



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»



Основные результаты
научной деятельности

2024



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»



Основные результаты научной деятельности 2024

Гатчина • 2025

Научные редакторы:

В. В. Воронин
С. В. Саранцева
С. И. Воробьев
В. И. Максимов
Е. В. Москвин
А. В. Якиманский
А. В. Здравков

Составители:

Д. Н. Аристов	В. В. Саранцев
С. И. Воробьев	Ю. О. Скуркис
Н. Н. Губанова	А. В. Титов
Е. С. Деркачева	О. Л. Федин
А. Л. Коневега	С. Р. Фридман
А. И. Курбаков	К. А. Шабалин
Р. А. Ниязов	В. М. Шахова

Ответственный за выпуск

С. И. Воробьев

Основные результаты научной деятельности – 2024. –

Гатчина Ленинградской обл.: Издательство

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2025. – 204 с.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 2024 г. Помимо аннотации для каждого результата в сборнике приведены ссылки на статьи ведущих отечественных и зарубежных изданий, в которых работа описана детально и где можно подробно ознакомиться с ее содержанием.

ISBN 978-5-86763-494-0

© НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2025

Оглавление

7	Введение
11	Научные подразделения
39	Теоретическая и математическая физика
51	Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов
61	Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино
73	Биологические исследования
85	Ядерная медицина
97	Исследования полимеров
117	Химия неорганических материалов и гибридных органо-неорганических систем
129	Прикладные исследования и разработки
147	Физика ядерных реакторов и ускорителей
161	Базовые установки
173	Научно-организационная деятельность



Уважаемые коллеги, дорогие друзья!

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – крупнейший многопрофильный научный центр России, осуществляющий комплекс фундаментальных и прикладных исследований широкого спектра направлений, входящий в состав Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Согласно указу Президента Российской Федерации «О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации», а также в рамках мероприятий национального проекта «Наука и университеты» и Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации на 2019–2027 гг. в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ реализуются проекты на уникальной научной установке класса «мегасайенс» – реакторе ПИК. В 2024 г. в соответствии с Программой ввода исследовательской ядерной установки ПИК в эксплуатацию изготовлены и поставлены на реакторный комплекс ПИК первый серийный комплект ТВС ПИК-2, макеты ТВС ПИК-2, а также твэлы и СВП-свидетели. Активно продолжались работы по изготовлению и поставке научных станций на реакторный комплекс ПИК.

В этом году в рамках создания новейшего отечественного Научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины НИЦ «Курчатовский институт» на базе действующего циклотрона Ц-80 активно продолжались работы по созданию онкоофтальмологического комплекса (проект «Око») для пациентов Северо-Западного региона России и других регионов страны с внутриглазными опухолями, опухолями орбиты, поверхностно расположенными опухолями головы и шеи, а также по созданию инновационного радиоизотопного комплекса (проект «Изотоп») для наработки широкого спектра медицинских радионуклидов для диагностики и терапии онкологических заболеваний, болезней системы кровообращения, болезней нервной системы и иных заболеваний.

Многолетние традиции, уникальные научный, технологический и кадровый потенциал – вот показатели высочайшего профессионализма, энергии и любви к своему делу мощной команды Курчатовского института – одного из крупнейших и признанных в мире исследовательских центров России, ведущего фундаментальные и прикладные исследования в различных областях.

Пусть и в дальнейшем работа высококвалифицированных специалистов, профессионалов своего дела, способствует процветанию и развитию российского государства и отечественной науки.



Президент НИЦ «Курчатовский институт» Михаил Валентинович Ковальчук



Введение

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Институт) – многопрофильный научный центр, ведущий фундаментальные и прикладные исследования в области физики элементарных частиц и высоких энергий, ядерной физики, физики конденсированного состояния, молекулярной и радиационной биофизики.

В 2024 г. в связи с реорганизацией Института, проведенной в соответствии с приказом НИЦ «Курчатовский институт» (Центр) от 06.12.2023 № 3980 «О реорганизации Федерального государственного бюджетного учреждения „Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института высокомолекулярных соединений Российской академии наук» два последних института преобразуются в Филиалы НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в соответствии с Уставом Института, утвержденным приказом Центра от 05.06.2024 № 1729 «Об утверждении Устава федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». В 2024 г. в стенах Института трудились около 2 500 человек, из них около 650 научных сотрудников, более 120 докторов наук и 390 кандидатов наук. Два сотрудника – действительные члены Российской академии наук (РАН) и шесть сотрудников являются членами-корреспондентами РАН.

В составе Института функционируют семь основных научных подразделений:

- Отделение теоретической физики;
- Отделение нейтронных исследований;
- Отделение физики высоких энергий;
- Отделение перспективных разработок;
- Отделение молекулярной и радиационной биофизики;
- Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС;
- Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС.

Программа научных исследований на долгосрочный и краткосрочный периоды изложена в Программе деятельности НИЦ «Курчатовский институт» и в Тематическом плане по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам в рамках исполнения государственного задания.

В Институте работают и создаются базовые установки для физических исследований. Ядерный реактор ВВР-М, построенный в 1959 г., с 31 декабря 2015 г. находится в режиме длительного останова. На нем долгое время велись фундаментальные и прикладные исследования в области ядерной физики, физики конденсированного состояния, радиационного материаловедения, радиобиологии, наработка радионуклидов для медицинских и технических целей. Протонный синхроциклотрон СЦ-1000, запущенный в ноябре 1967 г., не теряет своей значимости по сей день. Отмечается растущий интерес к протонным пучкам с энергией 100–1 000 МэВ среди исследователей РФ. На изохронном циклотроне Ц-80 выполнялись работы по созданию радиоизотопного комплекса «Изотоп» для развития методов наработки радионуклидов и получения широкого спектра радиоизотопов для диагностики и терапии онкологических, сердечно-сосудистых, неврологических и офтальмологических заболеваний, а также работы по строительству онкоофтальмологического комплекса «Око» для лечения злокачественных новообразований глаза и орбиты.

В 2024 г. продолжались работы по реализации инвестиционных проектов по модернизации и реконструкции инженерно-технических систем реакторного комплекса ПИК (РК ПИК). Безусловно, этот год стал важным этапом на пути создания РК ПИК: изготовлен и поставлен на реакторный комплекс первый эксплуатационный комплект ТВС ПИК-2.

Активно велись работы по изготовлению и поставке экспериментальных станций на РК ПИК. Перед НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ по-прежнему стоит амбициозная задача по реализации проекта мирового уровня – создание на базе высокопоточного исследовательского реактора ПИК Международного центра нейтронных исследований (МЦНИ).

Высокопоточный исследовательский реактор ПИК предназначен для проведения широкого круга работ в области ядерной физики и физики элементарных частиц, физики конденсированного состояния, материаловедения, структурной и радиационной биологии и биофизики, радиационной физики и химии, а также для решения прикладных технических задач. Успеш-



ная реализация данного проекта позволит России занять одно из ведущих мест на мировых рынках оказания высокотехнологичных услуг по использованию нейтронных и ядерных методов в разработке новых материалов и изделий, даст эффективный способ изучения свойств вещества и создания новых материалов.

МЦНИ позволит удовлетворить спрос в проведении нейтронных исследований всех заинтересованных потребителей – не только России и стран СНГ, но и других зарубежных стран. В состав МЦНИ вошли представители таких стран, как Беларусь, Узбекистан, Иран и др.

В рамках мероприятия федерального проекта «Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров» национального проекта «Наука и университеты» по созданию новейшего отечественного Научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины НИЦ «Курчатовский институт» на базе действующего циклотрона Ц-80 проводятся следующие работы:

- модернизация (создание) онкоофтальмологического комплекса (проект «Око») для пациентов Северо-Западного региона России и других регионов страны с внутриглазными опухолями, опухолями орбиты, поверхностно расположенными опухолями головы и шеи;

- создание инновационного радиоизотопного комплекса (проект «Изотоп») для наработки широкого спектра медицинских радионуклидов для диагностики и терапии онкологических заболеваний, болезней системы кровообращения, болезней нервной системы и иных заболеваний.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, включая Филиалы, ведется подготовка кадров высшей квалификации по программам высшего образования – программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по группам научных специальностей «Физические науки», «Биологические

науки», «Химические науки» и «Химические технологии, науки о материалах, металлургия». Всего на конец 2024 г. в аспирантуре обучались 62 человека.

В лабораториях Института в 2024 г. выполняли учебно-исследовательские и научные работы, проходили практику, готовили выпускные квалификационные работы бакалавров и специалистов, а также магистерские диссертации более 390 студентов вузов страны.

Также особое внимание НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ уделяет просветительской и образовательной деятельности среди населения г. Гатчины и Гатчинского муниципального района, стремясь популяризировать науку, заинтересовать молодежь в получении профильного физического и биологического образования, занимается организацией и проведением экскурсий на научные объекты Института, участвует в профориентационной работе со школьниками старших классов, проводит научно-популярные лекции, семинары и мастер-классы на различных площадках города и района, ведет практические занятия в течение каждого учебного года в Научно-образовательном центре по углубленному изучению предметов естественно-научного цикла, активно вовлекает детей в проект «Молодые таланты», что, несомненно, способствует развитию интеллектуального потенциала города.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных и значимых результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, полученных в 2024 г. Это описание предваряют обзоры руководителей научных Отделений и Филиалов основных направлений деятельности Института. Далее приведены аннотации работ, представление которых обсуждено и рекомендовано учеными советами Отделений. Помимо аннотации для каждого результата в сборнике приведены ссылки на статьи ведущих отечественных и зарубежных изданий, в которых работа описана детально и где можно ознакомиться с ее полным содержанием.

Результаты работ сотрудников Института в 2024 г. опубликованы в более чем 1200 статьях, представлены в более 600 докладах на более чем 150 международных и российских конференциях.

В заключительном разделе дана общая информация об Институте.



Директор НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
С. Е. Горчаков

**Физика высоких
энергий**

**Молекулярная
и радиационная
биофизика**

**Нейтронные
исследования**

**Перспективные
разработки**

**Теоретическая
физика**

**Филиал НИЦ «Курчатовский
институт» – ПИЯФ – ИХС**

**Филиал НИЦ «Курчатовский
институт» – ПИЯФ – ИВС**



Научные подразделения

- 12** Отделение теоретической физики
- 14** Отделение нейтронных исследований
- 19** Отделение физики высоких энергий
- 23** Отделение перспективных разработок
- 28** Отделение молекулярной и радиационной биофизики
- 31** Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС
- 35** Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

Отделение теоретической физики

Отделение теоретической физики (ОТФ), руководитель д. ф.-м. н. Д. Н. Аристов, состоит из 6 секторов:

- квантовой теории поля (заведующая – к. ф.-м. н. А. Н. Семенова);
 - теории сильных взаимодействий (заведующий – к. ф.-м. н. К. М. Семенов-Тянь-Шанский);
 - феноменологии частиц (заведующий – д. ф.-м. н. А. В. Саранцев);
 - физики высоких энергий (заведующий – д. ф.-м. н. А. В. Юнг);
 - теории конденсированного состояния (заведующий – д. ф.-м. н. Д. Н. Аристов);
 - теоретической ядерной и атомной физики (заведующий – д. ф.-м. н. А. В. Нефедов)
- и группы теории ядерных реакторов (руководитель – к. ф.-м. н. М. С. Онегин).

В ОТФ работают 49 научных сотрудников, из них 17 докторов наук и 21 кандидат наук.



Д. Н. Аристов,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

Исследования, проводимые в ОТФ, охватывают большинство областей современной теоретической физики: от квантовой теории поля и физики

элементарных частиц до физики ядерных реакторов.

Традиционной темой исследований в ОТФ является изучение рассеяния при высоких энергиях. Среди новых результатов, полученных в 2024 г., можно отметить работу В. Е. Бунакова об усилении эффектов P - и T -нарушения в пропускании нейтронов. Сравнивая два теоретических подхода к описанию этих эффектов, автор делает выбор в пользу одного из них, что означает конкретные рекомендации для эксперимента.

Группа А. В. Юнга ранее, обсуждая проблему конфайнмента, изучала суперсимметричную четырехмерную квантовую хромодинамику (КХД) с неабелевыми струнами. В такой теории с массивными кварками на поверхности струны возникает $CP(N - 1)$ -модель с нарушенной суперсимметрией. В новой работе проведен анализ

эффективного действия в двумерной массивной $CP(N - 1)$ -модели. Показано наличие двух фаз, разделенных фазовым переходом второго рода, в зависимости от параметра массовой деформации теории.

Данные по глубоконеупругому комптоновскому рассеянию в группе К. М. Семенова-Тянь-Шанского предложено анализировать с использованием проекций Грибова – Фруассара. Такой подход помогает в методе обобщенных партонных распределений, позволяя сформулировать набор правил сумм. Эти правила сумм интересно проверить на согласованность с феноменологическими моделями и расчетами в решеточной КХД.

Среди работ ОТФ в области теории конденсированного состояния можно отметить статьи, посвященные наноустройствам и наночастицам. В группе ПИЯФ – ФТИ (Д. Н. Аристов, Р. А. Ниязов и др.) продолжено теоретическое изучение геликоидальных краевых состояний топологических изоляторов. Показано, что для геометрии колец Ааронова – Бомы анализ дробового шума дает дополнительную информацию о таких нанообъектах и позволяет отличить те из них, которые являются топологически нетривиальными.

Детальное теоретическое описание рамановского рассеяния света на наночастицах проведено в цикле работ А. Г. Яшенкина с соавторами. В последних работах ими была предложена упрощенная модель, которая адекватно и с хорошей

точностью воспроизводит оптические спектры наночастиц. Показано, что в данном подходе можно извлекать полезную информацию о структуре изучаемых сред.

Сотрудниками ОТФ в 2024 г. опубликованы 49 исследовательских работ в рецензируемых

журналах Web of Science и Scopus, представлен 41 доклад на международных и российских конференциях, прочитаны 8 курсов лекций в Санкт-Петербургском государственном университете и Национальном исследовательском университете «Высшая школа экономики».

Отделение нейтронных исследований

Отделение нейтронных исследований (ОНИ), руководитель – д. ф.-м. н. А. И. Курбаков, состоит из 4 отделов.

Отдел нейтронной физики (заведующий – член-корреспондент РАН д. ф.-м. н. А. П. Серебров) состоит из 4 лабораторий:

- физики нейтрона (заведующий – член-корреспондент РАН д. ф.-м. н. А. П. Серебров);
- рентгеновской и гамма-спектроскопии (заведующий – д. ф.-м. н. В. В. Федоров);
- ядерной спектроскопии (заведующий – д. ф.-м. н. В. Г. Зиновьев);
- молекулярных и атомных пучков (заведующий – к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов).

Отдел исследований конденсированного состояния (заведующий – к. ф.-м. н. И. А. Зобкало) состоит из 4 лабораторий:

- физики неупорядоченного состояния (заведующая – к. х. н. Н. Н. Губанова);
- физики кристаллов (заведующий – к. ф.-м. н. Ю. П. Черненко);
- исследования материалов (заведующий – д. ф.-м. н. А. И. Курбаков);
- нейтронных физико-химических исследований (заведующий – д. ф.-м. н. В. Т. Лебедев)

и группы электромагнитных свойств конденсированных сред (руководитель – к. ф.-м. н. О. В. Геращенко).

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов (руководитель – д. ф.-м. н. А. В. Дербин).

Отдел научно-технического обеспечения эксперимента (руководитель – В. А. Поляков).

В ОНИ работают 106 научных сотрудников, из них 13 докторов наук и 47 кандидатов наук.



А. И. Курбаков,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

В современном мире нейтронные исследования играют незаменимую роль в генерации знаний, обеспечивающих научно-техническое раз-

витие. Они направлены как на решение фундаментальных задач в физике ядра и элементарных частиц, физике конденсированного состояния, материаловедении, так и в области прикладных исследований, результаты которых используются в энергетике, науках о жизни, изучении культурного наследия, а также в разнообразных промышленных и энергетических программах. В настоящее время нейтронное рассеяние как экспериментальный метод все больше применя-

ется в новых направлениях, включая здравоохранение и продовольствие. Нейтронные методы продолжают оставаться мощным современным инструментом для изучения новых материалов, которые требуются для всех ключевых технологий: от информационных технологий и возобновляемых источников энергии до экологически чистых транспортных систем и биосовместимых медицинских приложений.

Несомненно, что нейтронная наука будет играть ключевую роль в исследовательских проектах будущего, внося значительный вклад в научные открытия, создание инновационных направлений развития общества. Наличие высокопоточного источника нейтронов – реактора ПИК – с оптимизированным набором экспериментальных станций является значительным, а для некоторых направлений определяющим вкладом в решение задач научно-технологического развития страны. Экспериментальный комплекс реактора ПИК позволяет реализовать большинство исследований по направлениям развития науки, технологий

и техники в Российской Федерации и обеспечить платформу для технического развития.

В 2024 г. коллективом ОНИ выполнялось научное сопровождение создания и доведения до эксплуатационной готовности экспериментальных установок по физике конденсированного состояния: порошковых дифрактометров D1, D3, монокристалльного дифрактометра DC1, трехосных спектрометров IN1, IN2, IN3, спин-эхо-спектрометра SEM, установок малоуглового рассеяния нейтронов «Мембрана» и «Тензор», установки спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов SESANS, рефлектометров Sonata и Harmony. Для всех указанных станций, за исключением станций Sonata и Harmony, генеральным подрядчиком выступает компания ООО «РАОТЕХ». Для станций Harmony и Sonata генеральным подрядчиком является компания «Вест Инжиниринг».

ОНИ также активно участвует в создании лабораторного комплекса для проведения исследований по физике фундаментальных взаимодействий с использованием ультрахолодных нейтронов (УХН). Строящийся уникальный источник УХН на основе сверхтекучего гелия позволит получить рекордную интенсивность и плотность УХН на выходе из источника, что обеспечит высокую чувствительность и точность измерений в экспериментальных установках с длительным хранением УХН в ловушках. Прецизионные исследования распада нейтрона позволят изучать отклонения от Стандартной модели на более высоком уровне точности, что очень важно для теории.

ОНИ является ответственным исполнителем в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ трех тематических направлений. В рамках направления 2 «Исследования с использованием синхротронного излучения, нейтронов и в условиях сильных световых полей» Отделение выполняет фундаментальные исследования в области физики конденсированного состояния с использованием рассеяния нейтронов, мюонов, рентгеновского и синхротронного излучения. В направлении 7 «Развитие ядерных технологий для создания атомной энергетики нового поколения» ОНИ реализует создание приборной базы для экспериментальных исследований на реакторе ПИК. В направлении 10 «Исследования

и разработки в области физики элементарных частиц, атомного ядра и физики высоких энергий, математической и теоретической физики» Отделение проводит экспериментальные исследования с реакторными нейтронами и нейтрино, в сферу научной деятельности в направлении 10 также входит физика ядра и элементарных частиц.

2024 год был довольно успешным в научном плане. Научные группы, в которых сотрудники ОНИ были основными исполнителями, получили одну первую, три вторые и две третьи премии на конкурсе лучших работ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

Успешным 2024 г. оказался в плане защит диссертаций. Сотрудники ОНИ защитили две кандидатские диссертации (А. Н. Матвеева и Р. М. Самойлов).

Кроме основных работ по выполнению тематического плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ велись научные исследования в рамках 10 проектов Российского научного фонда, в которых руководителями были ученые из ОНИ. Отделение организовало и провело VII Собрание по неупругому рассеянию нейтронов («Спектрина-2024»).

В области исследований фундаментальных свойств материи в 2024 г. учеными ОНИ совместно с коллегами получено достаточно много новых важных результатов.

В научном направлении физики конденсированных состояний с применением различных методов исследований, в т. ч. с использованием нейтронного рассеяния разного типа, других разнообразных физических методик, численного моделирования и теоретических расчетов, получены следующие основные результаты.

Продолжались исследования замещенных мультиферроиков $\text{Nd}(\text{Tb})\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$. Методами нейтронографии на монокристаллах и магнитометрии обнаружен необычный многоступенчатый spin-flip/spin-flop-переход в магнитном поле в замещенных мультиферроиках-ферроборатах $\text{Nd}(\text{Tb})\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$. Показано, что такое поведение может быть обусловлено небольшим отклонением изинговской оси Tb от легкой оси c, что предполагает локальное понижение симметрии во-

круг иона Tb^{3+} , как в чистом $TbFe_3(BO_3)_4$. При этом окружение Nd^{3+} остается более симметричным, как в $NdFe_3(BO_3)_4$. Такой сценарий реализуется в $Nd(Tb)Fe_3(BO_3)_4$, поскольку ионы Tb^{3+} имеют меньший ионный радиус, чем Nd^{3+} . Выигрыш в энергии решетки за счет локального искажения вокруг ионов Tb^{3+} приводит к появлению неэквивалентных позиций Tb с разной ориентацией моментов по отношению к обменному полю при сохранении общей кристаллической симметрии, что приводит к нестабильности магнитного порядка во внешнем поле и появлению сложного двухступенчатого spin-flip-перехода (лаборатория физики кристаллов, д. ф.-м. н. И. В. Голосовский, зав. лаб. – к. ф.-м. н. Ю. П. Черненко).

Проведено подробное и всестороннее изучение структурных и магнитных свойств соединения $SmCrTiO_5$, члена семейства RM_2O_5 , со смесью переходных металлов Cr^{3+} и Ti^{4+} , один из которых, d_0 -ион Ti^{4+} , имеет нулевой магнитный момент. Исследования проведены температурно-зависимыми методами рентгеновской, синхротронной и нейтронной порошковой дифракции и измерениями температурных и полевых зависимостей намагниченности. Установлено, что катионы Cr^{3+} и Ti^{4+} имеют выраженное предпочтение к различным кристаллографическим позициям, образуя две подрешетки. Предложена модель спинового упорядочения в основном состоянии: одномерные гейзенберговские цепочки Cr^{3+} вдоль оси c . Взаимодействие между цепочками либо слабое, либо фрустрированное, что исключает дальний порядок вплоть до низких температур. При этом внутрицепочечная антиферромагнитная связь является сильной (лаборатория исследования материалов, А. Е. Суслопарова, зав. лаб. – д. ф.-м. н. А. И. Курбаков).

