поскольку физика явления в тех и других средах практически одинакова, то возможно масштабирование полученных в прозрачных диэлектриках результатов на газовые среды. И еще одним выигрышем была гораздо большая компактность экспериментов — характерные длины здесь укладывались в сантиметры, тогда как в атмосферных исследованиях они составляли десятки и даже сотни метров. Получалось, что при объединении усилий мы имели, с одной стороны, уникальный фемтосекундный широкополосный комплекс, а с другой — хорошо отработанные алгоритмы численного счета филаментации и вычислительные кластеры МГУ им. М. В. Ломоносова.

Кандидов среагировал достаточно быстро — приехал в Троицк в течение двух недель с уже намеченной задачей, и мы сразу начали эксперименты. В экспериментах по филаментации фемтосекундных импульсов

на 800 нм в оптическом стекле было обнаружено существенное увеличение стабильности положений филаментов от выстрела к выстрелу при использовании аксикона вместо обычной линзы и впервые наблюдалось расщепление колец конической эмиссии филамента, связанное с интерференцией когерентного излучения из разных его точек. Конечно, результат, который был получен первым, имел мало отношения к намеченному плану. Однако в 2006 г. он был доложен на международных конференциях сначала в Нижнем Новгороде в июле, затем в Болгарии в Смоляне (ILLA 2006 X International Conference Laser and Laser-Information Technologies: Fundamental Problems and Applications) в октябре и вызвал живой интерес. На этой конференции у Кандидова был пленарный доклад по ранее полученным результатам. С тех пор наши совместные работы не прекращались и шли практически беспрепятственно в течение 18 лет.



В начале наших исследований мы занимались изучением закономерностей сверхионизации частотно-углового спектра фемтосекундного лазерного импульса в условиях его филаментации в конденсированных средах, главным образом в плавленом кварце. От группы Кандидова с нами работали его студенты. Валера очень дотошно вникал во все детали эксперимента и на первых этапах нашей совместной деятельности всегда присутствовал при его проведении. Он подавал заявки на финансирование в РФФИ, и мы получили несколько грантов, выполнявшихся под его руководством. Один из первых таких проектов назывался «Спектроскопия суперконтинуума при филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения на длине волны от УФ до ближнего ИК в конденсированных средах».

Следует отметить, что уже в этих экспериментах было начато исследование спектров конической эмиссии при филаментации в спектральном диапазоне, соответствующем аномальной дисперсии групповой скорости (АДГС). При распространении волнового





пакета в объеме керровской среды в условиях АДГС происходит компрессия светового поля в пространстве и времени вследствие фазовой самомодуляции, вызванной кубической нелинейностью. С точки зрения формального описания возможность сжатия импульса во времени аналогична пространственной самофокусировке, только роль дифракции выполняет дисперсия среды. При этом сжатие возможно при отрицательном значении дисперсии групповой скорости. В отличие от пространственного сжатия световых пучков в среде при самофокусировке импульсов ближнего ИК диапазона, при переходе в среднюю ИК область спектра дисперсия групповой скорости становится аномальной, приводя к нелинейной компрессии импульсов одновременно не только в пространстве, но и во времени, т.е. к формированию так называемых световых пуль. Эти образования экспериментально тогда еще не наблюдались, а их дли-

тельность, согласно оценкам, могла сокращаться до долей оптического периода. Исследования сверхбыстрой динамики экстремально сжатых волновых пакетов длительностью в одну-две оптические осцилляции, с поперечным размером порядка длины волны и пиковой интенсивностью до  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> в объеме изотропных прозрачных диэлектриков становятся с появлением субтераваттных источников сверхкоротких импульсов в перспективном для многих приложений среднем ИК диапазоне спектра весьма актуальными для экстремальной лазерной оптики.