Методом монокристалльной дифракции нейтронов выполнены исследования влияния внешнего поля в редкоземельном ортоферрите – мультиферроике и магнитокалоरिकе $TmFeO_3$. Экспериментальные данные были получены на дифрактометре D23 (Институт им. Лауэ – Ланжевена) в температурном диапазоне $T = 4\text{--}100\text{ K}$ и в диапазоне магнитных полей $B = 0\text{--}6\text{ Тл}$. На основании полученных результатов построены магнитные фазовые диаграммы для двух направлений внешнего магнитного поля: вдоль осей b

и c (лаборатория физики кристаллов, к. ф.-м. н. А. К. Овсяников, зав. отделом – к. ф.-м. н. И. А. Зобкало).

С помощью метода малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов (МУРПН) и ряда дополнительных методов анализа (рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии, низкотемпературной адсорбции азота) было проведено сравнительное комплексное исследование структуры нанопорошков ряда «магнетит – маггемит», полученных методом соосаждения из водных растворов и золь-гель-методом. Установлено, что полученные нанопорошки оксида железа представляют собой пористые системы, которые в зависимости от метода синтеза имеют одноуровневую, двухуровневую (для порошков, полученных водным синтезом) или трехуровневую (для порошков, полученных золь-гель-методом) иерархическую организацию структуры с разными масштабами и разными типами агрегации для каждого из структурных уровней, а характерный размер для большего уровня в обоих случаях составляет $> 45\text{ нм}$. Анализ данных МУРПН показал, что магнитная структура полученных порошков оксида железа независимо от метода синтеза состоит из суперпарамагнитных частиц с характерным размером магнитных флуктуаций $R_M \sim 4\text{ нм}$ и радиусом магнитно-ядерных корреляций $R_{MN} \sim 3\text{ нм}$ для порошков, полученных золь-гель-методом, и $R_M \sim 5\text{--}11\text{ нм}$ и $R_{MN} \sim 4\text{--}8\text{ нм}$ для порошков, полученных соосаждением из водных растворов (лаборатория физики неупорядоченного состояния, Г. П. Копица, зав. лаб. – к. х. н. Н. Н. Губанова).

Исследованы механизмы формирования ионных каналов для разработки количественных моделей описания структуры ионных каналов в мембранах перфторированных сополимеров и механизма ионного обмена при насыщении мембран ионами металла (Fe^{3+}) с использованием малоуглового синхротронного рассеяния (SAXS, спектрометр БиоМУР, Казахстанский институт стратегических исследований) и резонансной γ -спектроскопии на оригинальном приборе НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Показано, что ионные группы полимера создают линейные каналы типа инвертированных мицелл, собранных в пучки. Ионный обмен в мембранах

происходит за счет взаимодействий внедренных ионов Fe^{3+} , организованных в димеры с гидратными оболочками и связанных с четырьмя SO_3 -группами. Эти структуры определяют функциональные свойства мембран из перфторированных полимеров (лаборатория нейтронных физико-химических исследований, зав. лаб. – д. ф.-м. н. В. Т. Лебедев).

Все выполненные исследования являются продолжением и развитием традиционных для ОНИ работ, связанных с исследованиями по физике конденсированного состояния.

В области ядерной физики в 2024 г. учеными ОНИ также получен целый ряд новых важных результатов.

В связи с предположением, что стерильные нейтрино являются правыми нейтрино, проведен анализ современной экспериментальной ситуации в распаде нейтрона на предмет правых токов. В результате анализа обнаружено, что имеется указание на существование правого векторного бозона W_R с массой $M_{W_R} = 304^{+28}_{-22}$ ГэВ и углом смешивания с W_L $\zeta = -0,038 \pm 0,014$. Показано, что этот результат не противоречит экспериментам на коллайдерах по поиску гипотетического векторного бозона. Создание установки «Бета-распад нейтрона» на реакторе ПИК нацелено в том числе на проверку возможности расширения Стандартной модели дополнительным калибровочным векторным бозоном W_R с малым смешиванием с левым векторным бозоном W_L (лаборатория физики нейтрона, зав. лаб. – д. ф.-м. н. А. П. Серебров).

Проведены работы по поиску аксиоэлектрического эффекта в атомах криптона для солнечных аксионов, частиц – кандидатов на темную материю, в реакции аксиоэлектрического эффекта, который является аналогом фотоэффекта, путем анализа энергетического спектра, измеренного большим пропорциональным Kr-счетчиком, размещенным в низкофоновой установке Баксанской нейтринной обсерватории. Для накопленной в эксперименте статистики аксионный сигнал не обнаружен, что позволило установить новые верхние пределы на константы связи аксиона с фотонами, электронами и нуклонами и массу аксиона. В результате получены новые ограничения на константу связи аксиона

с электроном $|g_{Ae}| \leq 4,9 \cdot 10^{-11}$ и на произведение констант связи с электроном и фотоном $|g_{Ae} g_{Ay}| \leq 1,6 \cdot 10^{-19}$ ГэВ⁻¹ (90 % у. д.) (отдел полупроводниковых ядерных детекторов, к. ф.-м. н. И. С. Драчнев, зав. отделом – д. ф.-м. н. А. В. Дербин).

В ходе проведения Ga-Ge-экспериментов SAGE, GALLEX, BEST был обнаружен 20%-ный дефицит регистрации потока нейтрино (галлиевая аномалия), что может свидетельствовать об осцилляции некоторых нейтрино в стерильное состояние. Возможны и альтернативные объяснения Ga-аномалии, одно из них – неточное определение величины периода полураспада изотопа ^{71}Ge . $T_{1/2}(^{71}\text{Ge}) = 11,43 \pm 0,03$ дня – это современное табличное значение, но при $T_{1/2}(^{71}\text{Ge}) = 13,5$ дня галлиевая аномалия аннулируется. Проведены измерения времени жизни ядра ^{71}Ge с помощью Si(Li)-детектора производства отдела полупроводниковых детекторов ОНИ с целью проверки возможного объяснения галлиевой аномалии. Источник ^{71}Ge получен в ходе $(n, 2n)$ -реакции при облучении природного Ge на ускорителе НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Определенный период полураспада ^{71}Ge согласуется с табличным значением и результатами недавних измерений. При этом статистическая неопределенность наших измерений меньше, чем было заявлено для предыдущих результатов. Таким образом, объяснение Ga-аномалии недооценкой периода полураспада ^{71}Ge исключается на уровне выше 10σ (отдел полупроводниковых ядерных детекторов, к. ф.-м. н. М. В. Трушин, зав. отделом – д. ф.-м. н. А. В. Дербин).

Современные квантово-механические расчеты позволяют точно учитывать корреляции электронов, но не учитывают КЭД-эффекты. С другой стороны, прямые КЭД-расчеты не учитывают корреляции. Мы провели прямые расчеты КЭД-поправок для многих переходов нескольких атомов и ионов и выяснили, что результаты этих расчетов хорошо аппроксимируются модельным КЭД-потенциалом Шабаева, Тупицына и Ерохина. Этот модельный потенциал легко вставляется в квантово-механический расчет. Тем самым удастся одновременно учесть и электронные корреляции, и основные КЭД-поправки. Таким образом, был проведен прецизионный расчет

$E1$ -амплитуд в ионах железа Fe^{16+} и никеля Ni^{18+} и показано, что КЭД-поправки к $2p-3d$ -переходам за счет корреляций усилены более чем на порядок и превосходят аналогичные поправки к $2p-3s$ -переходам. Предложенный метод расчета $E1$ -амплитуд с учетом электронных корреляций и КЭД-поправок пригоден для широкого круга многоэлектронных атомов и ионов. Для таких прецизионных расчетов нами разработан пакет программ. Пакет адаптирован для параллельных вычислений, выложен в открытый доступ и описан в статье *Cheung C., Kozlov M.G., Porsev S.G. et al. // Comput. Phys. Commun. 2025. V. 308. P. 109463* (лаборатория молекулярных

и атомных пучков, д. ф.-м. н. М. Г. Козлов, зав. лаб. – к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов).

Другие оригинальные результаты исследований ученых ОНИ, опубликованные в 2024 г., представлены в данном сборнике в виде отдельных статей.

Сотрудниками ОНИ в 2024 г. опубликованы 60 научных статей в рецензируемых журналах (в т. ч. 53 статьи, зарегистрированные в системе Web of Science и Scopus), получены 3 свидетельства о государственной регистрации специализированных программ, защищены 2 кандидатские диссертации.

Отделение физики высоких энергий

Отделение физики высоких энергий (ОФВЭ), руководитель – д. ф.-м. н. О. Л. Федин, состоит из 9 лабораторий:

- физики элементарных частиц (заведующий – д. ф.-м. н. В. Т. Ким);
- релятивистской ядерной физики (заведующий – к. ф.-м. н. Ю. Г. Рябов);
- короткоживущих ядер (заведующий – к. ф.-м. н. В. Н. Пантелеев);
- мезонной физики (заведующий – к. ф.-м. н. С. И. Воробьев);
- кристаллооптики заряженных частиц (заведующий – к. ф.-м. н. Ю. М. Иванов);
- адронной физики (заведующий – д. ф.-м. н. О. Л. Федин);
- физики экзотических ядер (и. о. заведующего – к. ф.-м. н. Ю. И. Гусев);
- барионной физики (заведующий – к. ф.-м. н. А. А. Дзюба);
- криогенной и сверхпроводящей техники (заведующий – к. ф.-м. н. А. А. Васильев)

и 3 научно-технических отделов:

- радиоэлектроники (руководитель – к. ф.-м. н. В. Л. Головцов);
- детекторов излучения (руководитель – к. ф.-м. н. Д. С. Ильин);
- вычислительных систем (руководитель – А. Е. Шевель).

В ОФВЭ работают 92 научных сотрудника, из них 13 докторов наук и 46 кандидатов наук.



О. Л. Федин,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

Основными направлениями деятельности Отделения ОФВЭ являются экспериментальные исследования в области физики элементарных частиц и ядерной физики. Также в Отделении ведутся прикладные работы по разработке инновационных методов получения радиоизотопов для медицинских применений и исследования магнитных свойств материалов μ SR-методом. ОФВЭ выполняет научные исследования, используя установки, имеющиеся в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, и участвует в фундаментальных исследованиях, проводимых в передовых мировых ускорительных центрах.

Синхроциклотрон НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ СЦ-1000 – единственный действующий в России протонный ускоритель про-

межуточных энергий, объединяющий в удобном энергетическом диапазоне интересы ядерной физики и физики элементарных частиц, – по-прежнему остается базовой установкой для Отделения. Для надежной работы синхроциклотрона требуется глубокая модернизация его систем, т. к. за период эксплуатации начиная с 1967 г. существенной модернизации их не проводилось.

Совместно с ускорительным отделом Отделения перспективных разработок ОФВЭ разработало проект программы модернизации систем ускорительного комплекса и научных исследований на синхроциклотроне. Предлагаемый проект исследований на СЦ-1000 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ представляет программу многофункциональных исследований, охватывающих промежуточные энергии в ядерной физике. Задачей программы модернизации является повышение технологических параметров синхроциклотрона СЦ-1000, повышение надежности систем ускорительного комплекса, расширение возможностей экспериментальной базы для проведения физических исследований на синхроциклотроне СЦ-1000. Реализация этой программы, в частности, позволит продолжить работы

на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ИРИС (Исследование Радиоактивных Изотопов на Синхроциклотроне) – единственной в России ISOL (Isotope Separator On-Line) установке «в линию» с масс-сепаратором, на которой выполняются измерения методом резонансной лазерной спектроскопии в ионном источнике зарядовых радиусов и электромагнитных моментов основных и долгоживущих изомерных состояний нейтронно-дефицитных ядер.

В настоящее время в Отделении в рамках программы по организации приборной базы реактора ПИК ведутся работы по созданию новой ISOL-установки ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на Нейтронах) на высокопоточном реакторе ПИК – аналоге установки ИРИС для исследования свойств нейтроноизбыточных экзотических изотопов, ранее недоступных для ISOL-систем. Установка ИРИС же может органично дополнять исследования на реакторе ПИК и сделать НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ единственным в мире, обладающим и необходимым оборудованием, и компетенциями для охвата всей таблицы нуклидов ISOL-методом исследований.

В 2024 г. сотрудниками Отделения на пучках СЦ-1000 проводились следующие работы:

- изучение магнитных свойств материалов на мюонном пучке СЦ-1000 μ SR-методом на единственной в РФ μ SR-установке;
- изучение возможности применения кристаллов для формирования пучков на протонном синхроциклотроне СЦ-1000, в т. ч. для установок адронной терапии.

На площадке Института сотрудники ОФВЭ продолжают работы по созданию экспериментальных установок:

- для изучения реакции термоядерного синтеза поляризованных ядер дейтерия (PoIFusion);
- для изучения свойств уникального изомера ^{229}Th , который является кандидатом на создание нового эталона частоты.

Сотрудники Отделения принимают участие в проведении эксперимента с фиксированной мишенью СПАСЧАРМ в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ (Протвино) по исследованию поляризационных явлений в эксклюзивных и инклюзивных адронных реакциях в области

энергий ускорителя У-70. В этом году на установке впервые была измерена поляризация инклюзивно рожденных Λ -гиперонов в столкновениях K^- -мезонов с ядерными мишенями, которая оказалась значительной в области поперечных импульсов Λ -гиперонов $p_T > 1$ ГэВ/с.

Одним из основных направлений деятельности ОФВЭ в 2024 г. было продолжение участия в проведении фундаментальных исследований на уникальных ускорительных установках в мировых научных центрах, таких как Большой адронный коллайдер (БАК) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН).

В ЦЕРН ОФВЭ участвует в экспериментах CMS, ATLAS, LHCb и ALICE с начальных стадий проектирования и конструирования коллайдерных детекторов со значительным интеллектуальным и приборным вкладом в создание различных подсистем этих детекторов. Кроме того, Отделение участвует в работах на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ISOLDE, нацеленном на изучение короткоживущих ядер, а также в работах по изучению возможностей кристаллической коллимации пучков БАК (эксперимент UA9).

После запуска БАК сотрудники ОФВЭ наряду с другими участниками экспериментов осуществляют постоянное сопровождение детекторов при проведении экспериментов, а также принимают участие в обработке экспериментальных данных. Продолжение анализа экспериментальных данных, полученных в Сеансе-2 (2015–2018), дает большое количество новых результатов.

Наиболее значимые из них, полученные в 2024 г. при участии сотрудников Отделения, – это наблюдение эффекта квантовой запутанности в парном рождении топ-кварков, а также измерение массы W -бозона с беспрецедентной точностью в экспериментах ATLAS и CMS, прецизионное измерение параметров нарушения CP -инвариантности в распадах B_s^0 - и B^0 -мезонов в эксперименте LHCb, наблюдение эффекта интерференции в процессе фоторождения векторных мезонов в ион-ионных столкновениях.

В 2024 г. эксперименты на БАК продолжили набор данных в рамках нового Сеанса-3. При участии сотрудников Отделения был успешно

осуществлен запуск всех четырех детекторов на БАК, а также обеспечена бесперебойная работа всех подсистем, за которые отвечали сотрудники ОФВЭ, в течение набора данных в 2024 г. Сотрудники Отделения продолжают анализ экспериментальных данных, полученных в Сеансе-3.

За более чем 10 лет лазерно-спектроскопических исследований на установках ИРИС и ISOLDE сотрудниками ОФВЭ были получены новые данные о ядерных характеристиках (зарядовых радиусах, ядерных спинах, ядерных электромагнитных моментах) для диапазона изотопных цепочек от Au до At. Были проведены систематические исследования эволюции формы ядер в изотопных цепочках вблизи $Z = 82$, а также обнаружен и изучен эффект сосуществования формы в экзотических изотопах различных элементов. Также был обнаружен и исследован очень необычный эффект нечетно-четного поведения формы ядра изотопов вблизи $N = 104$ и измерен сильный оболочечный эффект при $N = 126$. Для описания и объяснения обнаруженных эффектов сотрудниками ОФВЭ были разработаны атомные и ядерные теоретические подходы.

Одной из фундаментальных задач, осуществляемых в ОФВЭ, является исследование свойств ядерной материи в столкновениях тяжелых ионов. Выполнение этой задачи было начато в 80-х гг. в эксперименте PHENIX (Брукхейвенская национальная лаборатория, США) и продолжено в эксперименте ALICE (ЦЕРН). В связи со строительством российского коллайдера NICA в Дубне, направленного на исследование ядерной материи в ион-ионных столкновениях, Отделение подключилось к работам по созданию многоцелевого детектора MPD (Multi-Purpose Detector) и разработке физической программы эксперимента. Коллаборация MPD объединила усилия более 500 участников из 40 научных центров 11 стран. Руководителем международной коллаборации MPD является ведущий научный сотрудник ОФВЭ профессор РАН В. Г. Рябов.

Отделение также принимает участие в конструкторской разработке концепции и физической программы исследований для второго детектора SPD (Spin Physics Detector) на коллайдере NICA. Эксперимент SPD нацелен на исследование спиновой зависимости сильного взаимо-

действия и спиновой структуры протона, а также для определения механизмов образования спиновых асимметрий в рождении частиц. Одним из руководителей международной коллаборации SPD является заведующий лабораторией физики элементарных частиц ОФВЭ В. Т. Ким.

К завершенным экспериментам с продолжающейся обработкой данных можно отнести измерение скорости мюонного захвата в дейтерии (эксперимент MuSun) и изучение мюонного катализа реакции ядерного синтеза $d^3\text{He}$ на мезонной фабрике Института им. Пауля Шеррера (Швейцария).

В числе новых проектов ОФВЭ – подготовка к экспериментам:

- «Протон» по измерению зарядового радиуса протона в упругом электрон-протонном рассеянии;
- MPD и SPD на строящемся коллайдере NICA в Дубне;
- «Комптон» по изучению поляризуемости нуклонов.

Отделение участвует в создании установок на высокопоточном реакторе ПИК:

- ИРИНА на высокопоточном реакторе ПИК – аналог установки ИРИС на СЦ-1000 – для измерения методом резонансной лазерной спектроскопии в ионном источнике зарядовых радиусов и электромагнитных моментов основных и долгоживущих изомерных состояний нейтроноизбыточных ядер;
- ПИТРАП – для прямых высокоточных измерений масс (и времен жизни) нейтроноизбыточных нуклидов, участвующих в астрофизических s - и r -процессах.

Отдел детекторов излучений ОФВЭ ведет разработку новых газонаполненных детекторов, в т. ч. и нейтронных детекторов для реактора ПИК. Отдел радиоэлектроники ОФВЭ разрабатывает придетекторную и считывающую электронику для ряда экспериментов, проводимых Отделением.

Выполняется разработка инновационных методов получения радиоизотопов на циклотроне Ц-80 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ для медицинских применений (получены патенты на ряд высокотемпературных масс-сепараторных методов). Разрабатываемые методы по-

зволят проводить предварительное «сухое» разделение мишенного вещества и целевого радионуклида. При этом полученный образец, сохраняя практически без потерь наработанный целевой радионуклид, имеет в несколько десятков раз меньшую интегральную активность, чем первоначально облученная мишень. В результате этого значительно упрощается процесс его дальнейшей обработки, а также значительно (больше, чем на порядок) уменьшается

количество жидких радиоактивных отходов по сравнению с традиционным химическим выделением.

При участии сотрудников ОФВЭ в 2024 г. опубликованы более 300 научных работ в рецензируемых журналах, сделаны 27 докладов на российских и международных научных мероприятиях, защищены 1 докторская и 1 кандидатская диссертации.

Отделение перспективных разработок

Отделение перспективных разработок (ОПР), руководитель д. ф.-м. н. А. В. Титов, состоит из 6 отделов:

- ускорительного (заведующий – к. т. н. В. И. Максимов), в состав которого входит лаборатория физики и техники ускорителей (заведующий – к. ф.-м. н. С. А. Артамонов);
 - прикладной ядерной физики (заведующий – к. ф.-м. н. А. С. Воробьев), в состав которого входит лаборатория радиационной физики (заведующий – к. ф.-м. н. А. С. Воробьев);
 - наноструктурированных материалов (заведующий – к. х. н. М. Е. Взнуздаев), в состав которого входят лаборатория химии и спектроскопии углеродных материалов (заведующая – к. ф.-м. н. М. В. Суясова) и 2 научные группы;
 - квантовой физики и химии (заведующий – д. ф.-м. н. А. В. Титов), в который входят лаборатория квантовой химии (заведующий – д. ф.-м. н. А. Н. Петров) и 5 научных групп;
 - оптических и информационных технологий (заведующий – к. т. н. А. С. Кадыров), в состав которого входят 2 группы;
 - информационных технологий и автоматизации (заведующий – С. Б. Олешко), в состав которого входит лаборатория информационно-вычислительных систем (заведующий – С. Б. Олешко).
- В ОПР работают 68 научных сотрудников, из них 9 докторов наук и 27 кандидатов наук.



А. В. Титов,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

В ускорительном отделе (УО) ОПР сосредоточены базовые ускорительные установки НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. В первую оче-

редь это уникальный по своим характеристикам синхроциклотрон СЦ-1000 с энергией протонов выведенного пучка 1 000 МэВ и током 1 мкА. Он позволяет проводить широкий круг научных и прикладных исследований в различных областях – от ядерной физики до медицины.

Основными его отличительными чертами являются:

- высокоэффективная система вывода (30 %), что в пять раз превышает эффективность стандартной регенеративной системы;
- система временной растяжки выведенного протонного пучка, которая позволяет увеличить коэффициент временного заполнения пучка с 2 до 85 %.

Для ряда физических и прикладных исследований требуются пучки протонов других энергий. С этой целью на СЦ-1000 силами УО созданы пучки протонов переменной энергии от 60 до 1 000 МэВ. Диаметр полученных пучков ~ 30–80 мм, $\Delta p/p$ находится в диапазоне 1,3–14 %, а интенсивность изменяется в диапазоне 10^7 – 10^{12} с⁻¹.

Кроме основного протонного пучка из камеры синхроциклотрона одновременно с основным может выводиться второй пучок малой интенсивности – около 1 % основного пучка. Пучок может использоваться как для физических, так и для прикладных целей, в частности для проведения протонной лучевой терапии, что позволяет значительно увеличить число пациентов.