Группой Кандидова было проведено подробное численное моделирование временной формы, спектров и распределения интенсивности по сечению пучка

при филаментации в плавленом кварце фемтосекундных импульсов с центральными длинами волн в области нормальной, нулевой и аномальной дисперсии групповой скорости и обнаружено, что в области нормальной дисперсии импульс распадается на субимпульсы, в области нулевой ДГС происходит многократная керровская самофокусировка заднего фронта импульса, испытавшего дефокусировку в самонаведенной лазерной плазме. В условиях АДГС в филаменте формируются световые пули (СП) — экстремально сжатые волновые пакеты с высокой локализацией светового поля в пространстве и времени. При этом с увеличением энергии импульса образуется квазипериодическая последовательность световых пуль. В эксперименте впервые зарегистрировано образование световых пуль на длине волны 1800 нм. Минимальная длительность световой пули составляла около двух периодов осцилляций светового поля. Установлено, что сверхширение частотно-углового спектра излучения связано с сильной фазовой самомодуляцией светового поля в пространстве и во времени при формировании световых пуль.



Кроме того, в условиях аномальной дисперсии экспериментально зарегистрирована перекачка энергии начального импульса в коротковолновую (высокоэнергетическую) часть спектра суперконтинуума — образование в видимой полосе так называемого «антистоксова крыла», отделенного от области несущей длины волны широким минимумом, и измерены зависимости сдвига его максимума и коротковолновой отсечки от длины волны и ширины запрещенной зоны диэлектрика для кварца и фторидов. Полученные зависимости объяснены в рамках интерференционной модели, которая рассматривает световую пулю как широкополосный источник суперконтинуума, движущийся



в среде со скоростью, близкой к групповой скорости импульса. Было обнаружено, что с увеличением длины волны импульса максимум антистоксова крыла сдвигается быстрее, чем коротковолновая отсечка, приводя к уменьшению спектральной ширины крыла. Причина такой разницы следующая: формирование спектра определяется как нелинейным взаимодействием с веществом — самомодуляцией из-за керровской и плазменной нелинейности, так и линейной суперпозицией спектральных компонент СК, излучаемого СП на пути следования. Суперпозиция спектральных компонент СК зависит от дисперсионных свойств диэлектрика, и их распространение описывается линейным уравнением, что позволило теоретически получить закономерность, определяющую положение максимума антистоксова крыла суперконтинуума, излучаемого СП, для любого диэлектрика с известным законом дисперсии при АДГС. Установлено, что сдвиг максимума антистоксова крыла от центральной длины волны лазерного импульса в различных диэлектриках подчиняется дисперсионному уравнению, которое подтверждено для экспериментальных данных, полученных в различных научных коллективах.