Для проведения научных исследований имеются вторичные пучки $\pi^\pm$ - и $\mu^\pm$ -мезонов, получаемые на внешней мезонообразующей мишени. В камере ускорителя в результате однооборотного сброса протонного пучка на внутреннюю нейтронаобразующую свинцовую мишень генерируется нейтронный пучок с энергией нейтронов от 10^{-2} эВ до 950 МэВ.

Совершенствование космической и авиационной техники в значительной степени связано с использованием элементов микро- и нано-

электроники. Одним из основных условий их успешного использования является способность надежно функционировать в радиационных полях космического пространства и верхних слоев атмосферы в течение длительного времени. Современные нормативные акты России и стандарты ведущих стран мира включают обязательные испытания радиационной стойкости современной радиоэлектронной аппаратуры, используемой в авиационной и космической технике, относительно воздействия различных видов излучения. В 2015 г. на синхроциклотроне НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ начал функционировать специализированный центр радиационных испытаний на протонах с энергией 60–1000 МэВ, включающий два стенда с системами диагностики пучка, современными приборами дозиметрии, автоматизированной системой обработки результатов и инфраструктурой для пользователей.

Международный нормативный документ JEDEC STANDARD предписывает проводить испытания электронных компонент и радиоизделий в потоках нейтронов со спектром, который подобен атмосферному спектру нейтронов. На нейтронном источнике ГНЕЙС синхроциклотрона СЦ-1000 силами группы физики деления ядер Отделения нейтронных исследований и УО ОНР в 2015 г. завершено создание подобного нейтронного источника.

Высокая интенсивность нейтронного пучка позволяет проводить ускоренные испытания электроники: 1 ч экспозиции изделия на пучке эквивалентен 100 годам пребывания в полете. Таким образом, в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ с 2015 г. действует универсальный центр испытаний радиационной стойкости элементов электронной компонентной базы, в котором возможно комплексное испытание радиоэлектроники как на пучках протонов переменной энергии, так и на пучках нейтронов со спектром, повторяющим спектр атмосферных нейтронов.

Силами УО ОНР и Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова проводятся работы по реализации проекта по созданию онкоофтальмологического и радиоизотопного комплексов на основе построенного изохронного циклотрона Ц-80 с переменной энергией протонов 40–80 МэВ

и током выведенного пучка до 100 мкА. Энергетический диапазон протонного пучка (60–70 МэВ) циклотрона Ц-80 позволяет создать единственный на сегодня в России офтальмологический центр для протонной терапии онкологических заболеваний органов зрения. Высокая энергия ускоренного пучка в сочетании с высокой интенсивностью позволит производить радиоизотопы и радиофармпрепараты высокого качества, недоступные для коммерческих циклотронов, в частности генераторные изотопы. Генераторные изотопы открывают путь для проведения позитронно-эмиссионной томографии в отдаленных от циклотрона медицинских центрах. В проекте также предусмотрено развитие метода создания сверхчистых медицинских изотопов с помощью масс-сепаратора.

Сотрудники отдела прикладной ядерной физики (ОПЯФ) участвовали в четырех научных экспедициях в Антарктиду. В настоящее время продолжают работы, направленные на подготовку к исследованиям подледникового озера Восток. Из-за высокой степени загрязненности существующая скважина к подледниковому озеру Восток протяженностью 3769 м не может быть использована для изучения озера и совместного с ОМРБ поиска форм жизни в экстремальных условиях. Для решения поставленных научных задач требуется бурение новой скважины. В связи с этим была проанализирована возможность бурения новой, экологически чистой скважины за короткое время известными методами, предложен способ скоростного бурения силиконовой жидкостью и выполнен теплофизический расчет этого процесса. Также в ОНР продолжены работы по созданию уникального оборудования для изучения подледникового озера и рассматриваются варианты расширения комплекса научных исследований на станции «Восток» для получения новой информации в области фундаментальных научных знаний.

В лаборатории радиационной физики ОПЯФ на нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС, созданном на базе СЦ-1000, продолжают исследования реакции деления тяжелых ядер. В 2024 г. проведены измерения сечения деления и угловых распределений осколков деления ядер ^{237}Np и ^{243}Am при взаимо-

действию с нейтронами с энергией от 0,3 до 500 МэВ. Для данных ядер имеющаяся на сегодня точность определения сечения деления недостаточна и должна быть увеличена, как следует из программы развития атомной энергетики, основанной на реализации замкнутого топливного цикла и таких его систем, как ядерные энергетические установки (ЯЭУ) четвертого поколения и accelerated driven system (ADS). Поскольку точность расчетов сечений, выполненных с использованием стандартных методов и подходов, остается недостаточной для проведения инженерно-технических расчетов ЯЭУ, получение новых и надежных ядерных данных остается единственным способом уменьшить полную неопределенность сечений. Также сотрудниками ОПЯФ инициирована работа по созданию новых координатных детекторов для ядерно-физических измерений при высоких нагрузках на основе многопроволочного газового электронного умножителя.

В отделе наноструктурированных материалов (ОНСМ) основным направлением исследований является разработка новых производных фуллеренов и эндометаллофуллеренов, исследование их физико-химических свойств, радиационной стойкости и самоорганизации в водных растворах.

Одной из наиболее важных научно-практических задач лаборатории химии и спектроскопии углеродных материалов ОНСМ является разработка новых производных эндометаллофуллеренов, перспективных в качестве систем адресной доставки лекарственных препаратов. Обычно используемые радиофармацевтические препараты содержат радиоизотоп в комплексе с хелатирующим агентом, достаточно прочно связывающим радиоактивный атом и препятствующим его связыванию с компонентами крови и другими тканями организма. Однако стабильность такого хелатного комплекса неабсолютна, и поэтому небольшие количества токсичного радиоактивного металла могут высвобождаться в организм. С этой целью в лаборатории проводятся исследования радиационной стойкости эндометаллофуллеренов и их производных при их облучении.

Группа композитных материалов ОНСМ в 2024 г. осуществила значительный объем иссле-

дований новых производных эндометаллофуллеренов лютеция с фолиевой кислотой для целевой доставки к опухолевым клеткам. Группой синтезированы и охарактеризованы методами ИК- и КР-спектроскопии комплексы C_{60} PNIPAM и $Lu@C_{2n}$ PNIPAM, определены температуры их агрегатного перехода. Эндометаллофуллерены лютеция гидроксильированы для последующих радиационных испытаний.

Группа радиационного модифицирования материалов ОНСМ проводит работы по радиационно-индуцированному синтезу комплексов фуллеренов с биополимерами. В частности, в 2024 г. группой осуществлен пробный радиационно-химический синтез биосовместимых полимеров на основе поливинилпирролидона и сополимеров с фуллереном C_{60} .

Основным направлением работы отдела квантовой физики и химии (ОКФХ) является развитие методов расчета электронной структуры молекул и материалов, содержащих тяжелые атомы. Целью является разработка методик и программ, которые дают возможность выполнять очень точные расчеты при наименьших вычислительных затратах. Это может быть достигнуто с помощью двухшаговых подходов, в которых расчет электронной структуры молекул с тяжелыми атомами (включая актиноиды, лантаноиды и тяжелые переходные металлы) и их физико-химических свойств разбит на два последовательных расчета: сначала в валентной области химического соединения (с использованием прецизионных релятивистских псевдопотенциалов), а затем в остовах тяжелых атомов (с использованием процедур восстановления четырехкомпонентной волновой функции). Эта работа была инициирована в начале 80-х гг. прошлого века профессором Л. Н. Лабзовским в связи с предложениями по поиску в экспериментах на молекулярных пучках эффектов несохранения временной инвариантности (T) и пространственной четности (P), включая поиски гипотетического электрического дипольного момента электрона ($eEDM$). Уже на протяжении последних 30 лет точность, достигаемая в этих расчетах, является рекордной в мире.

В последнее десятилетие сотрудники отдела не ограничиваются исследованиями P - и T -

нечетных эффектов, спектроскопических и химических свойств в молекулах и кластерах небольшого размера. Они перешли к более широкому кругу исследуемых физико-химических свойств и более сложным структурам, а именно к расчету электронной структуры и свойств материалов с тяжелыми атомами в составе. Разработанный на основе двухшаговых подходов метод построенного под соединение потенциала внедрения (ПСПВ) для выбранного фрагмента кристалла позволяет с очень высокой точностью описать действие окружения на данный фрагмент, и, соответственно, электронная структура самого фрагмента кристалла также воспроизводится должным образом. По сравнению с методами расширенной ячейки в рамках кластерного расчета с ПСПВ относительно просто рассматриваются и точечные дефекты, причем с точностью, недостижимой для методов расчета с периодическими граничными условиями. С ошибками менее 0,1 эВ для валентных энергий в таких расчетах можно учитывать локальное нарушение симметрии кристалла, релятивистские эффекты (включая брейтовские и квантово-электродинические), межэлектронную корреляцию в рамках теории волновой функции, корректно рассматривать заряженные фрагменты кристалла, в т. ч. включающие атомы с незаполненными орбитальными оболочками, локализованные (нелинейные) квантовые процессы и т. д.

Разработка методов, алгоритмов и программных пакетов для прецизионного моделирования электронной структуры и свойств соединений тяжелых элементов позволила проводить систематическое исследование свойств молекул и материалов, содержащих лантаноиды, актиноиды и тяжелые переходные металлы, а также выполнять наиболее точные исследования химических и спектроскопических свойств соединений сверхтяжелых элементов из «острова стабильности». ОКФХ публикует более 35 статей в год в ведущих международных и российских научных журналах.

В отделе оптических и информационных систем лаборатория голографических информационно-измерительных систем (ЛГИИС) специализируется в области прецизионных измерений

на масштабах нанометров. Для проведения этих исследований в ЛГИИС имеется уникальная подземная безвибрационная лаборатория. На базе этой лаборатории и стендов для синтеза линейных и радиальных голографических дифракционных решеток к настоящему времени выпущено 14 наименований нанотехнологических устройств и приборов, среди которых: фотоэлектрические преобразователи линейных и угловых перемещений, длиномеры, двух-, трех-, четырех- и более координатно-измерительные машины, радиусомеры, плоскомеры, поворотные столы для измерения с разрешением 10 нм и сотых долей секунды.

Специалисты группы фотофизики выполняют научные исследования по следующим трем основным направлениям. Первое – жидкокристаллическая (ЖК) модуляционная и дисплейная техника: процессы самоорганизации, батохромный спектральный сдвиг, модификация параметра порядка, увеличенная поляризуемость ЖК-мезофазы при наноструктурировании. Второе – поляризационные тонкопленочные наноструктурированные материалы с увеличенным дихроизмом пропускания. Третье – наноструктурированные упрочненные покрытия для материалов оптоэлектроники и солнечной энергетики.

Отдел информационных технологий и автоматизации (ОИТА) уже много лет принимает активное участие в проекте ATLAS Большого адронного коллайдера в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН).

Сотрудники лаборатории информационно-вычислительных систем ОИТА заняты в разработке и поддержке различных программных комплексов для системы контроля детектора (DCS) и системы сбора данных (DAQ) эксперимента ATLAS. Отдел также занимается поддержкой локальной вычислительной сети Института, различных информационно-вычислительных систем на базе веб-технологий, а также информационных систем для обеспечения административно-хозяйственной деятельности Института. Конструкторско-технологическая группа отдела участвовала в работах по программе «Протон» Отделения физики высоких энергий для проведения исследований

на мюонном пучке PS1 (ЦЕРН) с использованием установки ИКАР. Задача ОИТА заключалась в модернизации установки ИКАР путем создания и встраивания в установку сегментированных анодных блоков.

Сотрудниками ОПР в 2024 г. опубликованы 58 научных работ, которые индексируются

в Web of Science и Scopus, сделаны более 100 докладов на российских и международных научных конференциях, а также получены 7 патентов и свидетельств результата интеллектуальной деятельности.

Отделение молекулярной и радиационной биофизики

Отделение молекулярной и радиационной биофизики (ОМРБ), руководитель – к. ф.-м. н. А. Л. Коневега, состоит из 4 лабораторий:

- экспериментальной генетики (заведующая – д. б. н. С. В. Саранцева);
- молекулярной генетики человека (заведующая – д. б. н. С. Н. Пчелина);
- молекулярной биофизики и нейтронных исследований (заведующий – к. ф.-м. н. А. Л. Коневега);
- биотехнологии (заведующая – к. б. н. А. А. Кульминская);

3 центров:

- центра доклинических и клинических исследований (и. о. заведующего – к. б. н. Т. А. Штам);
- ресурсного центра (заведующий – к. б. н. Н. А. Верлов);
- Курчатовского геномного центра (руководитель – к. б. н. А. А. Кульминская)

и отдела инженерно-технического обеспечения (главный инженер – П. А. Сотников).

В Отделении работают 104 научных сотрудника, из них 10 докторов наук и 44 кандидата наук.



А. Л. Коневега,
к. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

Основными направлениями деятельности ОМРБ являются фундаментальные и прикладные исследования в области молекулярной биологии,

биофизики и биохимии, структурной биологии, молекулярной и медицинской генетики, ядерной медицины. В составе Отделения семь научных подразделений: четыре лаборатории и три центра.

Ядерная медицина является одним из наиболее активно развивающихся направлений деятельности ОМРБ. Уникальная инфраструктура научно-технологической площадки НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ предоставляет возможность осуществления полного цикла разработки радиофармацевтических лекарственных препаратов, включая поисковые исследования и разработку молекул-носителей, разработку ядерных технологий по получению и очистке радиоактивных изотопов медицинского назначения, наработку изотопов, сборку радиофармацевтических

лекарственных препаратов, доклинические исследования. В 2024 г. в рамках разработки инновационного тераностического радиофармацевтического лекарственного препарата (РФЛП) на основе изотопов тербия в коллаборации с НИЦ «Курчатовский институт», Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого и Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова были разработаны инновационные высокоселективные таргетные молекулы для адресной доставки препарата в опухоль, реакторные и ускорительные технологии получения изотопов тербия для медицинского применения. Создан прототип инновационного РФЛП на основе ^{161}Tb . В ходе проведенных доклинических исследований получены данные, подтверждающие целевую фармакологическую активность препарата. Продemonстрирован значительный дозозависимый цитотоксический эффект РФЛП (FV3B12-DOTA- ^{161}Tb) на клетки линии аденокарциномы кишечника человека HuTu-80 и мыши СТ-26, экспрессирующих рецептор VEGFR-1 в диапазоне доз 3–20 МБк/мл, при отсутствии токсического действия.

Совместно с Российским научным центром радиологии и хирургических технологий им. акад. А. М. Гранова Минздрава России валидирована оригинальная клеточная модель на основе ли-

нии клеток СТ26, экспрессирующих человеческий антиген PSMA. Проведено исследование препарата PSMA-617-Tb-161 из компонентов, произведенных в Российской Федерации. Показано эффективное и селективное накопление препарата в опухоли, экспрессирующей рецептор PSMA.

На мышинной модели опухолевого процесса с использованием клеток СТ26-PD-L1 проведен сравнительный анализ фармакокинетических параметров и биораспределения полноразмерных терапевтических антител и рекомбинантных однодоменных тяжелоцепочечных антител (наноантител, VHH), специфичных к рецептору PD-L1 человека. Показано, что VHH выводится из организма мыши в 10 раз быстрее полноразмерных антител, подтверждено накопление VHH в тканях опухолевого узла СТ26-PD-L1.

С использованием отработанной методики нагрузки экстраклеточных везикул терапевтическими белками на примере белка теплового шока 70 (HSP70) продемонстрирована возможность активации противоопухолевого иммунного ответа *in vivo* на мышинной модели карциномы толстой кишки.

Для определения молекулярных механизмов возникновения радиорезистентности, подбора схем радио- и иммунотерапии и поиска новых мишеней противоопухолевой терапии глиобластом охарактеризованы новые клеточные линии глиобластом, полученных из опухолевой ткани пациентов. Исследована экспрессия гена *oct4*, поддерживающего стволовой статус клеток на ранних стадиях развития, в клетках глиом. Экспрессия *oct4* была обнаружена во всех исследованных линиях глиом, но не в нормальной ткани взрослого головного мозга. Кроме того, были получены данные о том, что экспрессия *oct4* в глиомах может регулироваться клеточным метаболизмом.

В области структурной биологии следует отметить работу Г. Н. Рычкова с соавторами (лаборатория молекулярной биофизики и нейтронных исследований), посвященную изучению β -галактозидазы Da β Gal семейства GH35 из гипертермофильной археи *Desulfurococcus amylolyticus*, обладающей уникальной семидоменной структурой и высокой термостабильностью.

В Отделении продолжается разработка новых алгоритмов молекулярной динамики. В 2024 г. группой А. В. Швецова были разработаны улучшенные алгоритмы анализа траекторий молекулярной динамики: алгоритм поиска сетей внутри- и межмолекулярных водородных связей и алгоритм определения динамики вторичной структуры, основанный на классификации вторичных структур методом DSSP. Разработанные алгоритмы позволяют наблюдать и численно охарактеризовать изменения динамики вторичных структур в белковых молекулах и применяются для оценки конформационной стабильности биоинженерных конструкций *in silico*, а в перспективе – в процессе рационального дизайна биомакромолекул, в частности ферментов с улучшенными свойствами.

В области исследований биосинтеза белка был изучен молекулярный механизм антимикробного действия пролин-богатых пептидов – румицидинов, являющихся альтернативой традиционным антибиотикам, т. к. они обходят многие механизмы резистентности, не являются токсичными, легко синтезируются и обладают высокой скоростью ингибирующего действия этих пептидов. Показано, что румицидины входят в выходной тоннель рибосомы в обратной ориентации относительно растущей полипептидной цепи и закупоривают его. Кроме того, румицидины полностью блокируют прохождение пептидилтрансферазной реакции, что указывает на нарушение трансляции на этапе реакции транспептидации как ключевого ингибирующего эффекта этих соединений (А. Л. Коневега, Е. В. Полесскова, О. В. Шуленина и Е. Б. Пичкур).

В целях изучения природного многообразия и поиска антибактериальных соединений были проанализированы более 800 штаммов дрожжей из уникальной коллекции, собранной в предыдущие годы в экспедициях на полуостров Камчатка, остров Сахалин и Курильские острова. Показаны антибактериальные свойства микроорганизмов, которые коррелируют с условиями и местами обитания (О. В. Шуленина и др.).

В Отделении продолжает работу созданный в рамках Федеральной научно-технической программы развития генетических технологий Курчатовский геномный центр (КГЦ – ПИЯФ).

В 2024 г. в КГЦ – ПИЯФ были продолжены прикладные работы по поиску условий и факторов, усиливающих микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция. Обработка образцов грунта грибами *Scytalidium candidum* в комплексе с 2 % измельченной макулатуры позволило увеличить прочность грунта на порядок по сравнению с необработанными образцами. Было обнаружено, что добавление мицелиального гриба *Sc. candidum* к почве приводит к увеличению доли бактериальных штаммов, способных к биоминерализации, особенно из рода *Lysinibacillus*. Предложены композиции микроорганизмов и питательных сред для их роста, пригодные для армирования почвы с заданными показателями механических характеристик грунта (Д. А. Головкина и др.).

В лаборатории молекулярной генетики человека (А. К. Емельянов и С. Н. Пчелина) современными методами массового параллельного секвенирования в гене α -синуклеина, ответственном за развитие болезни Паркинсона (БП), была обнаружена редкая мутация E46K. Ранее мутация E46K была обнаружена у пациентов с БП из двух различных семей, имеющих испанское происхождение. Описана третья в мире семья российского происхождения с аутосомно-доминантной формой БП с ранним началом, обусловленной мутацией. В лаборатории также продолжено исследование морфологии экстраклеточных везикул подкожной и висцеральной жировой ткани при ожирении и сахарном диабете 2-го типа (СД2). Показана важная роль транскрипционного фактора PPAR γ в развитии СД2

и атеросклероза на фоне ожирения (К. В. Драчева и др.).

Сотрудниками Ресурсного центра (С. Н. Нарыжный с коллегами) продолжены исследования теоретических основ протеомики. Возможное огромное количество комбинаций различных посттрансляционных модификаций (ПТМ) не соответствует наблюдаемому количеству протеоформ. Это противоречие может быть разрешено постулированием, что существует строгий контроль на уровне отдельного организма за производством и поддержанием ПТМ. Теоретически оцененное значение более миллиона различных протеоформ в каждом типе клеток может реализоваться на уровне популяции.

Для поиска биомаркеров глиобластомы с помощью двумерного электрофореза в комбинации с масс-спектрометрическим и иммунным детектированием были построены детальные композитные карты распределения протеоформ гаптоглобина, который повышен у больных. Обнаружена высокая индивидуальная вариабельность минорных протеоформ гаптоглобина и предложен условный биомаркер глиобластомы – присутствие щелочной формы зонулина.

Сотрудниками ОМРБ в 2024 г. опубликованы 70 работ в рецензируемых журналах (36 – в зарубежных), сделаны 123 доклада на научных конференциях. Активно готовится научная смена: в ОМРБ ведут научно-исследовательскую работу 26 аспирантов, в т. ч. 18 обучающихся в аспирантуре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Три сотрудника Отделения защитили в 2024 г. кандидатские диссертации.