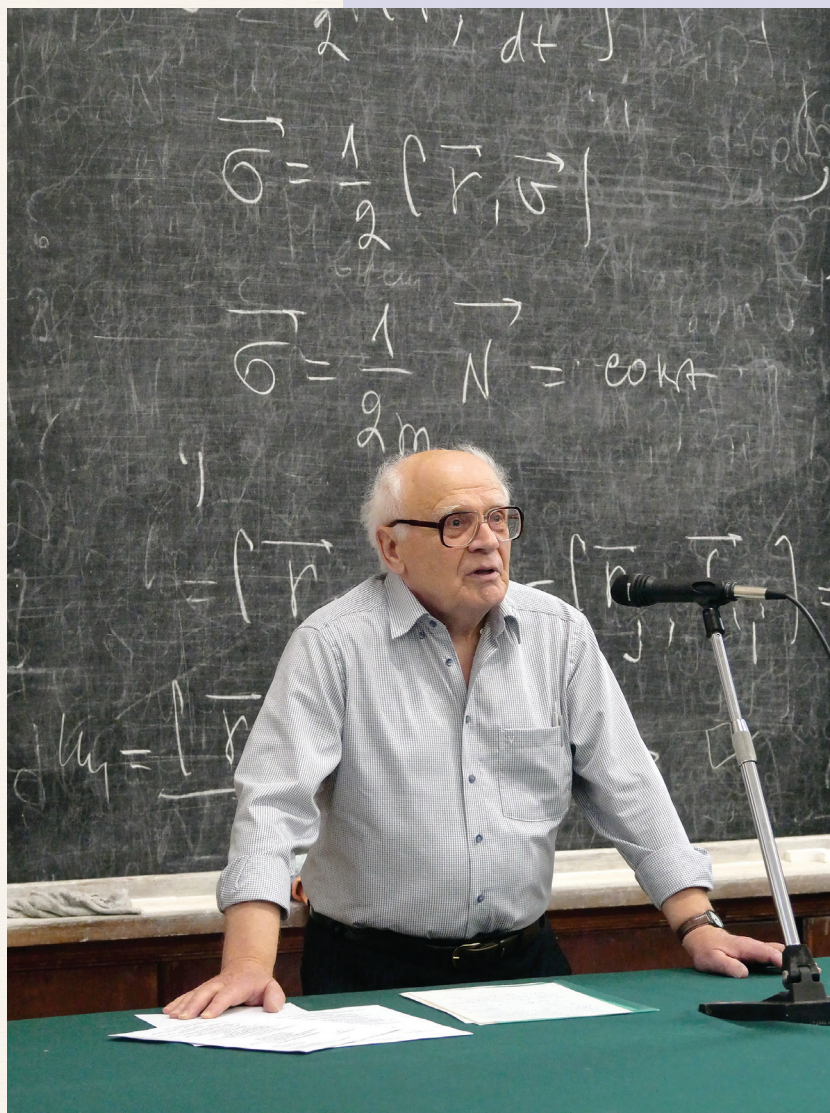
Коротковолновую отсечку антистоксова крыла определяет высокая скорость многофотонной ионизации плазмы, создаваемой задним фронтом СП, поэтому она сдвигается в сторону меньших длин волн с увеличением порядка многофотонности этого процесса. Впервые исследована трансформация спектра импульса среднего ИК диапазона и динамика изменения коротковолновой отсечки антистоксова крыла спектра при возрастании длины распространения импульса и формировании световой пули во флюориде кальция и плавленом кварце в условиях аномальной дисперсии групповой скорости.

....Значительная доля наших исследований была проведена с использованием кристаллов фторида лития, имеющего максимальную ширину запрещенной зоны среди всех прозрачных диэлектриков. Главной особенностью этого материала является возникновение в нем под действием мощных лазерных импульсов долгоживущих центров окраски, люминесцирующих в видимой области при облучении непрерывным лазером на 450 нм. Оказалось, что для получения люминесцирующего «следа» достаточно воздействия всего одного импульса. Это очень важный момент, т.к. таким методом (называемым методом лазерной колорации) мы можем «запечатлеть» картину лазерного поля одиноч-

ного импульса, отраженного в распределении центров окраски, и затем достаточно подробно ее исследовать.

Численным моделированием и экспериментом по регистрации сверх уширения спектра суперконтинуума и возникновения в нем изолированного антистоксова крыла, генерируемого световой пулей при образовании плазменного канала, подтверждено сжатие пули до близкого к одноциклового волнового пакета. Таким образом, впервые зарегистрирована световая пуля длительностью около одного периода колебаний светового поля и диаметром менее 10 мкм и измерена длина ее пробега, не превышающая 0.5 миллиметра для одноимпульсного режима.

В отдельной серии экспериментов было обнаружено, что одноциклового СП способны к полной пространственно-временной реконструкции в нелинейной диспергирующей среде после распространения через воздушный промежуток, а также при полном внутреннем отражении. Самовосстановление СП при филаментации фемтосекундного импульса на 1900 нм в образце плавленого кварца с воздушным зазором наблюдалось при ширинах зазора до 1 мм. Аналогичные результаты по самореконструкции СП после воздушного зазора и





после полного внутреннего отражения получены на 3200 нм в LiF. Численное моделирование показало, что возникновение расстояния, необходимого для реконструкции СП, связано с дифракционными потерями в зазоре, потерями в тонком слое возникающей плотной плазмы и потерями на излучение суперконтинуума. В экспериментах с воздушным зазором в плавленом кварце, проведенным на длине волны 800 нм в области нормальной ДГС, когда СП не образуются, наблюдалось самовосстановление филамента только для воздушных зазоров не более 100 мкм. При этом его спектр сильно сдвигается в красную сторону при увеличении длины филамента до зазора, что свидетельствует о возникновении потерь из-за спада интенсивности при расщеплении импульса на 2 субимпульса.

Масштабирование полученных результатов позволяет обобщить сформулированные закономерности на световые пули и их спектр в фемтосекундном излучении среднего ИК-диапазона при филаментации в газовых средах, и в частности, в атмосфере.

Это далеко не полный список результатов, полученных нами при руководящей роли В. П. Кандидова. Валера руководил всеми грантами РФФИ, а я — программой "Фемтооптика". И было много совместных поездок и выступлений на конференциях в Нижнем Новгороде, Ереване, Минске, Казани, Владимире, Светлогорске и в других местах. В последние 5 лет мы работали по гранту РНФ (с продолжением) уже под моим руководством. За все это время было совместно опубликовано более 50 статей, на которые имеется множество ссылок в работах признанных специалистов по нелинейной оптике. Надо отметить, что это количество публикаций примерно в полтора раза больше числа моих совместных публикаций с В. С. Летоховым, под руководством которого я проработал более 40 лет.

Наибольшее количество публикаций пришлось на последние 2 года работы по гранту РНФ, которая была очень напряженной. Ситуация усугублялась пандемией ковида и все возрастающим санкционным давлением. Обсуждать планы экспериментов и полученные результаты приходилось исключительно по электронной почте и по телефону, так что такие переговоры с Кандидовым велись практически ежедневно, иногда по несколько раз за день. Кроме того, Валере приходилось проводить такие сеансы связи с курируемыми им участниками гранта — С. А. Шленовым, Лизой Залозной и А. Е. Дормидоновым, не говоря уже о чтении лекций студентам и подготовке к ним. Наши обсуждения с ним порой шли довольно бурно, иногда даже на грани перехода на личности. Однако я не припомню случая, чтобы Валера хотя бы мысленно (а это всегда можно заметить) перешел к ненормативной лексике — эта привычка у него полностью отсутствовала. Он всегда пытался понять мою и подробно объяснить свою точку зрения на об-

суждаемые вопросы.

Валера удивительно уважительно относился к научной молодежи — своим студентам и аспирантам. А чтение лекций было для него просто святым делом. Даже в наиболее горячие периоды нашей работы — написание отчетов или текстов статей, когда детали приходилось обсуждать иногда по несколько раз за день по телефону и электронной почте (иногда одновременно), перед очередной лекцией, которую Валера собирался прочитать, по всем этим пунктам объявлялся антракт. "У меня лекция". Обычно это занимало пару дней, в которые Валеру нельзя было беспокоить ни по каким вопросам, даже сверхсрочным. И это потому, что он старался включить в свои лекции все последние, только что полученные результаты и сопроводить их красивыми понятными и доходчивыми картинками. Иногда Валера предлагал опубликовать результаты молодых сотрудников без нашего участия, и мы это делали неоднократно.

Меня всегда удивляла способность Валеры контактировать с самыми разнообразными людьми, причем не только на научных мероприятиях, где обмен мнениями просто предусмотрен самой их сутью, но и на любых встречах не столь официального характера. Люди ему были интересны, и потому с удовольствием беседовали с ним на разные темы. При этом Валере становились известны многие подробности жизни этих людей, о которых я даже не подозревал — вот такой у него был талант исследователя. Помимо широты научных познаний в своей области науки Кандидов имел универсальный набор чисто практического характера, охотно делился собственным опытом и часто давал полезные советы. У меня на даче Валера всегда подробно интересовался всеми приусадебными посадками, их состоянием и урожаем. При этом он квалифицированно объяснял не только вопросы сельского хозяйства, но и касающиеся электропроводки, водопроводных насосов, установки опорных столбов и др. Мы неоднократно с успехом пользовались его опытом.