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС, и. о. директора – д. х. н. А. В. Якиманский, состоит из 18 лабораторий:

- № 1 синтеза высокотермостойких полимеров (руководитель – д. х. н. В. М. Светличный);
 - № 2 гидрофильных полимеров (руководитель – член-корреспондент РАН, д. х. н. Е. Ф. Панарин);
 - № 3 полимерных и гибридных материалов для мембранных процессов (руководитель – д. х. н. С. В. Кононова);
 - № 4 научно-учебная лаборатория физико-химических методов исследования полимерных наносистем и биотехнологических продуктов (руководитель – к. т. н. И. С. Гаркушина);
 - № 5 природных полимеров (руководитель – к. х. н. Ю. А. Скорик);
 - № 7 теории и моделирования полимерных систем (руководитель – член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н. С. В. Люлин);
 - № 8 механики полимеров и композиционных материалов (руководитель – д. ф.-м. н. В. Е. Юдин);
 - № 10 люминесценции, релаксационных и электрических свойств полимерных систем (руководитель – к. ф.-м. н. Р. Ю. Смыслов);
 - № 12 полимерных материалов для биотехнологии и медицины (руководитель – к. х. н. Е. Г. Коржикова-Влах);
 - № 13 структуры и морфологии полимерных и композиционных систем (руководитель – к. ф.-м. н. С. В. Валуева);
 - № 14 полимерных наноматериалов и композиций для оптических сред (руководитель – д. х. н. А. В. Якиманский);
 - № 15 анизотропных и структурированных полимерных систем (руководитель – д. х. н. А. В. Теньковцев);
 - № 16 молекулярной физики полимеров (руководитель – д. ф.-м. н. А. П. Филиппов);
 - № 19 физической химии полимеров (руководитель – д. ф.-м. н. С. В. Бронников);
 - № 20 аналитическая лаборатория (руководитель – д. х. н. В. Д. Красиков);
 - № 22 многомасштабного экспериментального исследования и моделирования полимерных композитов на основе перспективных термопластов для промышленного применения (руководитель – к. ф.-м. н. С. В. Ларин);
 - № 23 полимерных биоматериалов и систем (руководитель – д. ф.-м. н. А. А. Гуртовенко);
 - № 24 биомиметических полимеров (руководитель – д. ф.-м. н. О. В. Борисов)
- и группы № 21 спектроскопии полимеров (руководитель – к. ф.-м. н. А. В. Добродумов).

В Филиале НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС работают 262 сотрудника, из них 27 докторов наук и 105 кандидатов наук.



А. В. Якиманский,
д. х. н.,
и. о. директора
Филиала

Основными направлениями деятельности Филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС являются фундаментальные, прикладные и поиско-

вые исследования и разработки в области полимерной, органической, физической, биоорганической химии, экспериментальной и теоретической физики высокомолекулярных соединений. Предметом деятельности Филиала является

синтез, изучение структуры, свойств и возможных областей применения высокомолекулярных соединений, разработка рекомендаций по практическому применению научных результатов, изучение и обобщение достижений мировой науки по профилю исследований Филиала, содействие их использованию, осуществление международного сотрудничества, подготовка научных кадров высшей квалификации.

Филиал осуществляет основные виды деятельности по следующим направлениям:

- химия высокомолекулярных соединений, изучение закономерностей образования химических и структурных превращений высокомолекулярных соединений;

- разработка принципов создания функциональных полимерных материалов, в т. ч. высоко-

прочных и высокотермостойких конструкционных материалов, а также нанокомпозитов;

- теоретическая и экспериментальная физика и механика полимеров, компьютерное моделирование сложных макромолекулярных систем;

- разработка научных основ синтеза нового поколения биоактивных полимеров; направленная модификация природными и синтетическими высокомолекулярными соединениями лекарственных и биологически активных веществ для их применения в медицине, биоинженерии и биотехнологии.

Наиболее важные результаты 2024 г., полученные при выполнении работ по государственному заданию.

1. Полимеры для биомедицины. Исследования выполнены сотрудниками лабораторий № 2, 4, 5, 8, 10, 12, 13, 19, 20, гр. 21.

Синтезированы новые водорастворимые полимеры (сополимеры акриловой кислоты с ненасыщенными аналогами парааминосалициловой и парааминобензойной кислот, сульфосодержащие сополимеры стиролсульфоната натрия с гидрофильными и гидрофобными сомономерами), проявляющие противовирусную активность в отношении трех вирусов: респираторно-синцитиального, гриппа А, простого герпеса 1-го типа, перспективные для использования в качестве лекарственных средств и полимеров – носителей биологически активных веществ.

Методом 3D-печати получены биодеградируемые композиционные материалы на основе биоразлагаемого поли-ε-капролактона и модифицированных оксида графена или нанокристаллической целлюлозы для восполнения дефектов трабекулярных костей.

Предложена эффективная методика выделения полисахаридов и гликопротеинов из водного экстракта растительного сырья методом флэш-хроматографии с использованием сверхсшитого полимерного сорбента на основе сополимера стирола и дивинилбензола, который подходит для многократного использования благодаря возможности его полной регенерации.

Получен перспективный для использования в тканевой инженерии и регенеративной медицине нановолокнистый материал на основе фотосшиваемого альгината натрия, показавший хо-

рошую цитосовместимость с мезенхимальными стволовыми клетками, что свидетельствует о потенциальной совместимости с различными видами тканей.

2. Методы синтеза и структура полимеров сложного строения и архитектуры для оптоэлектроники и здоровьесбережения. Исследования выполнены сотрудниками лабораторий № 1, 13, 14, 15, 19, 20, 22, 23, 24.

Разработан материал на основе сшитых акриламидных гидрогелей, допированных углеродными квантовыми точками, для детектирования ионов Fe^{3+} в водных средах методом флуоресцентной спектроскопии. Преимущества – простота измерений, высокая чувствительность и быстрое получение результатов (до 10 мин). Предел обнаружения – 0,124 мкмоль, что существенно ниже предельно допустимой концентрации для ионов Fe^{3+} (5,36 мкмоль).

Впервые путем постсинтетической обработки хиральными изоцианатами получены излучающие красный свет углеродные точки и подтверждена возможность их использования для специфической биовизуализации и зондирования биобъектов.

Разработано устройство последнего (3-го) поколения с термически активированной замедленной флуоресценцией типа «донор – акцептор», основанное на изомерных акцепторах дифторида бора, с внешней квантовой эффективностью до 12,9 % и яркостью, достигающей 21 452 кд/м², что находится на уровне последних мировых достижений.

Для улучшения фотофизических свойств и снижения побочных эффектов препарата для фотодинамической терапии фотодитазина проведена его модификация полимерным носителем и наночастицами селена для дополнительного увеличения противоопухолевой активности. Модифицированный препарат демонстрирует на 30 % более высокую степень накопления в опухолевой ткани по сравнению с немодифицированным.

3. Полимерные и композиционные материалы для перспективных технологий. Исследования выполнены сотрудниками лабораторий № 1, 8, 10, 13, 19, 20, 22.

Предложена стратегия получения электропроводящих композитов на основе полиимид-

ных (ПИ) матриц различной жесткости, наполненных наночастицами графена. Показано, что с ростом молекулярной жесткости ПИ-матрицы значения температуры стеклования и модуля упругости композитов увеличиваются (с 3,1 до 9,6 ГПа), объемная электропроводность образцов снижается (с 10^{-4} до $5 \cdot 10^{-7}$ См/м), а поверхностная электропроводность увеличивается (с 0,04 до 2 См/м). Это связано с вытеснением графена в приповерхностную область композитной пленки вследствие плоскостной ориентации жесткоцепного ПИ, что способствует возникновению сильных π - π -взаимодействий между мономерными звеньями полимерных цепей и наночастицами графена, а также препятствует равномерному распределению частиц графена в объеме ПИ-матрицы.

Получены эластичные нетканые материалы на основе сополи(уретан-имид)ов, полипиррола и углеродоподобных допантов, проявляющие свойства эластомеров повышенной прочности, которые удовлетворяют требованиям, предъявляемым к гибким полимерным электродам, а также к материалам для изготовления электропроводящего текстиля.

Разработаны электропроводящие биосовместимые композитные пленки на основе допированного графеном (1 масс. %) сополи(уретан-имид)а для электрической стимуляции роста клеток. Пленки протестированы в качестве субстратов для культивирования дермальных фибробластов человека (метилтетразолиевый тест). Показано, что данные композиты перспективны для биомедицинских применений при решении задач клеточных и регенеративных технологий.

Впервые проведены качественная и количественная оценки влияния многостенных углеродных нанотрубок и нановолокон на устойчивость композитных пленок на основе полиимидов к процессам термического старения. Установлено, что с увеличением концентрации углеродных наночастиц каждого типа энергия активации процессов старения растет, что демонстрирует возможность этих наночастиц повышать термическую стабильность нанокомпозитов в условиях изотермического старения и продлевать срок эксплуатации материала.

Разработан способ получения по «зеленой» технологии нового пористого мембранно-сепарационного материала на основе поливинилиденфторида (ПВДФ). Проведена успешная апробация материала в качестве сепаратора для литиевых источников тока в аккумуляторной компании «Ригель» (Санкт-Петербург). Испытания аккумуляторов в режиме зарядно-разрядных циклов показали, что мембранно-сепарационный материал на основе ПВДФ по эксплуатационным характеристикам не уступает промышленным сепараторам Celgard 2400 (США) и перспективен для внедрения в производство в рамках импортозамещения. Разработанный метод получения мембранно-сепарационного материала может быть использован для организации производства по выпуску пористых пленок в непрерывном технологическом режиме.

4. Равновесные и динамические характеристики полимерных систем сложного состава и архитектуры: эксперимент, теория и компьютерное моделирование. Исследования выполнены сотрудниками лабораторий № 7, 16, 20, 22, 23, 24.

Методом компьютерного моделирования построены полноатомные теоретические модели для 5 ДНК-аптамеров, длина которых варьируется от 40 до 86 нуклеотидов (Anti-HER2, HB5, Apt-6, HeA2_1 и HeA2_3). Данные аптамеры обладают доказанной способностью связываться с рецептором эпидермального фактора роста, тип 2 (HER2), обнаруженного на поверхности мембран многих раковых клеток (в частности, в клетках рака молочной железы), что можно использовать для таргетированной доставки противоопухолевых препаратов в клетки-мишени. Построенные модели полностью совместимы с существующими моделями для биомолекулярных систем и будут использованы на следующем этапе работ для оценки энергии связывания ДНК-аптамеров с внеклеточным доменом рецептора эпидермального фактора роста, тип 2 (HER2).

С помощью аналитической теории и компьютерного моделирования получены новые закономерности для зависимостей спектров времен релаксации магниточувствительных эластомеров от магнитного поля, исследовано влияние магнитного поля на динамический модуль этих материалов. Предложена теория кинетики

фотоиндуцированного упорядочения азобензол-содержащих полимеров.

Впервые с помощью компьютерного моделирования и экспериментальных методов исследовано влияние добавленного растворителя (воды) на молекулярную организацию полимеризующегося глубокого эвтектического растворителя на основе акриловой кислоты (АК) и холин-хлорида. Показано, что добавление воды приводит к уменьшению размеров кластеров АК и увеличению ориентационной подвижности и коэффициента диффузии компонентов. Установлены критическая доля добавления воды и ее оптимальное содержание в полимеризационной системе для получения молекул полиакриловой кислоты с максимальной молекулярной массой и, соответственно, высокими механическими характеристиками материала.

В рамках среднеполевого приближения Пуассона – Больцмана была развита теория взаимодействия амфолитных нанокolloидных частиц (НЧ), имитирующих глобулярные белки, с полиэлектролитными щетками. Теория привела к двум нетривиальным предсказаниям: 1) существование метастабильных состояний НЧ с инвертированным зарядом внутри щетки, означающее, что инверсия знака заряда является необходимым, но недостаточным условием для поглощения наночастиц одноименно заряженной полиэлектролитной щеткой; 2) кинетический, а не термодинамический контроль абсорбции НЧ одноименно заряженной щеткой из-за барьера свободной энергии на периферии щетки. Эти теоретические результаты можно использовать для количественного прогнозирования характера взаимодействия полиэлектролитных щеток с глобулярными белками и нанокolloидами.

5. Материалы на основе синтетических и природных полимеров, а также их композитов для процессов мембранного разделения. Исследования выполнены сотрудниками лабораторий № 1, 3, 8, 10, 13, 20, гр. 21, 22.

Получены композитные первапорационные мембраны на основе ароматических (со)поли-

амидоимидов с гидросиликатными железом- или магниесодержащими нанотрубками. Установлено, что композитные мембраны с нанотрубками $\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ более проницаемые для полярных жидкостей по сравнению с базовым полимером и композиционными мембранами, содержащими нанотрубки $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$.

Синтезированы новые (со)полиамидоимиды с $-\text{OH}$ и $-\text{COOH}$ функциональными группами. Образцы мембран на их основе продемонстрировали высокую селективность при пропускании полярных жидкостей. Исследование конкурентных реакций в полимерах (образования сложноэфирных связей и внутримолекулярных реакций циклизации по $-\text{OH}$ -группам, соседствующим с амидной связью), а также факторов, влияющих на их протекание, открывает возможность управления этими процессами для прогнозирования свойств получаемых мембран.

С целью разработки управляемого процесса получения ультрафильтрационных мембран изучены процессы осаждения и самоорганизации полиамидоимидов. Установлено влияние жесткости осадителя на кинетику фазового разделения в системе «полимер – растворитель», а в итоге – на морфологию и свойства получаемых мембран на основе полиамидоимидов.

Для разработки отечественных протонпроводящих мембран с улучшенным комплексом свойств исследовано влияние типа сшивающего агента на структуру, морфологию, термостабильность, электрохимические свойства композиционных мембран на основе отечественного перфторированного сульфокислотного сополимера LSC – аналога Nafion®.

Сотрудниками Филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС в 2024 г. опубликованы 165 работ в рецензируемых журналах (87 – в зарубежных), сделаны 189 докладов на научных конференциях. Активно готовится научная смена: в Филиале работают 20 сотрудников, обучающихся в аспирантуре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 7 сотрудников защитили кандидатские диссертации.

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС, и. о. директора – к. х. н. А. В. Здравков, состоит из 12 лабораторий:

- исследования наноструктур (заведующий – академик РАН, д. х. н. В. Я. Шевченко);
- химии силикатных сорбентов (заведующая – д. х. н. О. Ю. Голубева);
- кремнийорганических соединений и материалов (заведующая – д. х. н. Т. А. Кочина);
- строения и свойств стекла (заведующая – к. х. н. Г. А. Сычева);
- неорганического синтеза (заведующая – к. х. н. А. Г. Иванова);
- физической химии стекла (заведующая – д. х. н. Т. В. Антропова);
- структурной химии оксидов (заведующий – к. х. н. А. В. Здравков);
- химических проблем энергетики (заведующая – к. ф.-м. н. А. В. Иванова);
- интенсификации процессов синтеза оксидных материалов (заведующий – д. т. н. Р. Ш. Абиев);
- физико-химического конструирования и синтеза функциональных материалов (заведующая – к. х. н. Е. С. Деркачева);
- высокотемпературной химии гетерогенных процессов (заведующая – академик РАН, д. х. н. В. Л. Столярова);
- низкотемпературной химии тугоплавких оксидов (заведующая – д. х. н. О. В. Альмяшева).

В Филиале НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС работают 139 научных сотрудников, из них 28 докторов наук и 62 кандидата наук.



А. В. Здравков,
к. х. н.,
и. о. директора Филиала

В Филиале ведутся научные исследования по широкому спектру направлений фундаментальной и прикладной науки в области химического материаловедения.

В лаборатории строения и свойств стекла получены новые данные при изучении влияния скорости изменения температуры на температуру стеклования и ширину интервала стеклования на различных по фазовому составу стеклах. При рассмотрении времени структурной релаксации как функции температуры и плотности была разработана теоретическая модель, которая успешно описывает как изменения плотности стекла при отжиге, так и изменения температуры стеклования и ширины его интервала при последующем нагревании. Полученные результаты важ-

ны для понимания отжига стекла и его влияния на расстекловывание при последующем нагревании – двух явлений, имеющих фундаментальное значение как для глубокого понимания природы стеклообразного состояния, так и для технологии стекла при получении новых стеклокристаллических материалов.

В лаборатории физической химии стекла проводятся исследования, направленные на получение новых знаний о процессах фазового разделения в стеклообразующей системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, легированной оксидами никеля или железа, и химической устойчивости двухфазных стекол. Разработаны способы получения новых пористых стекол (ПС) и создания новых функциональных композиционных материалов на основе матриц ПС. Выявлена структурная реорганизация никельсодержащих двухфазных стекол как результат конкуренции между оксидами никеля и BO_4 за компенсацию заряда щелочным катионом. Показано, что в двухфазных стеклах формируются кристаллические соединения со структурой шпинели вследствие образования нестехиометрических

соединений Ni_xO_y (кластеры наночастиц). Предложен способ изготовления магнитных ПС, перспективных для микроэлектроники и мембранных технологий, позволивший уменьшить на 70 % энергозатраты на их получение.

В лаборатории высокотемпературной химии гетерогенных процессов на основе комплексного физико-химического изучения многокомпонентных систем на основе оксидов гафния, циркония и редкоземельных элементов при температурах до 3000 К с использованием разработанной единой концепции испарения и прогнозирования термодинамических свойств оксидных систем выявлены образцы керамики с наименьшей летучестью, рекомендованные для дальнейшей разработки материалов с заданными физико-химическими свойствами, в частности высокотемпературных защитных покрытий. Впервые рассмотрена возможность применения полуэмпирических методов Колера, Редлиха – Кистера и Вильсона, а также обобщенной решеточной теории ассоциированных растворов (ОРТАР) для расчета термодинамических свойств трехкомпонентных систем на основе оксидов гафния и редкоземельных элементов в концентрационных областях, представляющих интерес для разработки керамики высшей огнеупорности. Показано, что экспериментальные данные, впервые полученные методом высокотемпературной масс-спектрометрии, об активностях оксидов лантаноидов в исследованных образцах рассматриваемых систем хорошо коррелируют с результатами, полученными на основе подхода ОРТАР по данным для соответствующих бинарных систем.

В лаборатории структурной химии оксидов проводится направленный поиск новых боратов – матриц для красноизлучающих люминофоров. Люминесцентные свойства материалов зависят не только от природы и типа иона-активатора, но и от химического состава и кристаллической структуры матрицы.

На основании исследования заполнения независимых позиций ионами-активаторами в структуре матрицы и оптических свойств новых люминофоров, разработанных на основе новых смешанных боратов редкоземельных элементов, установлено, что в случае, если матрица

люминофора содержит несколько систем кристаллографически неэквивалентных позиций (2–3), пригодных для иона-активатора, заполнение этих позиций будет происходить последовательно, если позиции различаются по размеру полэдров (объем, средняя длина связи, пр.). Предлагается кристаллохимический критерий поиска матрицы для люминофоров среди соединений, в которых содержится несколько позиций, различных по размеру. Расстояние между центрами фотолюминесценции сохраняется подходящим для проявления излучательных переходов, если ионы-активаторы занимают наиболее подходящую по размерам позицию независимо от их количества в кристаллической структуре. Это влияет на концентрационное тушение. Как только ионы-активаторы начинают занимать менее подходящие по размеру позиции, расстояние между активными центрами будет сокращаться, что приводит к концентрационному тушению.

Значительные успехи в исследованиях органо-неорганических покрытий различного функционального назначения достигнуты в лаборатории кремнийорганических соединений и материалов. Разработаны защитные органосиликатные покрытия, устойчивые при высоких (до 800 °С) и низких (–60 °С) температурах, с высокими механическими характеристиками, обладающие высокой коррозионной стойкостью и стойкостью к биодеструкции. На основе системы $Si-B_4C-ZrB_2$, модифицированной углеродсодержащими материалами, при температуре 1000–1300 °С на воздухе получены композиты и покрытия. Модифицированные материалы могут быть использованы для защиты графита от окисления, а также для защиты оксидной керамики от эрозийного воздействия.

В лаборатории неорганического синтеза получены фотокаталитически активные наночастицы оксидов титана и композиты на их основе, перспективные для использования в сельском хозяйстве в качестве реагентов, способствующих повышению роста растений, а также в качестве материалов, способных оказывать фунгицидное действие.

В лаборатории физико-химического конструирования и синтеза функциональных материалов проводятся работы по изучению синтети-

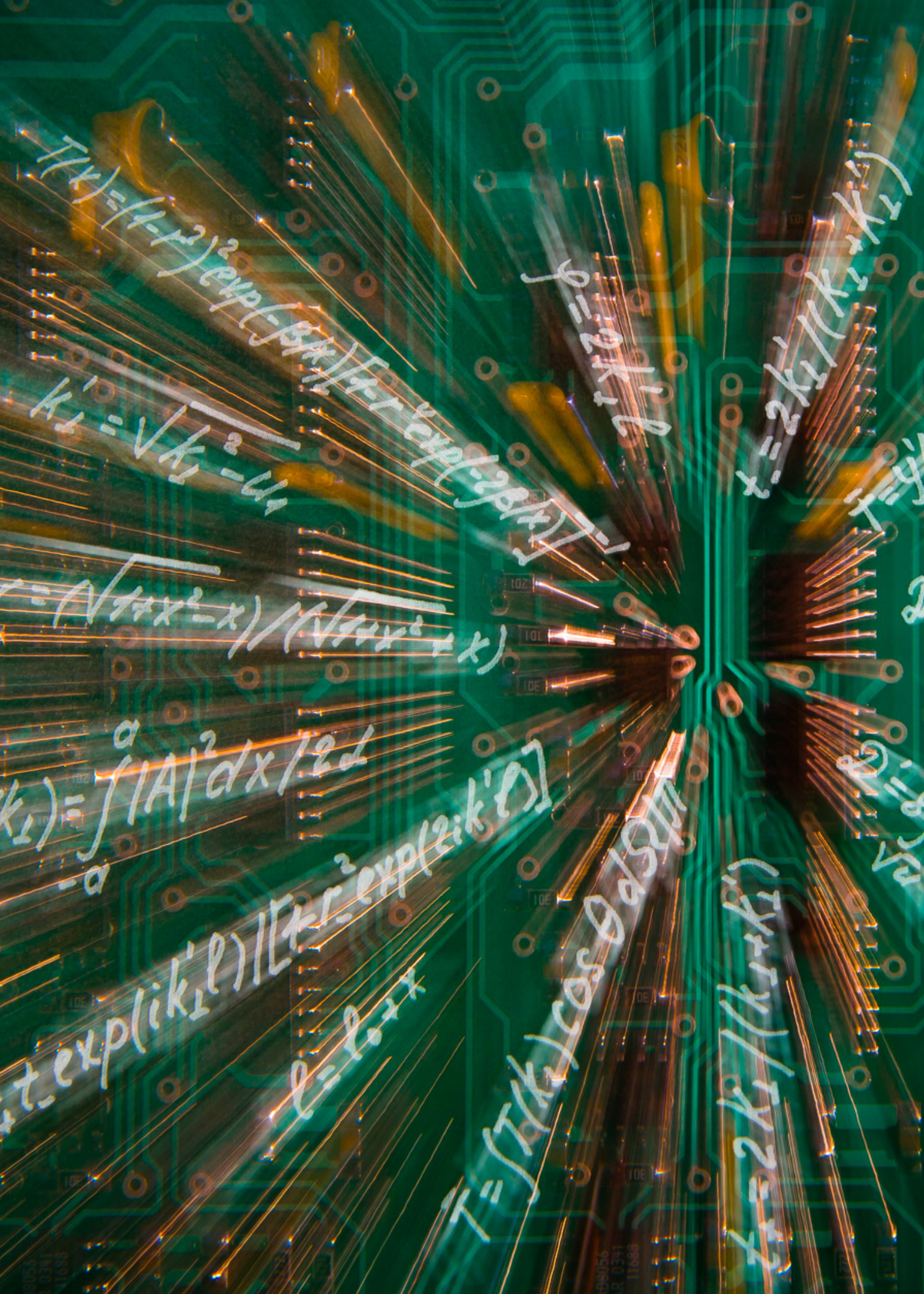
ческой предыстории нанопластин $Me(OH)_2$, где $Me = Mg, Ni$, которая может существенным образом отразиться на распределении по размерам полученных из пластин наносвитков и их морфологии. При формировании поликристаллических нанопластин увеличивается доля «дефектных» наносвитков при синтезе из них гидросиликатов $Me_3Si_2O_5(OH)_4$, $Me = Mg, Ni$. Морфологические особенности наносвитков сказываются на их термической устойчивости. Увеличение доли наносвитков с «дефектной» морфологией понижает их термическую устойчивость на 5–15 °С.