Свой день рождения 12 мая Валера обычно не отмечал, а устраивал в начале лета на своей даче в Быково мероприятие, которое он называл "спортивным праздником". Здесь всегда ставился стол для настольного тенниса и натягивалась волейбольная сетка (а однажды даже играли в крокет). Рядом накрывался длинный стол под навесом и готовилось огромное количество разнообразных вкуснейших блюд при определяющем участии детей: Саши и Антона, с подключением также и внуков. Валера всегда, вплоть до последнего года, с азартом участвовал во всех соревнованиях, между которыми активно приносил тосты и предлагал разные блюда за столом. При завершении мероприятия очень внимательно следил, чтобы все гости были доставлены к станции электрички.



После крайне утомительной работы по завершению финального отчета по гранту к концу года возникло ощущение какой-то пустоты, безнадежной усталости и довольно унылое понимание того, что работа закончена, продолжения ее не предвидится и не очень понятно, чем теперь заниматься. Правда, мне, как руководителю гранта, было предложено написать книгу по полученным результатам. В начале нового года я позвонил Валере и сказал ему об этом предложении. Он сразу отказался, сказав, что очень устал и собирается после защиты своей аспирантки Лизы Залозной уйти на отдых. Похоже, что работа над этим 5-летним проектом его тоже сильно измотала, тем более что к концу последнего года ему пришлось переболеть ковидом.

Тем не менее, Кандидов, как всегда, очень активно и бодро встретил Новый год. Где-то в феврале позвонил мне и сказал, что вот у него проблемы со спиной, и он не может читать лекции. Потом вроде эта проблема решилась покупкой корсета, и не было никаких подозрений о назревающем страшном. В марте — высокая температура, больница и...

В это все еще трудно поверить — возраст возрастом, но Валера так любил жизнь, что вот так за каких-то три недели потерять ее — кажется просто абсурдом. У меня, наверное, около сотни фоток, на которых присутствует Валера. И ни на одной из них он не выглядит раздраженным, или грустным. Всегда светлая улыбка или радость по поводу того, что он собирается сообщить. Жизнь доставляла ему наслаждение в любых ее проявлениях, он никогда не пропускал возможности участия в веселых танцах, хоровом пении или даже вождении хоровода — и всегда с большим удовольствием. Всегда принимал активное участие в праздновании дня Победы на Ленгорах с исполнением советских песен коллективом ветеранов ССО под руководством Светы Литвиненко, а также в ежегодных встречах этого коллектива на даче С. Литвиненко в подмосковном Шугарово.

И вот таким он нам и запомнится...

*Проф., д.ф.-м.н. С.В. Чекалин*







## Владимир Ильич ТРУХИН (1933–2016)

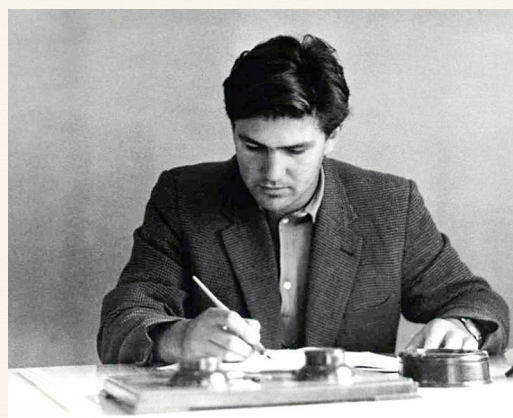
*В декабре 2023 года исполняется 90 лет со дня рождения выдающегося ученого-геофизика и организатора, доктора физико-математических наук, профессора физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова Владимира Ильича Трухина.*