Получены образцы керамических композитов $(1-x)LaPO_4-xAl_2O_3$, перспективных как в качестве иммобилизующих матриц, так и в качестве тепловых барьеров роторов высокоскоростных турбогенераторов для альтернативной энергетики. Показано, что все они имеют высокую термическую стойкость (не ниже 1600 °С), высокую микротвердость по Виккерсу (до 30 ГПа) и низкую теплопроводность, особенно при низких концентрациях оксида алюминия пиролизом цитратно-нитратных композиций. Наблюдалось увеличение фотокаталитической активности при уменьшении содержания Fe_2O_3 .

В лаборатории исследования наноструктур предложен и обоснован критерий выбора материалов для защиты от механических нагрузок. Разработан уникальный бронезащитный материал – новая композиционная керамика алмазкарбид кремния. Разработана технология броневых панелей и проведены положительные пулевые испытания. Разработанный керамический материал обеспечивает лучшую защиту и является более легким, чем стандартная броня на основе корунда.

В лаборатории химии силикатных сорбентов разработан экономичный одностадийный способ получения нового класса неорганических материалов – алюмосиликатных наногубок со структурой каолинита $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Наногубки были получены в ходе гидротермальной обработки алюмосиликатных гелей в кислой среде ($pH = 2,6$) при 220 °С без использования сшивающих органических агентов, таких как циклодекстрин, полимеры и др. Исследования сорбционных свойств полученных наногубок и их биологической активности показали, что по своим сорбционным характеристикам синтезированный наногубчатый алюмосиликат превосходит не только природные структурные аналоги и синтетические алюмосиликаты другой морфологии, но и ряд известных промышленных сорбентов, а также не обладают токсичностью. Исследования сорбционной способности алюмосиликатов различной морфологии по отношению к органическим красителям, ионам тяжелых металлов и ряду лекарственных препаратов показывают значительный потенциал синтетических алюмосиликатов для их использования в качестве энтеро- и гемосорбентов, в т. ч. селективных, превосходящих по своим характеристикам активированные угли.

Сотрудниками Филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС в 2024 г. опубликованы более 100 исследовательских работ в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, представлены доклады на международных и российских конференциях, организованы и проведены 3 международные и российские конференции, в т. ч. 1 молодежная.



$$\Psi(x) = (1-x^2)^2 \exp(-\beta|x|/4r) \exp(2ik'l)$$
$$k_1' = \sqrt{k_1^2 - 4}$$

$$x = (\sqrt{1+x^2} - x) / (\sqrt{1+x^2} + x)$$

$$k_1) = \int_{-a}^a |A|^2 dx / 2L$$

$$t \exp(ik_1' l) / [1 + r^2 \exp(2ik'l)]$$
$$l = l_0 + x$$

$$T = \int T(k) \cos \theta \, d\Omega$$

$$1 + 2k_1 / (k_1 + k_1')$$

$$\rho = 2k_1' l$$

$$x = 2k_1 / (k_1 + k_1')$$

Теоретическая и математическая физика

- 40 Причины усиления эффектов P - и T -нарушения в пропускании нейтронов
- 41 Квантовые эффекты и анализ эффективного действия в двумерной массивной $CP(N - 1)$ -модели в пределе больших N
- 42 Анализ глубоконеупругого комптоновского рассеяния с помощью проекций Грибова – Фруассара
- 43 Дробовой шум в интерферометрах Ааронова – Бома
- 44 Блуждающие оптические моды в неупорядоченных массивах наночастиц
- 45 Уравнения Шредингера, Клейна – Гордона и квантовые ударные волны для описания эмиссии кумулятивных вторичных частиц в столкновениях тяжелых ионов
- 46 Теоретические предпосылки для предстоящего поколения прецизионных спектроскопических экспериментов
- 47 g -факторы молекулы $YbOH$ во внешнем электрическом поле
- 48 Расчет матриц плотности релятивистским методом связанных кластеров в пространстве Фока и конструирование компактных атомных базисных наборов
- 49 Тонкие структуры в положениях нейтронных резонансов и выделенность масс лептонов

Причины усиления эффектов P - и T -нарушения в пропускании нейтронов

В. Е. Бунаков

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В работе проводится сравнение двух различных теоретических подходов к эффектам P - и T -нарушения в пропускании нейтронов, по-разному объясняющих появление их усиления. Соответственно, различаются и предложения по выбору оптимальных условий для экспериментального наблюдения эффекта.

Рассмотрим для простоты P -нечетную продольную асимметрию при пропускании поляризованных нейтронов через неполяризованную мишень. Измеряемая величина –

$$P_{\text{exp}} = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \approx \frac{\Delta_{\text{tot}}^P}{\sigma_{\text{tot}}},$$

где $N_{\pm}$ – число нейтронов разной спиральности, прошедших через мишень, а соответственно, полные сечения взаимодействия нейтронов с ядрами мишени –

$$\sigma_{\text{tot}}^{\pm} = \sigma_{\text{tot}} \pm \frac{\Delta_{\text{tot}}^P}{2}.$$

Резонансное усиление (Бунаков, Гудков) величины $P_{\text{exp}}(E)$ возникает потому, что числитель

$$\Delta_{\text{tot}}^P \approx \frac{8\pi V_p}{k^2 D} \frac{\sqrt{\Gamma_s^n \Gamma_p^n} \cdot \Gamma_p}{(E - E_p)^2 + \Gamma_p^2 / 4}$$

пропорционален величине времени задержки

$$T(E) = \frac{\Gamma_p \hbar}{(E - E_p)^2 + \Gamma_p^2 / 4},$$

которое нейтрон проводит в поле P -нарушающего взаимодействия, а вклад $\sigma_p(E)$ от p -резонанса в полное сечение $\sigma_{\text{tot}}(E)$ не превышает десятков процентов. Здесь V_p – матричный элемент

слабого взаимодействия между волновыми функциями s - и p -резонансов; Γ_s^n и Γ_p^n – нейтронные ширины s - и p -волновых резонансов; D – расстояние между s - и p -уровнями составного ядра. Когда энергия нейтрона меняется от величины между резонансами $|E - E_p| \approx |E - E_s| \approx D/2$ до максимума резонанса $E = E_p$, происходит резонансное усиление эффекта на величину порядка $(D/\Gamma)^2 \sim 10^6$, связанное с тем, что нейтрон проводит большее время ($t_{\text{res}} \approx \hbar/\Gamma$) в поле P -нарушающего слабого взаимодействия.

Альтернативный подход (Сушков, Фламбаум) – кинематическое усиление. Вместо измеряемой рассматривается вспомогательная величина

$$A = \left(\frac{\Delta_{\text{tot}}^P}{\sigma_p} \right) \approx 2 \frac{V_p}{D} \sqrt{\Gamma_s^n / \Gamma_p^n}.$$

Для нейтронов с энергиями порядка электрон-вольт отношение

$$\sqrt{\Gamma_s^n / \Gamma_p^n} \approx \frac{1}{kR} \approx 10^3.$$

Это соотношение получалось по простой аналогии с усилением эффектов P -нарушения в γ -распаде связанных возбужденных состояний составного ядра и приводит к нелепым выводам: максимальный эффект достигается для исчезающе слабых p -волновых резонансов с ширинами $\Gamma_p^n \rightarrow 0$. Эффект усиления при этом будет неограниченно стремиться к бесконечности. Разумеется, ничтожный вклад таких резонансов в сечение делает невозможным их наблюдение. Более того, понятно, что эффект нарушения четности не может превосходить 100 %.

Квантовые эффекты и анализ эффективного действия в двумерной массивной $CP(N - 1)$ -модели в пределе больших N

Е. А. Иевлев, Г. А. Сумбатян, А. В. Юнг

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Неабелевы трубки потока (вихри) были обнаружены в $N = 2$ суперсимметричной квантовой хромодинамике (КХД) в 2003 г. в работе А. Юнга с К. Кониши и его группы, а также независимо Ханани и Тонгом. Отличительной чертой неабелевых струн является наличие ориентационных нулевых мод струны, вращающих ее поток по группе $SU(N)$. Теория этих неабелевых струн развивалась в течение ряда лет в работах А. Юнга с М. Шифманом. Неабелевы вихри оказались альтернативой абелевым абрикосовским струнам при описании неабелевого механизма конфайнмента монополей. Эффективной теорией на мировой поверхности неабелевой струны, описывающей динамику ее внутренних ориентационных мод в случае равенства числа цветов и ароматов кварков, $N = N_f$, является двумерная $CP(N - 1)$ -модель. Если кварки в четырехмерной КХД массивны, то на поверхности струны возникает $CP(N - 1)$ -модель с так называемыми твистованными массами, совпадающими с массами кварков в четырехмерной теории. При нарушении $N = 2$ суперсимметрии в четырехмерной КХД до $N = 1$ суперсимметрия в $CP(N - 1)$ -модели полностью нарушается.

Данная работа посвящена изучению деформированной твистованными массами несуперсимметричной $CP(N - 1)$ -модели в пределе больших N . Массовая деформация вводится с помощью вспомогательного комплексного скалярного поля σ . В зависимости от величины параметра массовой деформации m было продемонстрировано наличие двух фаз: кулоновской и фазы Хиггса, разделенных фазовым переходом второго рода. Хиггсовская фаза возникает в слабой связи при больших значениях параметра массовой

деформации. Она характеризуется ненулевым значением конденсата заряженных полей и поля σ , нарушающего дискретную Z_N -симметрию.

Было показано, что если параметр массовой деформации мал, т. е. реализуется режим сильной связи, то изначально вспомогательное векторное поле A_μ становится динамическим и безмассовым, в результате чего возникает кулоновский потенциал, линейно растущий в двумерии. Он приводит к конфайнменту заряженных по абелевой калибровочной группе полей, т. е. в спектре возникают мезоны кинк – антикинк. Это согласуется с результатом, полученным Э. Витте-ном при рассмотрении недеформированной модели.

Также было продемонстрировано, что для самосогласованности теории необходимо введение дополнительного слагаемого, массового члена поля σ , со своей асимптотически свободной константой связи. Таким образом, в модели помимо оригинального масштаба Λ появляется второй масштаб Λ_σ , причем $\Lambda_\sigma > \Lambda$.

Вспомогательное поле s также становится динамическим при ненулевом значении параметра массовой деформации. Более того, оценивая массы состояний в спектре в режиме сильной связи, можно увидеть, что в зависимости от значения параметра m возможен процесс распада σ в мезоны кинк – антикинк или, наоборот, – мезона в σ .

Также было продемонстрировано, что σ становится безмассовым в точке фазового перехода, что позволяет определить конформную теорию, описывающую фазовый переход второго рода. Она включает в себя безмассовое $U(1)$ калибровочное поле A_α и безмассовый комплексный скаляр σ .

Анализ глубоконеупругого комптоновского рассеяния с помощью проекций Грибова – Фруассара

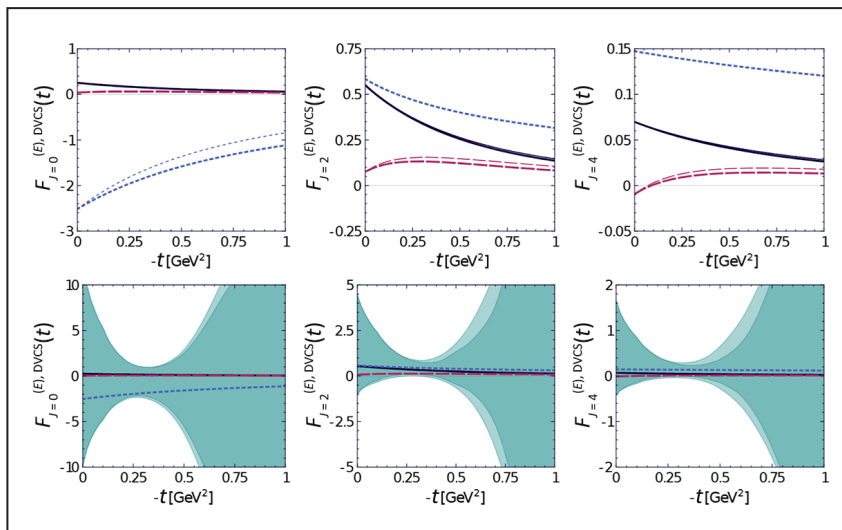
К. М. Семенов-Тян-Шанский

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Метод проекций Грибова – Фруассара (ГФ) позволяет установить связь между проекциями ГФ форм-факторов глубоконеупругого комптоновского рассеяния (DVCS) и обобщенными партонными распределениями (GPD). Проекция ГФ характеризует отклик адронов на возбуждения с помощью струноподобных операторов квантовой хромодинамики (КХД) с определенным угловым моментом J в кросс-канале. Такая интерпретация проекций ГФ достигается в подходе дуальной параметризации GPD, основанной на двойном парциально-волновом разложении GPD по конформным и $SO(3)$ парциальным волнам кросс-канала. Проекция ГФ комптоновских форм-факторов вычисляются как свертки мнимых частей комптоновских амплитуд с функциями Лежандра 2-го рода и могут быть выражены через обобщенные форм-факторы $B_{n,l}(t)$ дуальной параметризации, которые, в свою очередь, однозначно

связаны с форм-факторами адронных матричных элементов локальных КХД-операторов твиста-2, возникающими при вычислении меллиновских моментов GPD. Наш подход позволяет получить набор правил сумм для проекций ГФ, которые могут быть проверены с помощью феноменологических моделей GPD, а также устанавливает новую связь между экспериментом и вычислениями меллиновских моментов GPD в решеточной КХД.

В работе было построено обобщение метода проекций ГФ для случая адронов-мишеней со спином $1/2$. На рисунке представлены проекции ГФ комптоновских форм-факторов в различных моделях GPD (GK, MMS, KM) и первые численные оценки, полученные с использованием амплитуд DVCS, напрямую извлеченных из экспериментальных данных в подходе, основанном на использовании нейронных сетей, коллаборации PARTONS.



Проекция Грибова – Фруассара с $J = 0, 2, 4$ глубоконеупругого комптоновского рассеяния при $Q^2 = 2$ ГэВ² как функции t : верхний ряд – результаты, полученные в модели GK (черный), MMS (красный), KM (синий); тонкие линии – результат с учетом только вклада нуклонных GPD H ; жирные линии – учтены вклады GPD H и E ; нижний ряд – то же с добавлением областей результатов, полученных из глобального анализа комптоновских форм-факторов коллаборации PARTONS

Дробовой шум в интерферометрах Ааронова – Бома

Р. А. Ниязов¹, Д. Н. Аристов¹, И. В. Крайнов², В. Ю. Качоровский²

¹ Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Дробовой шум связан с флуктуациями тока и возникает из-за того, что электроны имеют дискретную природу. Его измерение дает информацию, недоступную при измерении кондактанса. Измеряя шум, можно определить фактор Фано, который представляет собой отношение шума к току. Например, для диффузионного проводника значение $F = 1/3$ является универсальным и не зависит от формы, длины и кондактанса проводника.

В этой работе мы исследуем и сравниваем факторы Фано двух типов интерферометров Ааронова – Бома. Первый тип – это интерферометр на основе «обычных» материалов – обычный интерферометр (ОИ). Мы моделируем его как одноканальную систему. Второй тип – это интерферометр на основе геликоидальных краевых состояний двумерного топологического изолятора – геликоидальный интерферометр (ГИ). В геликоидальных состояниях электроны с разными спинами движутся в противоположных направлениях, не рассеиваясь на немагнитных примесях.

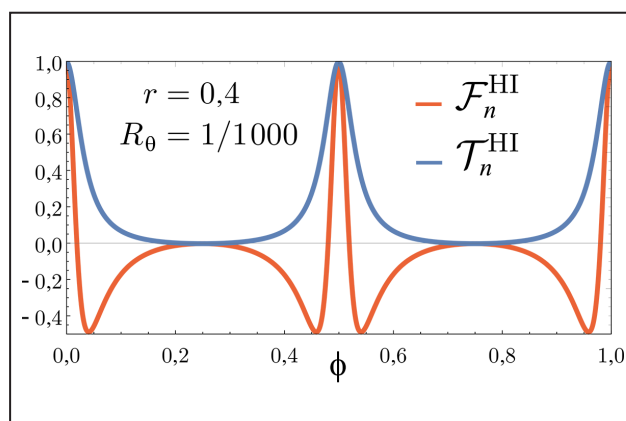
Средний ток и дробовой шум связаны с интерференционными эффектами, и оба демонстрируют эффект Ааронова – Бома: они периодически меняются в зависимости от магнитного потока, который проходит через область, где находятся краевые состояния. Обычно интерференционные эффекты подавляются при высоких температурах. Однако в рассматриваемых интерферометрах они сохраняются при относительно высоких температурах, что может быть полезно для различных приложений. Изучение дробового шума в таких условиях проведено впервые.

В ГИ интерференционные эффекты (рис.) возникают только при наличии магнитного дефекта.

Форма резонансов фактора Фано зависит от параметров системы, в отличие от ОИ. Показано, что одновременное измерение среднего тока и фактора Фано позволяет напрямую определить силу обратного рассеяния. Это может помочь идентифицировать неизвестные центры обратного рассеяния, которые, как известно из экспериментов, существуют в ГИ.

Для ОИ мы обнаружили, что влияние магнитного поля на дробовой шум гораздо сильнее, чем для ГИ. Также мы рассмотрели случаи неравных плеч и неэквивалентных контактов, что важно для сравнения с экспериментом, поскольку практически невозможно изготовить интерферометр с равными плечами и идентичными контактами.

Мы сравнили два типа интерферометров и обнаружили, что зависимости фактора Фано от кондактансов двух систем совпадают при отсутствии внешнего магнитного поля и различаются при его наличии. Это позволяет экспериментально отличить топологически нетривиальную систему.



Зависимости нормированного фактора Фано (красная кривая) и кондактанса (синяя кривая) от магнитного потока в интерферометре на основе геликоидальных состояний

Блуждающие оптические моды в неупорядоченных массивах наночастиц

А. Г. Яшенкин^{1, 2}, С. В. Коняхин^{3, 4}, О. И. Утесов³

¹ Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Санкт-Петербургский государственный университет

³ Институт фундаментальных наук, Республика Корея

⁴ Корейский университет науки и технологий, Республика Корея

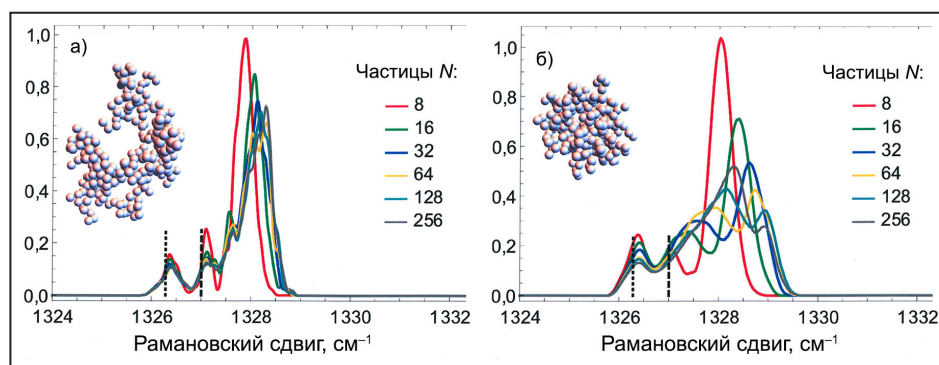
Разработан и протестирован подход, позволяющий моделировать распространение коллективизированных оптических мод в широком классе наноструктурированных сред и извлекать информацию о структуре этих сред из их рамановских спектров.

Ранее нами были разработаны микроскопические подходы (DMM–BPM- и EKFG–BPM-методы), позволяющие с хорошей точностью описывать рамановские спектры неполярных нанокристаллов, существенно превосходящие по качеству предшествующие методы. Вместе эти методы оперируют с ансамблями невзаимодействующих частиц, игнорируя возможность гибридизации состояний в различных частицах и возникновения коллективных эффектов.

Нами была разработана модель связанных осцилляторов (СОМ), состоящая в замене каждой пары гибридизующихся оптических мод различных частиц в контакте на пару связанных осцилляторов, и продемонстрирована достаточность этой модели для описания эффектов коллективизации. Было показано, что подход СОМ может служить хорошим приближением для задачи о распространении оптических мод в системе наночастиц,

в которой индивидуальные моды отдельных частиц оказываются коллективизированными вследствие их гибридизации и в дальнейшем могут распространяться по всему массиву. Для последних могут быть поставлены вопросы о длине свободного пробега в среде, о радиусе ее локализации. Далее по полученному оптическому спектру строится рамановский пик, из сдвига, формы и ширины которого теперь извлекается информация не только о свойствах наночастиц, из которых сконструирована наноструктурированная среда, но и о свойствах самой среды (рис.).

Мы подробно исследовали следующие модели: 1) регулярный трехмерный массив одинаковых сферических наночастиц; 2) регулярный трехмерный массив сферических наночастиц, в который беспорядок введен через варьирующиеся размеры наночастиц и областей их перекрытия – модель пористой среды, в которой наблюдался фазовый переход перколяционного типа; 3) реалистичные компактные агломераты наночастиц разной степени связности – неупорядоченные иррегулярные объекты, обладающие фрактальной структурой.



Зависимости положения рамановского пика от размера агломерата для двух разных моделей агломерации

Уравнения Шредингера, Клейна – Гордона и квантовые ударные волны для описания эмиссии кумулятивных вторичных частиц в столкновениях тяжелых ионов

А. Т. Дьяченко¹, И. А. Митропольский²

¹ Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Из уравнения Шредингера, а также из уравнения Клейна – Фока – Гордона с диссипацией получены квантовые нерелятивистские и релятивистские уравнения гидродинамики. Диссипация описывается введением диссипативной функции в эффективный потенциал уравнения Шредингера и уравнения Клейна – Гордона. Для этой функции используется уравнение сохранения энергии. Учет неравновесных процессов производится добавлением кинетического уравнения для нуклонной функции. Получается замкнутая система квантовых уравнений.

Найдено решение полученных гидродинамических уравнений с помощью солитоноподобных квантовых ударных волн в одномерном и двумерном случаях. Это дополняет наши результаты, полученные ранее как для слабой нелинейности, так и в случае нелинейных возмущений большой амплитуды для ударных волн. Аналитический подход позволяет выделить временную эволюцию образующегося горячего пятна *hot spot* и рас-

считать двойные дифференциальные сечения испускаемых протонов, пионов, каонов и антипротонов в столкновениях тяжелых ионов с учетом неравновесных процессов. На рисунке 1 двойные дифференциальные сечения испускания протонов под углами 30, 60 и 140° для реакции $\text{Ne} + \text{NaF} \rightarrow p + X$ при энергии 400 МэВ/нуклон, рассчитанные на основе решения квантовых гидродинамических уравнений (сплошные линии), сравниваются с результатами расчетов по двухжидкостной гидродинамической модели (штриховые линии) и имеющимися экспериментальными данными. На рисунке 2 рассчитанные распределения кумулятивных протонов и отрицательных пионов в реакции $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow p(\pi^-) + X$ под углом 0° при энергии ^{12}C 19,6 ГэВ/нуклон (сплошные линии) сравниваются с параметризацией А. А. Балдина (штриховые линии), результатами расчетов по FTFP-модели (штрих-пунктирные линии) и экспериментальными данными, полученными на ускорителе У-70 (Серпухов).

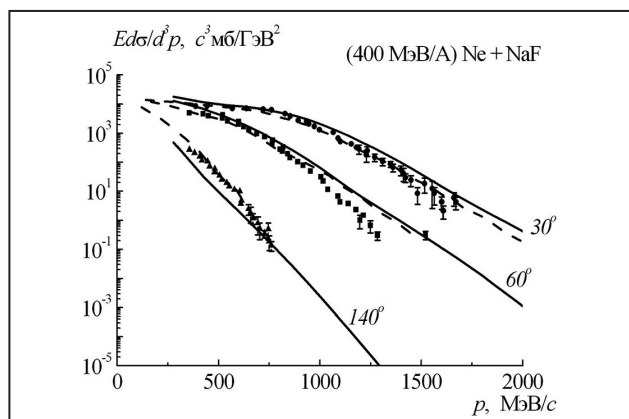


Рис. 1. Двойные дифференциальные сечения испускания протонов в реакции $\text{Ne} + \text{NaF} \rightarrow p + X$

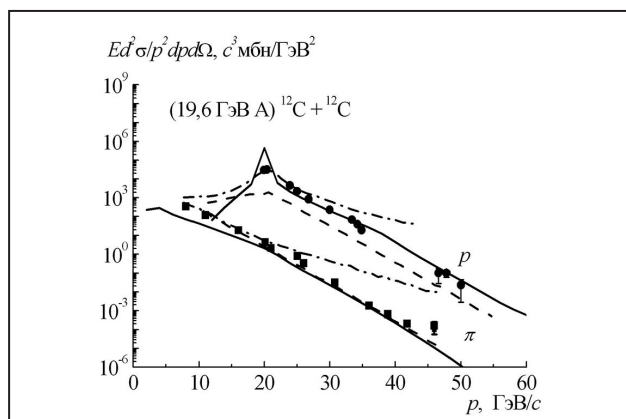


Рис. 2. Двойные дифференциальные сечения испускания протонов и отрицательных пионов в реакции $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow p(\pi^-) + X$

1. D'yachenko A.T., Mitropolsky I.A. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2024. V. 88. No. 8. P. 1268–1273.
2. D'yachenko A.T. // Phys. At. Nucl. 2024. V. 87. No. 2. P. 125.
3. D'yachenko A.T. // Phys. At. Nucl. 2024. V. 87. No. 5. P. 646.

Теоретические предпосылки для предстоящего поколения прецизионных спектроскопических экспериментов

Д. А. Соловьев^{1, 3}, Т. А. Залялютдинов^{1, 3}, Л. Н. Лабзовский^{2, 3}, А. А. Аникин^{3, 4}

¹ Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

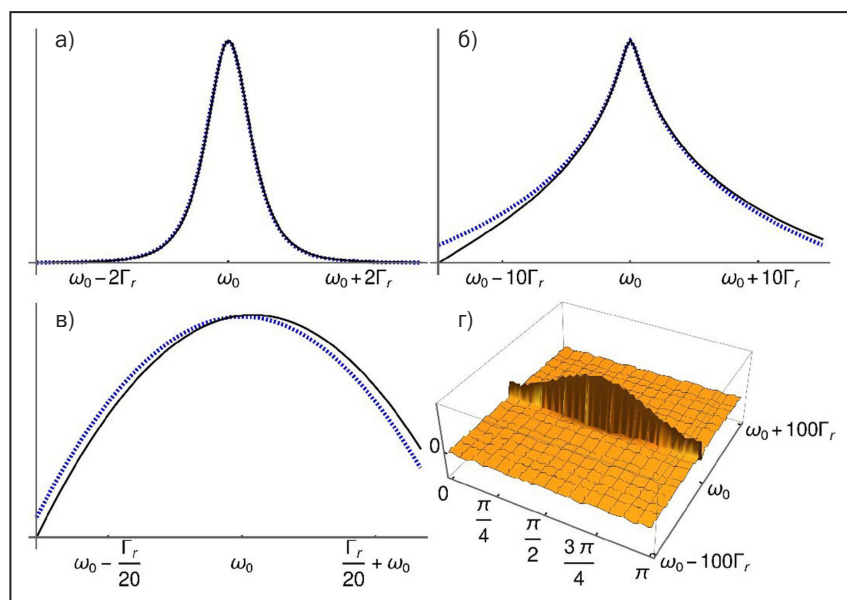
² Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

³ Санкт-Петербургский государственный университет

⁴ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева

Современные резонансные спектроскопические эксперименты по измерению частот переходов в атомах достигли такого уровня, когда стало обязательным тщательное описание всех аспектов изучаемых процессов. Достигнутая экспериментальная точность привела к тому, что значение частоты перехода существенно зависит от теоретической обработки наблюдаемого профиля спектральной линии. Как и было предсказано, экспериментально обнаружили большое влияние эффектов, возникающих за пределами резонансного приближения. Полученные результаты ознаменовали начало грядущей эпохи в резонансной атомной спектроскопии, в которой многие общепринятые представления становятся несостоятельными. Так, атомный переход может характеризоваться несколькими различными, но одинаково приемлемыми частотами.

Мы показали, что картина становится еще сложнее, когда наблюдаемый профиль спектральной линии отождествляется с одним из процессов – испусканием или поглощением. Точное определение частоты перехода требует описания профиля линии поглощения, неразрывно связанного с процессом эмиссии, и наоборот. Теоретические аспекты, обсуждаемые в наших работах, создают предпосылки для проведения более точных спектроскопических экспериментов. Так, на примере атома водорода представлено детальное теоретическое описание асимметрии профиля спектральной линии для случаев одно- и двухфотонного поглощения (рис.). Реализация новой физики, ожидаемой в атомно-резонансной спектроскопии в ближайшем будущем, за пределами резонансного приближения не представляется возможной без преодоления этих проблем.



Асимметрия профиля линии, вызванная эффектами за рамками резонансного приближения: а – симметричный контур Лоренца, совмещенный с «полным» (линейная шкала); б – логарифмическая шкала; в – увеличенная область максимума (логарифмическая шкала); г – разница симметричного и асимметричного профилей в зависимости от частоты и угла между поглощенным и излученным фотонами

1. Solovyev D., Anikin A., Zaliutdinov T., Labzowsky L. // Phys. Rev. A. 2024. V. 109. P. 022806.

2. Solovyev D., Zaliutdinov T., Anikin A., Labzowsky L. // Phys. Rev. A. 2024. V. 109. P. 052802.

g -факторы молекулы YbOH во внешнем электрическом поле

А. Н. Петров

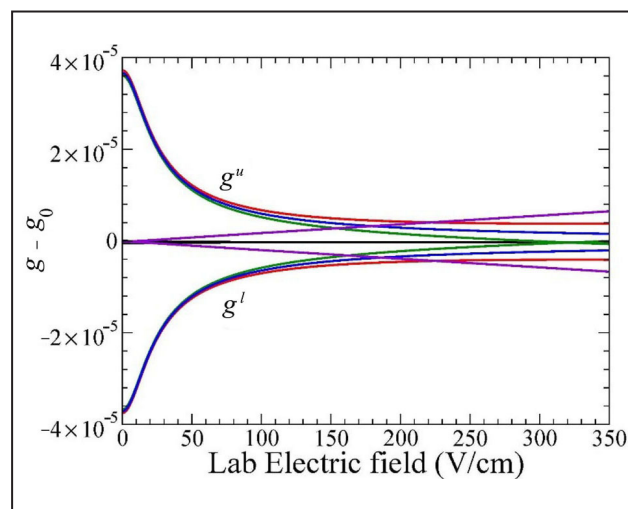
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Наблюдение величины электрического дипольного момента электрона (еЭДМ, d_e) на уровне, существенно большем, чем 10^{-35} е · см (предсказание в рамках Стандартной модели), будет свидетельствовать о наличии новой физики за рамками Стандартной модели. Наилучшие ограничения на еЭДМ были получены в экспериментах с двухатомными молекулами ThO ($d_e < 1,1 \cdot 10^{-29}$ е · см) и HfF⁺ ($d_e < 4,1 \cdot 10^{-30}$ е · см). Выдающийся успех в поиске еЭДМ на данных молекулах связан со структурой Ω -удвоения (два близких уровня противоположной четности) рабочих состояний. Структура Ω -дублетов позволяет подавлять систематические эффекты, вызванные магнитным полем. Степень подавления систематических ошибок определяется фактором $\Delta g/g$, где g – усредненное значение g -факторов Ω -дублетов, а Δg – их разница. Для ThO и HfF⁺ значения $g \sim 10^{-3}$, $\Delta g \sim 10^{-6}$, $\Delta g/g \sim 10^{-3}$ позволяют весьма эффективно устранять систематические ошибки, связанные с неуточненным магнитным полем.

С другой стороны, сложная структура возбужденных электронных состояний Ω -дублетов ThO и HfF⁺ делает их непригодными для лазерного охлаждения, что могло бы до трех порядков увеличить статистическую чувствительность. В связи с этим большой интерес для дальнейшего прогресса в поиске еЭДМ представляют линейные трехатомные молекулы, такие как YbOH, RaOH и др. Такие молекулы в первом возбужденном колебательном (но в основном электронном) состоянии обладают структурой I -удвоения, которая связана с ненулевым колебательным моментом и несет все преимущества Ω -дублетов

двухатомных молекул, но, будучи не связанной с электронной структурой, не препятствует лазерному охлаждению. g -факторы I -дублетов порядка единицы, что примерно на три порядка больше, чем для Ω -дублетов ThO и HfF⁺. Разница Δg для I -дублетов никогда не исследовалась и до нашей работы была неизвестна даже по порядку величины.

В данной работе на примере молекулы YbOH мы определили основные вклады в Δg и рассчитали зависимость g -факторов как функции внешнего электрического поля для различных параметров модели (рис.). Для комфортного для эксперимента значения электрического поля (100–300 В/см) получили оценку $\Delta g \sim 10^{-4} - 10^{-5}$. Таким образом, отношение $\Delta g/g \sim 10^{-4} - 10^{-5}$ от одного до двух порядков величины меньше соответствующего значения для ThO и HfF⁺.



g -факторы верхних (g^u) и нижних (g^l) компонент I -дублетов YbOH для различных параметров модели

Расчет матриц плотности релятивистским методом связанных кластеров в пространстве Фока и конструирование компактных атомных базисных наборов

А. В. Олейниченко, А. В. Зайцевский, Л. В. Скрипников

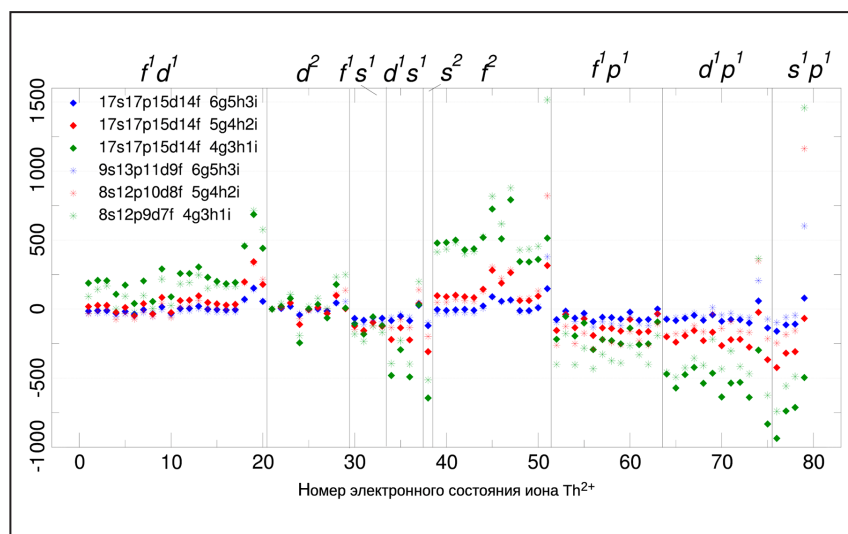
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В настоящее время релятивистский метод связанных кластеров, в частности его формулировка для пространств Фока (FS RCC), является одним из наиболее точных методов моделирования электронной структуры и надежного прогнозирования свойств, молекул и материалов, содержащих атомы тяжелых элементов. До недавних пор одной из важных и фактически не решенных проблем метода связанных кластеров для пространств Фока оставался вопрос создания эффективной процедуры расчета матриц плотности.

Был предложен новый подход к их приближенному вычислению, основанный на формализме эффективных операторов. Он заключается в подстановке экспоненциального волнового оператора метода связанных кластеров в выражение для эффективного оператора матрицы плотности с последующим усечением разложения на членах, квадратичных по кластерным амплитудам. Новый метод расчета матриц плотности был ре-

ализован в пакете программ EXP-T, разрабатываемом в отделе квантовой физики и химии НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

Разработанный метод расчета матриц плотности открыл возможность создания весьма компактных базисных наборов гауссовых функций, ориентированных на полностью релятивистские расчеты возбужденных состояний и спектров соединений тяжелых элементов. В качестве демонстрационного применения новой методики был построен ряд сжатых базисных наборов для тория, оценена их точность (рис.). Показано, что погрешность, обусловленная приведением базиса к компактной форме, сбалансирована для всего спектра электронных состояний. Планируется практическое применение созданных базисных наборов для прогнозирования свойств материалов, содержащих атомы тяжелых f -элементов (лантаноидов и актиноидов).



Погрешность (см^{-1}) расчета энергий возбуждения атомного иона Th^{2+} методом связанных кластеров в пространстве Фока для различных компактных базисных наборов гауссовых функций относительно расчета с использованием базиса примитивных (несжатых) функций состава ($17s17p15d14f8g7h5i$)

Тонкие структуры в положениях нейтронных резонансов и выделенность масс лептонов

С. И. Сухоручкин, З. Н. Сороко

Отделение физики нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

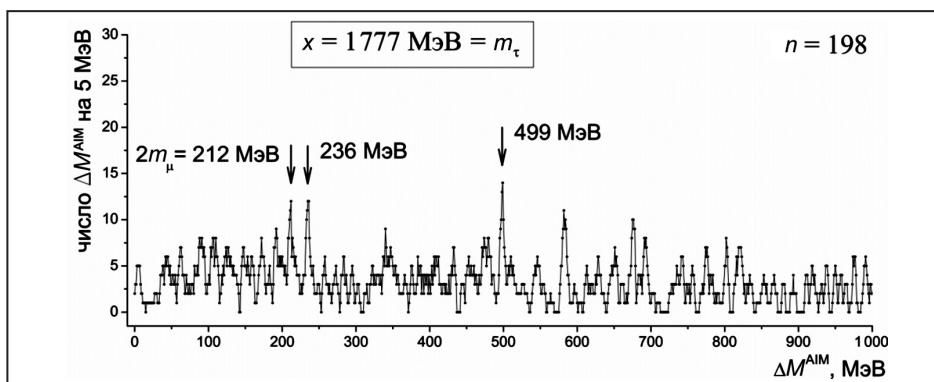
Параметры тонкой ($\varepsilon' = 1,2$ кэВ) и сверхтонкой ($\varepsilon'' = 1,34$ эВ) структур были введены эмпирически как проявление нестатистических эффектов в положениях нейтронных резонансов. Дискретность с единым параметром $\delta = 16m_e$ в ядерных состояниях оказалась связана с общими свойствами спектра масс частиц, $\alpha/2\pi = \varepsilon'' : \varepsilon' = \varepsilon : 2m_e = m_e : M_q = m_\mu : M_Z = M_q : 3M_H^0$. Обращалось внимание на совпадение максимумов в распределении разностей масс частиц с массами мюона 106 МэВ, ω -мезона 782 МэВ и массой τ -лептона 1777 МэВ, которая составляет удвоенное значение суммы масс мюона и ω -мезона. При использовании корреляционного метода сопутствующих интервалов, где исходный интервал равен массе τ -лептона, было получено распределение (рис.), в котором отмечен максимум, равный удвоенной массе мюона. Независимое проявление массы мюона и удвоенной его массы означает выделенный характер массы мюона.

Точное удвоение массы мюона в максимуме (212 МэВ, см. рис.) позволяет предположить наличие единого механизма происхождения масс частиц и ядерных возбуждений, а именно симметризации, основанной на лептонах.

Масса ω -мезона является удвоенным значением массы конституентного кварка $M_q^\omega = 391$ МэВ, $m_\omega = 2M_q^\omega = 6f_\pi = 6 \cdot 16 \cdot 16m_e$, где $f_\pi = 130,8$ МэВ. Получается, что масса ω -мезона (сильное взаимодействие) выражается через массы лептонов (электромагнитное взаимодействие), т. е. электрона, мюона и τ -лептона, которые являются фундаментальными (бесструктурными) элементарными частицами.

Отмечается также выделенность определенных чисел (13, 16 и 17) в кратных соотношениях масс частиц и энергий ядерных состояний. Числа 13 и 17 соответствуют массам мюона ($m_\mu = 13 \cdot 16m_e - m_e$) и пиона ($m_\pi = 17 \cdot 16m_e + m_e$). Число 16 соответствует симметризации по спину и заряду ($\delta = 16m_e$), а также пионному параметру $f_\pi = 16 \cdot 16m_e$. Иллюстрацией выделенности этих определенных чисел является отношение масс мюона и электрона (здесь лептонное отношение) $L = 207 = 13 \cdot 16 - 1$. Оно соответствует дырочной конфигурации.

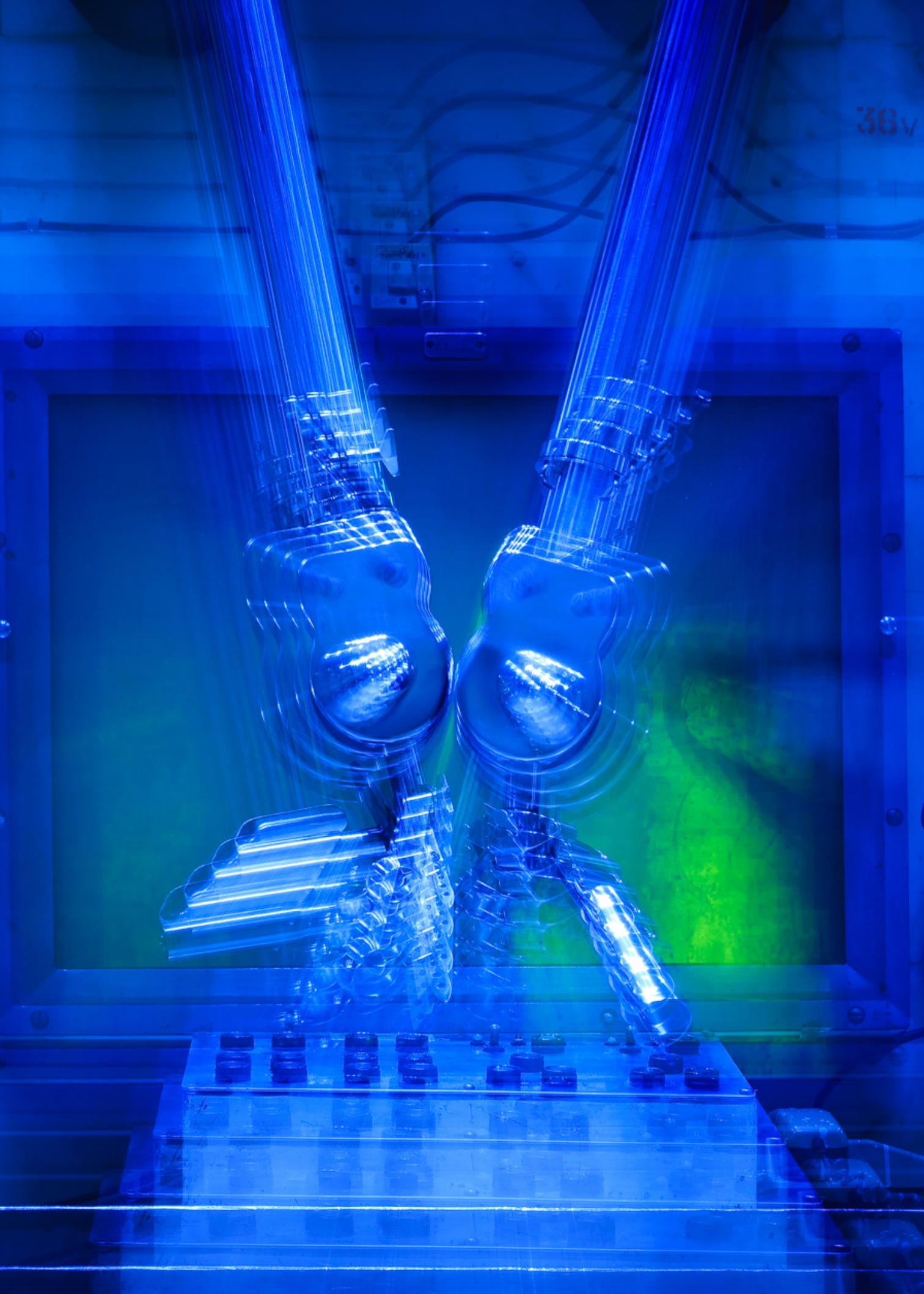
Приведенный пример (см. рис.) показывает возможности глобального метода анализа, когда в распределение берутся все элементы спектра ядерных возбуждений или масс частиц.