*Владимир Ильич Трухин родился в Москве 29 декабря 1933 г. После окончания средней школы с золотой медалью в 1952 г он поступил на физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова. В. И. Трухин рано начал заниматься научной деятельностью по направлению Геофизика. Будучи студентом, он участвовал в первых в СССР палеомагнитных экспедициях: в дебрях Нижней Тунгуски (восточная Сибирь) он отбирал образцы древних траппов, в горах Армении — образцы древних вулканических пород. Первая его научная работа посвящена палеомагнитным исследованиям древних вулканических лав Сибири.*



*Выпускники. 1958 год. (третий справа В.И. Трухин)*

После окончания физического факультета МГУ он уехал на геофизическую станцию в поселке Борок, где был назначен исполняющим обязанности начальника этой станции, директором которой был легендарный Иван Дмитриевич Папанин.



*1960 год, и.о. начальника геофизической станции "Борок".*

В 1962 г. В. И. Трухин вернулся в Москву и начал работать и учиться в заочной аспирантуре в Энергетическом институте АН СССР им. Г. М. Кржижановского. Работая под руководством чл.-корр. АН СССР А. С. Предводителя над проблемами электрогазоразрядной плазмы, ему впервые удалось измерить давление и температуру за ударной волной. А. С. Предводителев предлагал В. И. Трухину защищать кандидатскую диссертацию по этой теме, однако ему хотелось вернуться в геофизику.

В 1964 г. академик В. В. Меннер приглашает В. И. Трухина на работу в Геологический институт АН СССР, где создавалась палеомагнитная лаборатория. Он участвовал в оборудовании этой лаборатории, проводил палеомагнитные измерения, а летом ездил в экспедиции.





*В экспедициях приходилось многому учиться и даже управлять трактором.*

В 1967 г. на физическом факультете МГУ В. И. Трухин защитил кандидатскую диссертацию, посвященную проблемам палеомагнетизма осадочных пород. Его результаты дали начало новому научному направлению в геомагнетизме — палеомагнетизму плейстоцена. В 1968 г. по приглашению заведующего кафедрой физики Земли, будущего академика В. А. Магницкого В. И. Трухин перешел работать на физический факультет МГУ. Успешно пройдя конкурс на должность ассистента кафедры физики Земли, он назначается заведующим геомагнитной лабораторией. В. И. Трухин занимается изучением физических механизмов образования остаточной намагниченности горных пород на доменном и решетчатом уровнях, понимая, что простое измерение остаточной намагниченности недостаточно для однозначных выводов о величине и направлении древнего магнитного поля Земли. Необходимо было рассмотреть вопросы о физическом механизме возможного изменения первичной остаточной намагниченности горных пород с течением времени. В. И. Трухин внес существенный вклад в понимание формирования вязкой остаточной намагниченности в горных породах. Им было выдвинуто новое представление о физических механизмах магнитной вязкости в горных породах на основе теории Л. Нееля о диффузионном магнитном последствии. Докторская диссертация В. И. Трухина на тему «Магнитное последствие в горных породах» (1974 г.) явилась закономерным итогом этих исследований. Выводы работы о преимущественно диффузионной природе вязкой намагниченности, о необходимости учитывать её роль в формировании остаточной намагниченности, встретили серьёзное сопротивление у некоторых академических палеомагнитологов. Последующие работы палеомагнитологов подтвердили правоту и важность учета этого механизма магнитной вязкости. Впоследствии В. И. Трухиным было показано, что магнитовязкие свойства можно также использовать для оценки условий формирования базальтов океанской коры.

Совместно с геологическим факультетом МГУ и институтом экспериментальной минералогии РАН В. И. Трухиным был проведен цикл работ по магне-



*Кафедра физики Земли физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, 1972 год (слева, направо, 1-ый ряд — Г. И. Петрунин, Л. Н. Рыкунов, Т. А. Проскуракова, В. А. Магницкий, В. А. Жилева, В. И. Трухин, В. Г. Попов. 2-ой ряд — В. И. Максимочкин, М. Е. Тарасова, М. В. Авдулов, Е. В. Воронина, В. С. Сергеев, Т. С. Зайдис, Л. Гайворонская, Е. Черепанова, С. П. Новиков).*

тизму кимберлитов и траппов. В образцах алмазных кимберлитов было обнаружено уникальное природное явление — намагничивание пород антипараллельно направлению намагничивающего поля (явление самообращения намагниченности). Установлено, что физическим механизмом самообращения намагниченности при неизменном направлении магнитного поля является самопроизвольная смена знака спонтанной намагниченности гематитов, входящих в состав кимберлита, при остывании породы. Изучена связь магнитных свойств кимберлитов с концентрацией в них алмазов, предложено использовать особенности магнитных свойств кимберлитов для экспресс-анализа их алмазности. В. И. Трухиным был написан большой цикл статей по этим проблемам и две монографии: «Магнетизм кимберлитов и траппов» и «Самообращение намагниченности природных пикроильменитов».

В. И. Трухиным впервые предложен метод исследования глобальной фундаментальной проблемы инверсий геомагнитного поля на основе исследования самообращения намагниченности горных пород. Теоретически и экспериментально показано, что самообращение намагниченности в ферромагнитных минералах горных пород может являться следствием строения и структуры ферромагнетиков, а наличие обратной остаточной намагниченности горных пород не всегда может быть интерпретировано как наличие обратной полярности геомагнитного поля Земли.

В. И. Трухин занимался и исследованиями магнетизма почв, которые как известно являются основой жизни для всего растительного и животного мира. Оказалось, что свойства почв, в том числе и их плодородие, существенно зависят от присутствующих в них магнитных минералов и их намагниченности. В частности, было обнаружено, что предварительное намагничивание почв приводит к ускорению в 1,5–2 раза



темпов роста растений, высаженных на этих почвах (авторское свидетельство «Способ ускорения роста растений»). По результатам исследования почв была опубликована коллективная монография «Магнетизм почв» (1995 г.).



*В магнитной лаборатории кафедры физики Земли, 1970 г.*

Одним из направлений научной деятельности В. И. Трухина на протяжении десятилетия было исследование магнетизма океанических горных пород. В лаборатории «Геомагнетизма», которую он создал на кафедре физики Земли, изучались магнито-минералогические свойства и остаточная намагниченность океанических базальтов со дна Атлантического, Тихого, Индийского океанов и Красного моря. В результате удалось внести существенный вклад в исследование эволюции океанской коры. Было установлено, что



20 млн назад подводные горы Императорского хребта (Тихий океан) сформировались на широте Гавайских островов, т.е. примерно на 1000 км южнее современного их положения. Показано, что в центральной части трансформного разлома Романш (центральная часть срединно-Атлантического хребта) в течение последних 0,78 млн. лет имеет место процесс растяжения океанской коры поперек простирания самого разлома.

Исследования магнитных свойств и состава титаномагнетитов базальтов Красного моря и базальтов Срединно-Атлантического хребта позволили выявить особенности формирования океанических рифтов на ранней стадии их развития, сделан вывод о более сложном характере образования и эволюции океанской коры в районе Красного моря, чем спрединговый.

В. И. Трухин внес существенный вклад в исследование влияния высоких давлений на магнитные свойства горных пород и пород внеземного вещества. Совместно с В. И. Максимочкиным, на основе результатов экспериментального лабораторного моделирования формирования термоостаточной намагниченности базальтов в стрессовых условиях, предложена модель магнитоактивного слоя океанской коры, учитывающая изменение с глубиной давления и температуры, получено распределение намагниченности с глубиной в океанской коре. Эти данные позволили с новых позиций подойти к интерпретации линейных магнитных аномалий в океанах. Также было показано, что тектоническое воздействие в зонах трансформных смещений оказывает существенное влияние на палеоинформативность остаточной намагниченности базальтов, а по изменению остаточной намагниченности базальтов при лабораторном воздействии сжатия можно судить о тектонических воздействиях, испытанных горными породами.