ΔM^{AIM} -распределение разностей масс частиц из PDG-2020

1. Sukhoruchkin S.I., Soroko Z.N. // Proc. of the ISINN-30. Dubna: JINR, 2024. P. 47–54.

2. Sukhoruchkin S.I. New Physics in the Standard Model Based on the Electron and Its Symmetry. UK: Cambridge Scholars Publ., 2025. P. 1–184.



Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов

- 52 Структурный анализ ионогелей: исследование тетрафторбората 1-метил-3-октил-имидазолия, заключенного в аэросиле
- 53 Кристаллическая и магнитная структуры, магнитные свойства хирального PbMnTeO_6 по данным нейтронной дифракции
- 55 Структурные и магнитные свойства SmCrTiO_5
- 57 Структура и электропроводность тонких пленок AlN на Si
- 58 Эффект лантаноидного сжатия и фрактальные структуры Ln-эндофуллеренолов
- 59 Угловая анизотропия осколков деления и сечения деления ^{243}Am и ^{237}Np нейтронами с энергией до 500 МэВ

Структурный анализ ионогелей: исследование тетрафторбората 1-метил-3-октил-имидазолия, заключенного в аэросиле

Г. П. Колица^{1,2}, С. Ю. Котцов³, А. Е. Баранчиков³, А. А. Павлова¹, Т. В. Хамова²,
А. О. Бадулина^{3,4}, Ю. Е. Горшкова⁵, Н. А. Селиванов³, Н. П. Симоненко³,
М. Е. Никифорова³, В. К. Иванов³

¹ Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

³ Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН

⁴ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

⁵ Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований

Ионогели – новый класс гибридных материалов, содержащих в себе ионную жидкость (ИЖ), иммобилизованную в твердой матрице. ИЖ – расплавы органических солей, состоящие из пространственно-изолированных органических катионов и неорганических или органических анионов. ИЖ обладает уникальными свойствами: низкой температурой плавления, отсутствием давления насыщенных паров, высокой полярностью и электропроводностью, химической и термической устойчивостью, широким окном электрохимической стабильности, негорючестью. Большое внимание привлекают ионогели с использованием матриц на основе SiO_2 из-за простоты их производства и широкого спектра применения: от создания суперконденсаторов и биосенсоров до доставки лекарств.

В настоящей работе ионогели были получены путем пропитки SiO_2 (Aerosil® A380) ИЖ 1-метил-3-октил-имидазолий тетрафторборатом ($\text{OMIM}^+ \text{BF}_4^-$). Содержание ИЖ в ионогелях варьировалось от 16,3 до 79,9 мол. %. Об удержании ИЖ в кремнеземе свидетельствовало смещение и уширение сигнала ядерного магнитного резонанса BF_4^- ^{19}F , а также заметное ($\sim 50^\circ\text{C}$) снижение температуры разложения ИЖ. Для ионогелей и чистой ИЖ частоты ИК-колебаний различались, что подтверждает эффект удержания ИЖ в матрице SiO_2 .

В ходе исследований были обнаружены резкие изменения в структуре $\text{OMIM}^+ \text{BF}_4^-$ при ее смешивании

с порошком SiO_2 (рис.). Анализ текстурных характеристик показал, что при добавлении ИЖ к SiO_2 она последовательно адсорбируется в микропорах, мезопорах и в межчастичном пространстве. Взаимодействие ИЖ с поверхностью кремнезема, скорее всего, обусловлено адсорбцией аниона BF_4^- . Данные малоуглового рентгеновского рассеяния позволили проследить структурные различия в ионогелях с различным содержанием ИЖ. Важно отметить, что полученные данные показали, что структура твердой фазы практически не меняется при заполнении ИЖ, а структура ИЖ – наоборот, что проявилось в примерно 20%-ном изменении длины корреляций «анион – алкил – анион». Для ИЖ, заключенной только в микропорах, такие корреляции не могли быть надежно установлены, что указывает на очень сильные изменения в структуре ИЖ.

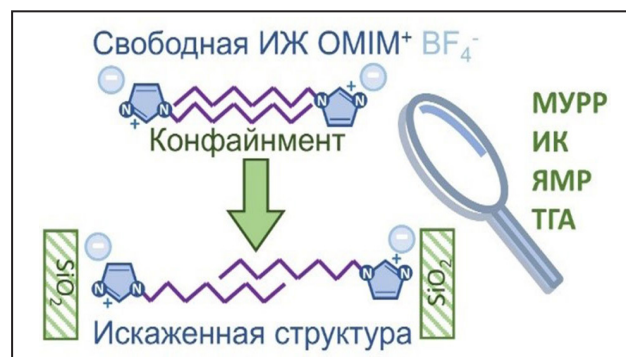


Схема конфайнмента ионной жидкости в ионогелях $\text{SiO}_2/\text{OMIM}^+ \text{BF}_4^-$

Кристаллическая и магнитная структуры, магнитные свойства хирального PbMnTeO_6 по данным нейтронной дифракции

А. И. Курбаков¹, А. N. Korshunov², S. Nishimoto^{3,4}

¹ Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Donostia International Physics Center, Spain

³ Department of Physics, Technical University Dresden, Germany

⁴ Institute for Theoretical Solid State Physics, Germany

Работа посвящена исследованию магнитных свойств и спинового порядка квазидвумерного хирального оксида PbMnTeO_6 на основе сотовых слоев $[\text{MnTeO}_6]^{2-}$ с тригональным расположением магнитных ионов марганца. Изучаемое соединение принадлежит к семейству материалов, которые проявляют нелинейные физические свойства и поэтому являются многообещающими пьезоэлектриками и сегнетоэлектриками, фотокатализаторами, элементами нелинейно-оптических устройств с генерацией второй гармоники и т. д. Также данное соединение представляет интерес как новый многообещающий мультиферроик из-за сочетания хиральности кристаллического строения с дальним магнитным упорядочением с $T_N \approx 20$ К. Магнитное упорядочение PbMnTeO_6 было экспериментально исследовано методом нейтронной порошковой дифракции (NPD) и теоретически с помощью высокотемпературного разложения (НТЕ), ренорм-группового подхода к матрице плотности (DMRG) и линейной теории спиновых волн (LSWT).

NPD при $T = 300$ К, проведенная на дифрактометре HRPT, SINQ, Институт им. Пауля Шеррера (PSI, Швейцария), $\lambda = 1,494$ Å, однозначно определила октаэдрическую (тригональную антипризматическую) координацию для всех катионов в хиральной пр. гр. $R\bar{3}12$. PbMnTeO_6 состоит из слоев с соединенными по общим ребрам октаэдрами MnO_6 и TeO_6 , которые вместе образуют сотовую сверхструктуру с треугольным упорядочением магнитных ионов Mn^{4+} в плоскостях ab . В то же время между слоями $[\text{MnTeO}_6]^{2-}$ вдоль c -направления расположены Pb-содержащие октаэдры.

Магнитная структура PbMnTeO_6 при $T = 1,6$ К определялась по NPD на дифрактометре DMC, SINQ, PSI, $\lambda = 1,886$ Å (рис. 1а). Она оказалась довольно сложной и хорошо описывается магнитным волновым вектором $\mathbf{k}_1 = (1/3 \ 1/3 \ 0,4077)$, что соответствует элементарной магнитной ячейке, соизмеримой с кристаллической в сотовой плоскости ab , в которую вносится несоизмеримость по направлению ук-

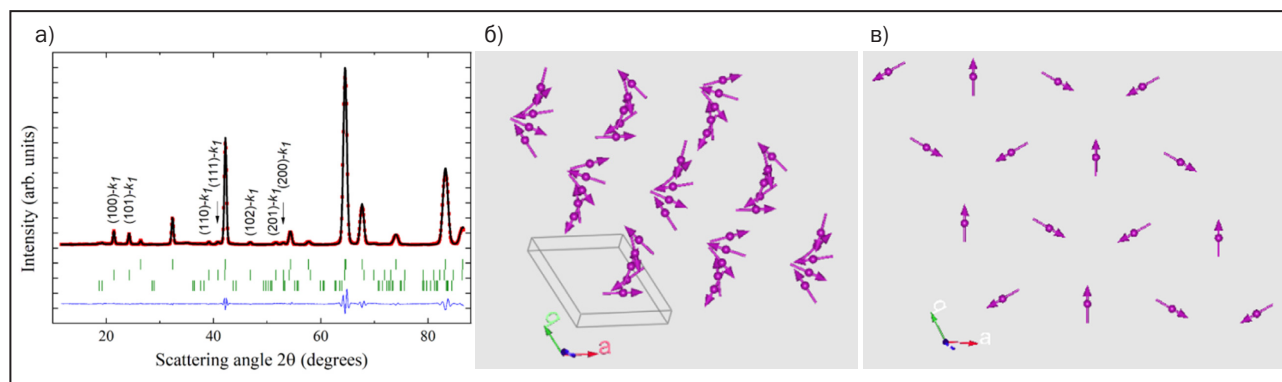


Рис. 1. Ритвельдовское уточнение магнитной структуры PbMnTeO_6 на основании нейтронограммы, измеренной на дифрактометре DMC при $T = 1,6$ К (а); общий вид магнитной структуры (б); 120° -ное упорядочение магнитных моментов в ab -слое (в)

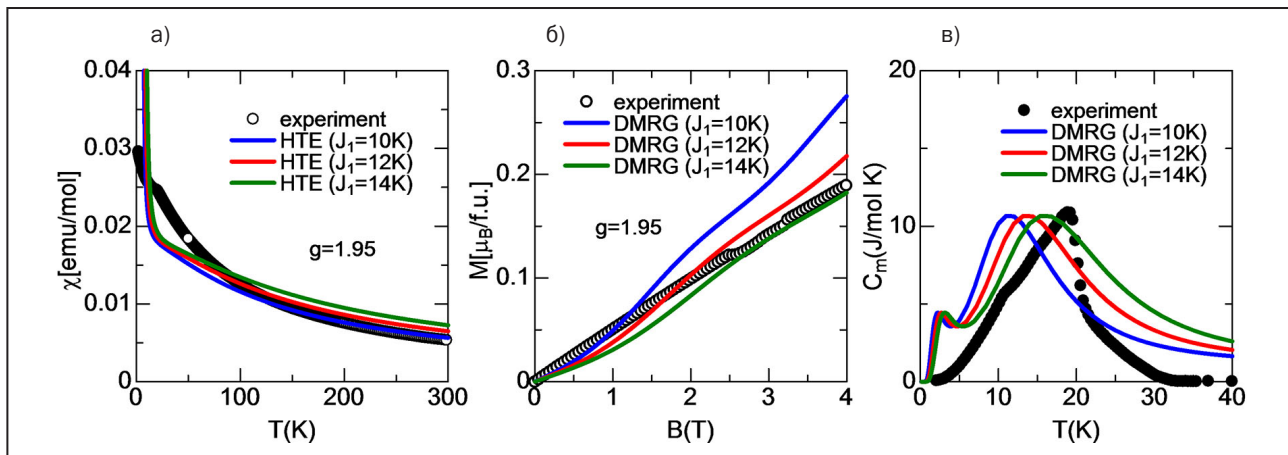


Рис. 2. Подгонка экспериментальных измерений под спиновую модель: а – магнитная восприимчивость; б – кривая намагниченности; в – удельная теплоемкость

ладки слоев с. Полученная магнитная структура имеет форму спирали, распространяющейся вдоль направления с (рис. 1б), а магнитные моменты полностью расположены в плоскостях и образуют треугольную конфигурацию со 120° -ной структурой (рис. 1в). Магнитные моменты в слое естественным образом вращаются друг относительно друга при переходе от слоя к слою.

Предлагается модель Гейзенберга с треугольной решеткой $S = 3/2$ в качестве эффективной основы для понимания магнитных свойств PbMnTeO_6 . Так как наблюдаемое основное

состояние представляет собой неколлинеарную 120° -ную спиновую структуру, то ожидается, что взаимодействие ближайших соседей (J_1) будет доминирующим. Мы оцениваем эффективное значение J_1 путем подгонки экспериментальных данных (рис. 2) к спиновой модели. Из $\chi(T)$ по HTE, $M(B)$ и $C_m(T)$ по DMRG можно оценить эффективное взаимодействие ближайших соседей как $J_1 = 12 \pm 2$ K. Используя это значение J_1 , температуру Вейсса можно оценить как $\Theta = -S(S + 1)J_1 = 45 \pm 7,5$ K, что согласуется с $\Theta_{\text{exp}} = -38$ K, полученным из подгонки $\chi(T)$.

Структурные и магнитные свойства SmCrTiO_5

А. Е. Суслопарова, А. И. Курбаков

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Проведено подробное и всестороннее изучение структурных и магнитных свойств соединения SmCrTiO_5 , члена семейства RM_2O_5 , со смесью переходных металлов Cr^{3+} и Ti^{4+} , один из которых, d^0 -ион Ti^{4+} , имеет нулевой магнитный момент. Исследования проведены температурно-зависимыми методами рентгеновской, синхротронной и нейтронной порошковой дифракции и измерениями температурных и полевых зависимостей намагниченности.

Кристаллическая структура SmCrTiO_5 описана в рамках ромбической пространственной группы $Pbam$. Она построена из MO_5 квадратных пирамид и MO_6 -октаэдров. Катионы Sm^{3+} занимают многогранники с координацией восемь, которые имеют общие ребра с двумя другими многогранниками. Установлено, что катионы Cr^{3+} и Ti^{4+} имеют выраженное предпочтение к различным кристаллографическим позициям, образуя две подрешетки. Магнитные ионы d^3 Cr^{3+} занимают октаэдры, которые связаны по ребрам, образуя цепочки вдоль оси c , тогда как не-

магнитные d^0 -ионы Ti^{4+} находятся в квадратных пирамидах, образуя димеры в плоскости ab (рис. 1).

Кривые магнитной восприимчивости демонстрируют широкий сигнал ниже 195 К с максимумом около 100 К, что характерно для 1D-антиферромагнетизма. Дальний магнитный 3D-порядок появляется только при температуре ниже 12 К, как показывает нейтронная порошковая дифракция (NPD).

NPD указывает на одномерные гейзенберговские цепочки Cr^{3+} вдоль оси c . Взаимодействие между цепочками либо слабое, либо фрустрированное, что исключает дальний порядок вплоть до низких температур. При этом внутрицепочечная антиферромагнитная связь – сильная.

Уточненная магнитная структура дополнительно подтверждается расчетами электронной структуры (рис. 2). На основе этих данных предложена модель спинового упорядочения в основном состоянии. Поскольку особенности структуры характерны для чередующихся анти-

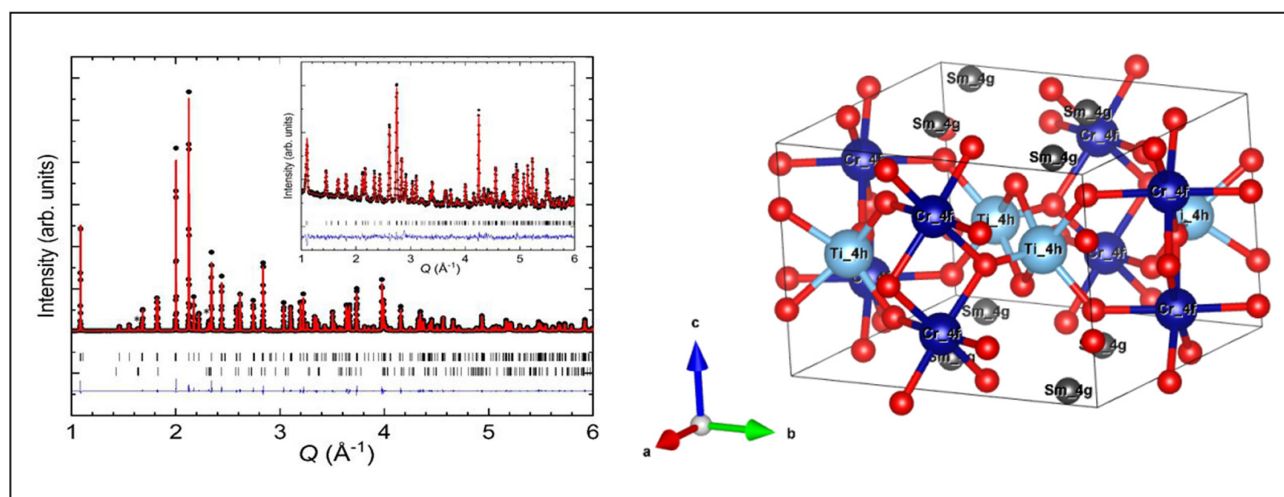


Рис. 1. Синхротронная дифрактограмма, измеренная при $T = 300$ К; на врезке – соответствующая нейтронограмма (слева); 3D кристаллическая структура SmCrTiO_5 , построенная на основе данных рисунка слева (справа)

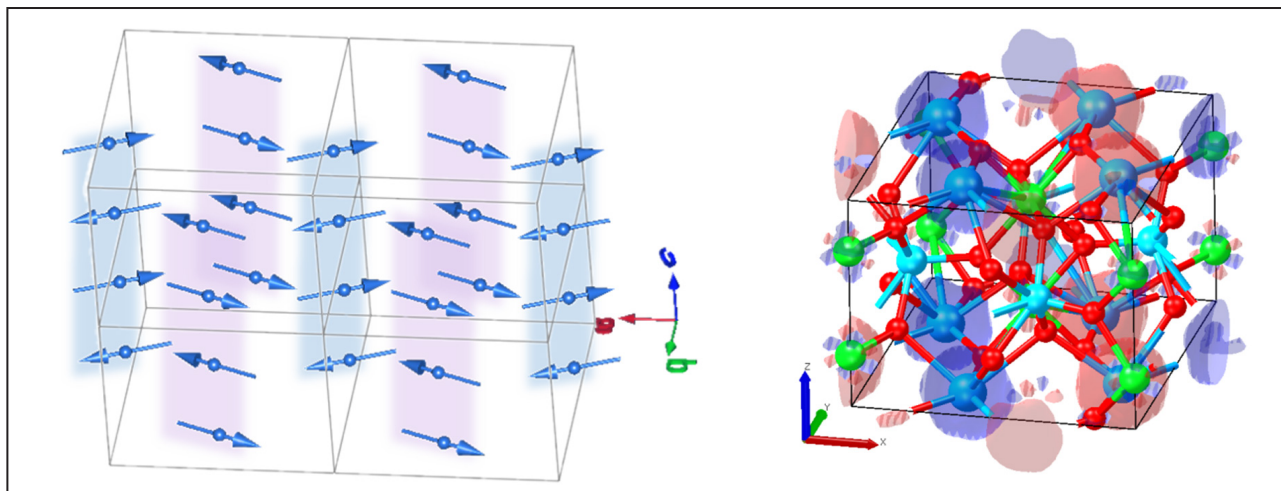


Рис. 2. 3D магнитная структура SmCrTiO_5 при 1,6 К; стрелками указаны направления магнитных моментов ионов Cr, расположенных в центре кислородных тетраэдров в кристаллографической позиции $4f$ (0 0,5 z), четко видны АФМ-цепочки вдоль направления c ; фоном разного цвета выделены группы спинов с разными отклонениями от оси a (слева). Плотность намагниченности (изоповерхности 0,03 и $-0,03$ е/Å³ изображены синим и красным соответственно) вдоль направления x , рассчитанная для x -оси магнитного квантования (справа)

ферромагнитных цепочек Гейзенберга, магнитные свойства SmCrTiO_5 сравниваются с его аналогом SmCrGeO_5 , имеющим спиновую щель.

Ярко представленное взаимодействие между распределением катионов, структурными эффектами и магнитным поведением делает SmCrTiO_5 привлекательной платформой для изучения ма-

териалов с высокочкоррелированными свойствами. Кроме того, SmCrTiO_5 можно рассматривать как модельное соединение для физиков из-за его линейных цепочек из октаэдров CrO_6 , которые не подвержены магнитной фрустрации как в случае тригональных структур, что делает его уникальным.