В. И. Трухин много лет сотрудничал с самым крупным университетом Франции (Aix-Marseille Université) и смежной с ним лабораторией CEREGE (г. Экс-ан-Прованс, Франция). Были успешно реализованы проект франко-русской аспирантуры Н. С. Безаевой (2005–2008 гг.) и франко-русский грант РФФИ «Влияние ударных воздействий и облучений на магнитные и спектроскопические свойства образцов вещества Солнечной системы». Изучено влияние гидростатических давлений, ударов и облучений на магнитные свойства, в том числе остаточную намагниченность, основных магнитных минералов земных и внеземных горных пород (камасит-тенит, магнетит, пирротин, титаномагнетиты разного состава, гётит и грейгит), а также марсианских метеоритов и лунного грунта, возвращённого советскими автоматическими межпланетными станциями «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24». Показано, что палеомагнитный сигнал марсианских метеоритов не является первичным и отражает сложную историю ударного метаморфизма вещества Марсианской коры; ударные воздействия и связанные с ними ударно-индуцированные темпера-



туры существенным образом влияют на естественную остаточную намагниченность метеоритов, тем самым стирая и/или переписывая их палеомагнитный сигнал. Экспериментально подтверждено, что облучение минералов протонами приводит к образованию радиационно-индуцированной остаточной намагниченности — новому виду остаточной намагниченности, ранее предсказанному в литературе.

3 августа 2016 года Владимира Ильича Трухина с нами не стало. За время научной карьеры им опубликовано более 300 научных статей, 8 монографий, 4 учебных пособия, в том числе монографии «Введение в магнетизм горных пород», «Геофизика дна Индийского океана», «Магнетизм кимберлитов и траппов», учебники «Ферромагнетизм минералов», «Общая физика твердой Земли», «Основы экологической геофизики», «Геомагнетизм и методы геомагнитных исследований» и др. В 2005 г. в серии «Классический университетский учебник» издан учебник «Общая и экологическая геофизика».

В. И. Трухин был действительным членом Международной Академии наук высшей школы и Общенациональной Академии знаний, лауреатом 2-х Ломоносовских премий за педагогическую и научную деятельность, был награжден орденами «Знак почёта», «Академическая пальмовая ветвь» (Франция), медалями «Ветеран труда» и «В память 850-летия Москвы», орденом Почёта.

В. И. Трухин успешно сочетал научную деятельность с подготовкой кадров и административной работой. Он подготовил 15 кандидатов и 7 докторов наук, был деканом физического факультета (1992–2011 гг.), заведовал кафедрой физики Земли (1992–2013 гг.), проректором МГУ по академической политике и организации учебного процесса (1996–2001 гг.). В. И. Трухин был разносторонней творческой личностью. В 2010 году был опубликован сборник его стихов.



*Декан физического факультета  
МГУ им. М.В. Ломоносова  
Владимир Ильич Трухин.*

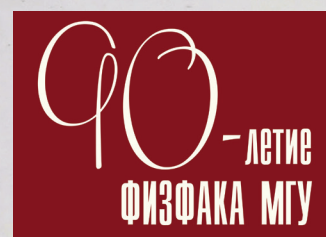


*Проректор МГУ им. М. В. Ломоносова Владимир Ильич  
Трухин на встрече “без галстуков”, 2001 год.*



*На деканском совещании. 2010 г.*





Бюллетень «НОВОСТИ НАУКИ».  
© 2023 Физический факультет МГУ.

ISSN 2500–2384

Главный редактор: В.В. Белокуров

Редакторы:  
П.А. Форш, В.Н. Задков, Н.Б. Баранова

Начальник отдела оперативной печати:  
Салецкая О.В.

Дизайн и верстка: И.А. Силантьева

Фотограф: С.А. Савкин

Подписано в печать 08.02.2024. Формат 60×90/8.  
Усл.-печ. л. 2.5 Бумага мелованная.

Тираж 150 экз.  
Физический факультет МГУ  
имени М.В.Ломоносова,  
119991, Москва ГСП-1,  
Ленинские горы, д. 1, стр. 2