Структура и электропроводность тонких пленок AlN на Si

Н. В. Базлов, Н. В. Ниязова, И. М. Котина, М. В. Трушин, А. С. Бондаренко

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Для детектирования α -частиц и осколков деления используются поверхностно-барьерные (ПБ) детекторы на основе кремния n -типа проводимости, ПБ-детекторы на основе кремния p -типа проводимости не получили широкого распространения ввиду изменчивости их рабочих параметров в процессе эксплуатации. Поскольку p -Si возможно производить с удельным сопротивлением до ~ 100 кОм $\cdot$ см, ПБ-детекторы на основе p -Si могут иметь глубину чувствительной области до 2–3 мм, что дает возможность использовать их для регистрации длиннопробежных частиц.

В качестве возможного решения проблемы нестабильности параметров p -Si ПБ-детекторов предложено введение туннельно-прозрачного слоя диэлектрика нитрида алюминия (AlN) между металлическим контактом и полупроводником. Для формулирования рекомендаций по оптимизации технологий изготовления этих структур проведены исследования структуры интерфейса AlN–Si и механизмов токопереноса в пленке AlN.

Пленки нитрида алюминия синтезировались на кремниевых подложках методом реактивного магнетронного распыления с различной толщиной от 2 до 150 нм. Исследования ПЭМ-методом показали, что пленки AlN содержали кристаллическую и аморфную фазы (рис. 1). Большая часть аморфной фазы сосредоточена в приповерхностном слое толщиной до 10 нм. Предполагается, что образование аморфного слоя обусловлено наличием остаточного кислорода в вакуумной камере. По мере расходования кислорода в камере за счет геттерирования распыляемым алюминием структура пленки менялась с аморфной на нанокристаллическую. Измеренная проводимость пленок AlN толщиной до 20 нм оказалась довольно высокой – до 10 (Ом $\cdot$ см) $^{-1}$, что связано с большой плотностью границ зерен в аморфной матрице. При увеличении толщины пленки свыше 20 нм проводимость падала до $\sim 10^{-7}$ (Ом $\cdot$ см) $^{-1}$ вслед за уменьшением плотности границ зерен (рис. 2).

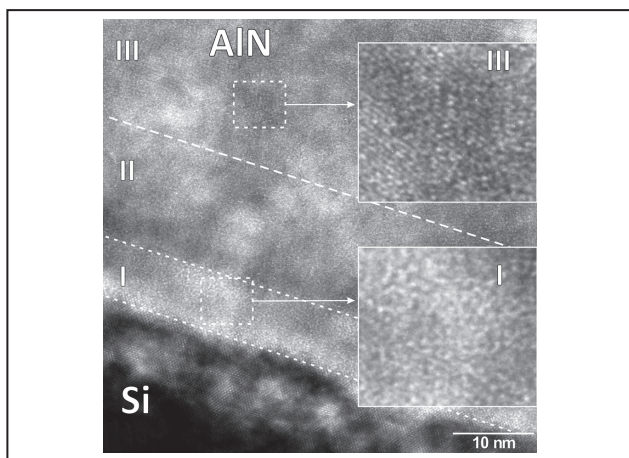


Рис. 1. Поперечное ПЭМ-изображение образца с пленкой AlN толщиной 120 нм. Пунктирные линии разделяют приповерхностный аморфный слой I, переходный слой II с аморфной и нанокристаллической фазами и нанокристаллический слой III

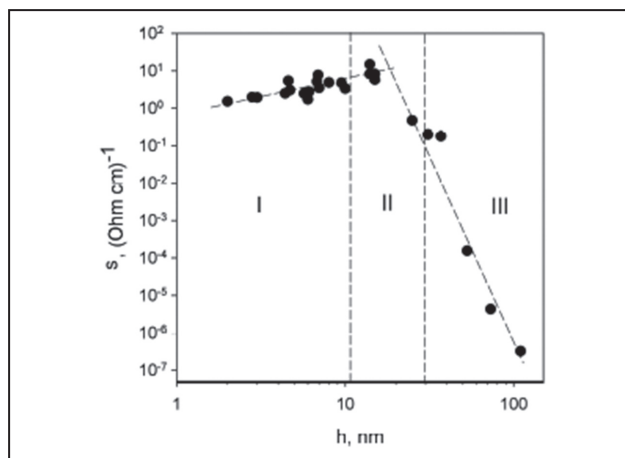


Рис. 2. Зависимость проводимости от толщины осаждаемых пленок AlN. Указанные области I, II и III соответствуют слоям на ПЭМ-снимке. Измерения проводились при комнатной температуре

Эффект лантаноидного сжатия и фрактальные структуры Ln-эндофуллеренолов

В. Т. Лебедев, М. В. Ремизов, В. С. Козлов, В. Г. Зиновьев, Д. А. Румянцева,
И. А. Митропольский

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Синтезированы и изучены эндофуллеренолы (ЭФ) $\text{Ln}@\text{C}_{82}(\text{OH})_x$ ($x = 38-40$) с лантаноидами в углеродном каркасе – молекулярные магниты размером ~ 1 нм, способные служить спиновыми метками, контрастными агентами и фотосенсибилизаторами в тераностике (рис. 1). Методом EXAFS установлено, что расстояние между Ln-ионом (в основном Ln^{3+}) и внутренней границей клетки фуллерена растет линейно с атомным номером $Z = 59-69$ в ряду от Pr до Tm, $R_1(Z) = R_{\text{Pr}} + \alpha(Z - 59)$, с коэффициентом $\alpha = (5,3 \pm 2,6) \cdot 10^{-3}$ нм и радиусом R_{Pr} , отвечающим празеодиму, из-за прогрессирующего сжатия и усиления электроотрицательности Ln (рис. 2). Пропорционально длине $R_1(Z)$ увеличивается электрический дипольный момент молекул за счет передачи электронов с атома лантаноида на фуллерен. Это стимулирует организацию молекул в разветвленные фрактальные структуры размерностью $D_f = 2,7 \pm 0,3$ согласно данным рассеяния нейтронов в водных растворах ЭФ (температура 20 °С, концентрация 1,5 масс. %), показавшим, что числа аг-



Рис. 1. Фуллеренол $\text{Ln}@\text{C}_{82}(\text{OH})_x$

регации этих структур следуют степенной зависимости от их радиуса корреляции $r_c \sim 1-2$ нм, $n_c = (r_c/r_{cf})^{D_f}$, где $r_{cf} = 0,36 \pm 0,05$ нм – радиус корреляции молекулы фуллеренола (рис. 3).

Для фуллеренолов с лантаноидами (кроме празеодима) в ряду от Sm до Tm ($Z = 62-69$) наблюдали линейный рост радиуса корреляции и чисел агрегации: $r_c = r_{\text{csm}} + \beta(Z - 62)$, $\beta = 0,15 \pm 0,01$ нм; $n_c = n_{\text{csm}} + \delta(Z - 62)$, $\delta = 6,5 \pm 1,1$, где $r_{\text{csm}} = 0,68 \pm 0,05$ нм, $n_{\text{csm}} = 6,4 \pm 0,8$ – характеристики структур с самарием.

Результаты позволяют прогнозировать гидродинамическое поведение молекулярных ансамблей $\text{Ln}@\text{C}_{82}(\text{OH})_x$ в зависимости от характеристик эндодральных атомов, что важно для применений фуллеренолов.

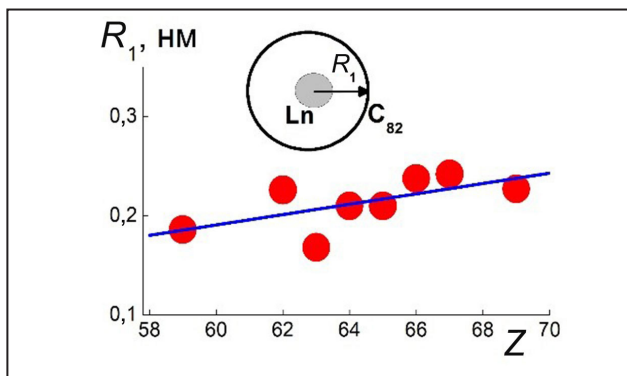


Рис. 2. Расстояние $R_1(Z)$ между ионом Ln и границей углеродного каркаса C_{82} в зависимости от атомного номера лантаноида

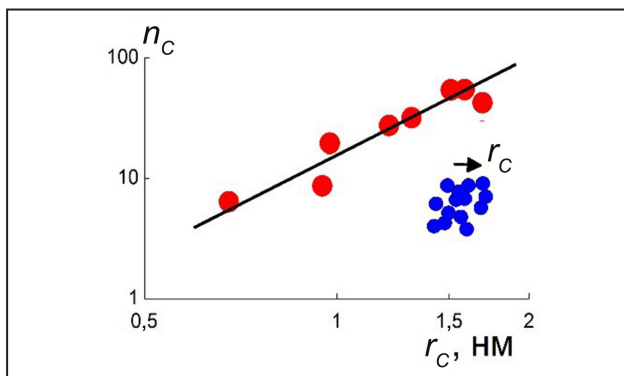


Рис. 3. Числа агрегации фуллеренолов $n_c(r_c)$ в зависимости от радиуса корреляции фрактальных структур. Показан масштаб корреляций r_c

Угловая анизотропия осколков деления и сечения деления ^{243}Am и ^{237}Np нейтронами с энергией до 500 МэВ

А. С. Воробьев¹, А. М. Гагарский², О. А. Щербаков¹, Л. А. Вайшене³,
А. М. Тягельская¹, Н. М. Ольхович¹, А. Л. Барабанов⁴

¹ Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

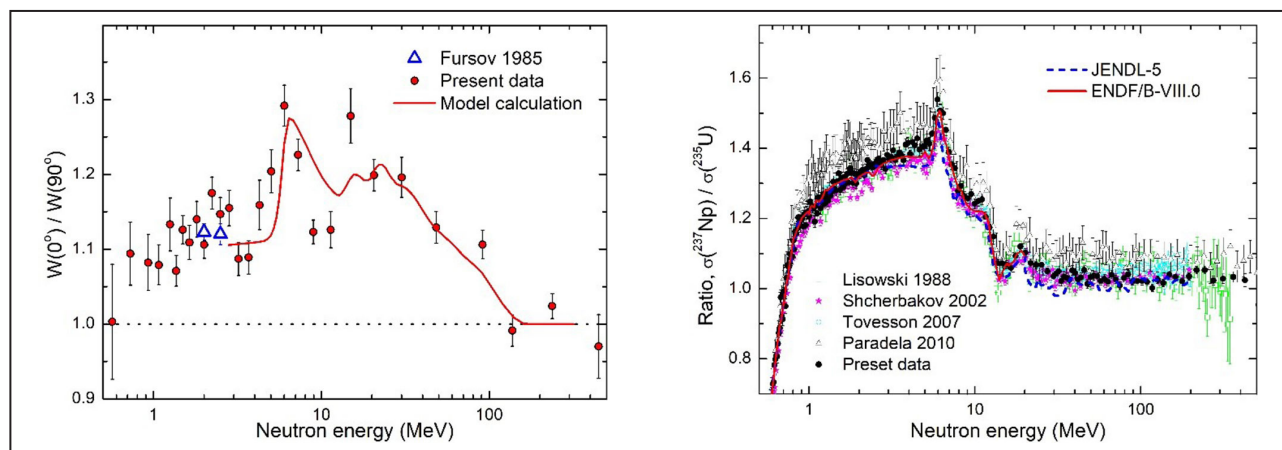
³ Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

⁴ НИЦ «Курчатовский институт»

Сечение деления и угловое распределение осколков деления являются основными характеристиками процесса деления. Их совместный теоретический анализ позволяет получить новую подробную информацию о барьерах деления, характеристиках ядер на барьерах, энергиях переходных состояний и роли предравновесных процессов во взаимодействии ядер с нейтронами. Точные данные по делению ядер, как делящихся, так и минорных актинидов (основной компоненты ядерных отходов), необходимы для конструирования современных и будущих ядерных реакторов, а также для проектирования установок на базе ускорителей, в т. ч. мощных источников нейтронов.

На нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ выполнены одновременные измерения

зависимости угловой анизотропии осколков и сечений деления ядер ^{243}Am и ^{237}Np нейтронами в широком диапазоне энергий от 0,3 до 500 МэВ. Осколки деления регистрировались при помощи позиционно-чувствительных многопроволочных пропорциональных счетчиков низкого давления. Сечение реакции (n, f) на ядрах ^{243}Am и ^{237}Np измерялось относительно стандарта – сечения реакции $^{235}\text{U}(n, f)$. Результаты измерений анизотропии угловых распределений осколков деления ^{243}Am (получены впервые) и отношения сечений деления ^{237}Np и ^{235}U представлены на рисунке. Сравнение полученных нами данных с результатами работ, выполненных ранее с использованием различных экспериментальных методик и источников нейтронов, свидетельствует о надежности использованного метода измерений и точности полученных результатов.



Анизотропия угловых распределений осколков деления ^{243}Am (слева) и сечения деления ^{237}Np (справа) в сравнении с результатами других работ и расчетов



Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино

- 62 Наблюдение эффекта квантовой запутанности в парном рождении топ- и антитоп-кварков в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере
- 63 Прецизионное измерение параметров CP -нарушения в распадах прелестных мезонов в эксперименте LHCb
- 64 Условия возможного проявления БФКЛ-эволюции на Большом адронном коллайдере при образовании двух струй с большим разделением по быстротам с использованием струйного вето
- 65 Бозон Браута – Энглера – Хиггса и область натуральности Стандартной модели
- 66 Прецизионное измерение массы и ширины распада W -бозона в экспериментах CMS и ATLAS на Большом адронном коллайдере
- 68 Исследование интерференционных эффектов в когерентном фоторождении ρ -мезонов в эксперименте ALICE
- 69 Оболочечный эффект в зарядовых радиусах и магнитных моментах изотопов таллия вблизи магического числа $N = 126$
- 70 Высокопрецизионное измерение энергии распада ^{163}Ho для определения массы нейтрино
- 71 Поиск аксиоэлектрического эффекта в атомах Kr для солнечных аксионов

Наблюдение эффекта квантовой запутанности в парном рождении топ- и антитоп-кварков в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере

С. Г. Барсов, А. А. Воробьев, Г. Е. Гаврилов, В. Т. Грачев, В. Л. Головцов, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. Т. Ким, П. М. Левченко, В. П. Малеев, В. А. Мурзин, Ю. Г. Нарышкин, В. А. Орешкин, Д. Пуджа, В. М. Соловьев, Д. Е. Соснов, В. В. Сулимов, Л. Н. Уваров, О. Л. Федин, В. А. Щегельский

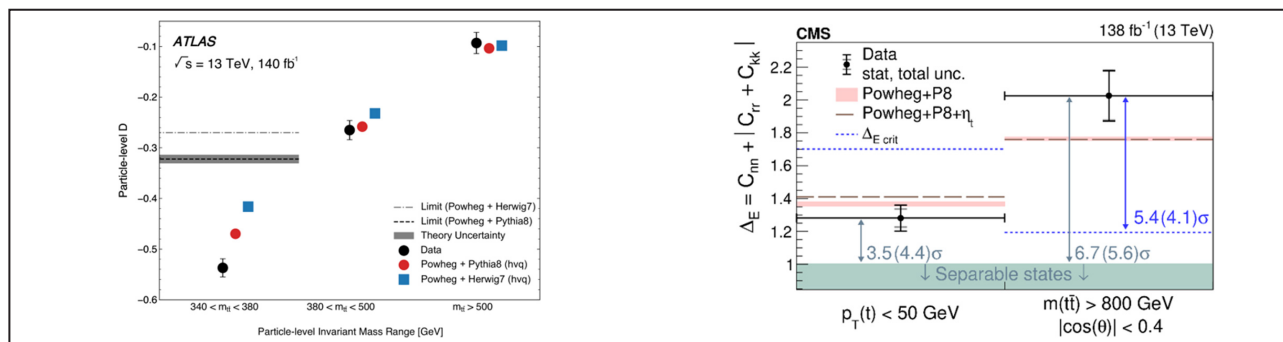
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
Колаборация ATLAS, колаборация CMS

В основе Стандартной модели лежит квантовая механика, одной из ключевых особенностей которой является эффект квантовой запутанности. Если две частицы находятся в «запутанном» состоянии, то квантовое состояние одной частицы не может быть описано независимо от другой, что математически выражается в том, что общая спиновая матрица плотности системы частиц не может быть представлена как тензорное произведение матриц плотности подсистем.

Для обнаружения эффекта квантовой запутанности в экспериментах ATLAS и CMS исследовались спиновые корреляции пар, состоящих из топ- (t) и антитоп- ($\bar{t}$) кварков. Тяжелые t -кварки идеально подходят для таких исследований из-за своих уникальных свойств, поскольку t -кварк распадается задолго до процессов адронизации и последующей спиновой декорреляции. Для отбора событий, находящихся в запутанном

состоянии, использовался критерий Переса – Гордеевского. Спиновая запутанность определялась с помощью измерения параметров запутанности D или $\tilde{D}$, зависящих от диагональных элементов спиновой матрицы плотности (рис.). На основании проведенного анализа данных, накопленных за второй период работы Большого адронного коллайдера, впервые наблюдался эффект квантовой запутанности на уровне кварков в области малых значений инвариантной массы системы $t\bar{t}$ ($m_{t\bar{t}}$), в которой пара $t\bar{t}$ рождается преимущественно в синглетном состоянии (максимально запутанном по спину), и для больших значений $m_{t\bar{t}}$, где доминирует триплетное состояние пары $t\bar{t}$, являющееся частично запутанным.

Полученные в обоих экспериментах результаты хорошо согласуются между собой и имеют статистическую значимость более пяти стандартных отклонений.



Измеренные значения параметра запутанности D в зависимости от $m_{t\bar{t}}$ и его ожидаемые значения, рассчитанные с использованием Монте-Карло-моделирования с помощью генераторов POWHEG + PYTHIA8 (hvv), полученные в эксперименте ATLAS (слева), и для параметра запутанности $\tilde{D}$ в области с большими значениями $m_{t\bar{t}}$, полученные в эксперименте CMS (справа)

1. ATLAS Collab., ..., Fedin O., Ezhilov A., Levchenko M. et al. // Nature. 2024. V. 633. Iss. 8030. P. 542–547.
2. CMS Collab., ..., Gavrilov G., Golovtsov V., ..., Kim V. et al. // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. P. 112016.
3. CMS Collab., ..., Gavrilov G., Golovtsov V., ..., Kim V. et al. // Rept. Prog. Phys. 2024. V. 87. P. 117801.

Прецизионное измерение параметров CP -нарушения в распадах прелестных мезонов в эксперименте LHCb

Н. Ф. Бондарь, Н. И. Воропаев, А. А. Дзюба, К. А. Ившин, Д. С. Ильин, П. В. Кравченко, Н. Р. Сагидова, А. Н. Соловьев, И. Н. Соловьев, А. Д. Чубыкин, В. В. Чуликов

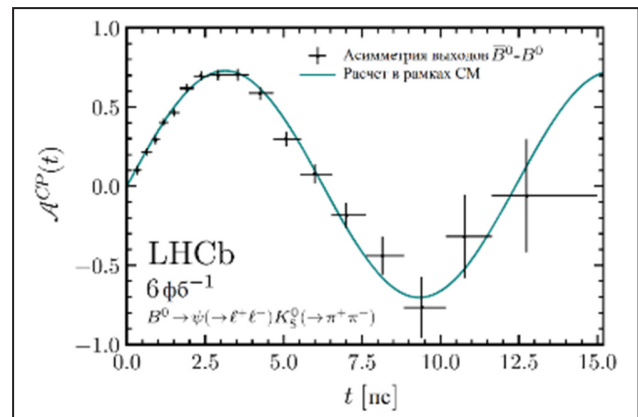
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
Коллаборация LHCb

Поиски новых источников нарушения CP -четности важны для понимания эволюции Вселенной в первые секунды после Большого взрыва. Отличие частиц от античастиц, проявляющееся в нарушении CP -инвариантности, – одно из условий, необходимых для объяснения образования барионной асимметрии Вселенной. В Стандартной модели (СМ) физики частиц CP -инвариантность нарушена в кварковом секторе. Этот эффект связан с ненулевой комплексной фазой элементов унитарной матрицы кваркового смешивания (ККМ-матрицы). Ожидается, что проявления новой физики, выходящей за пределы СМ, связаны с заметным нарушением CP -четности, поэтому одна из стратегий поиска таких эффектов основана на прецизионных измерениях элементов ККМ-матрицы и проверке условий ее унитарности.

В 2024 г. эксперимент LHCb опубликовал результаты прецизионных измерений параметров CP -нарушения: ϕ_s и $\sin(2\beta)$. Использовались данные, набранные в ходе второго этапа работы Большого адронного коллайдера при энергии взаимодействия протонов 13 ТэВ. Величины обеих наблюдаемых могут быть точно рассчитаны в рамках СМ на основании результатов независимых измерений другого типа и использовании свойства унитарности ККМ-матрицы. В представленных работах исследовались распады $B_s^0 \rightarrow \psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)\phi(\rightarrow K^+K^-)$ и $B^0 \rightarrow \psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)K_S^0(\rightarrow \pi^+\pi^-)$, а также распады соответствующих античастиц (символ ψ обозначает различные чармониевые резонансы). Был проведен анализ углов разлета частиц для каждого события в зависимости от времени, прошедшего с момента образования прелестной частицы. Величина

фазы ϕ_s оказалась мала: $-0,039 \pm 0,022$ (стат.) $\pm 0,006$ (сист.). Эффект CP -нарушения наиболее ярко проявляется в распределении для зависящей от времени CP -асимметрии ($A^{CP}(t)$, рис). В отсутствие эффекта данный параметр был бы тождественно равен нулю независимо от времени. В результате анализа было получено значение $\sin(2\beta) = 0,717 \pm 0,013$ (стат.) $\pm 0,008$ (сист.). Полученные значения ϕ_s и $\sin(2\beta)$ – самые точные на сегодняшний день и находятся в хорошем согласии в пределах имеющихся неопределенностей с результатами предыдущих измерений и с предсказаниями СМ.

Сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ принимали активное участие в создании, запуске и техническом сопровождении мюонной системы детектора LHCb, информация с которой использовалась для выделения сигнала от распада B_s^0 - и B^0 -мезонов.



Распределение для зависящей от времени CP -асимметрии, полученное для распадов $B^0 \rightarrow \psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)K_S^0(\rightarrow \pi^+\pi^-)$. Крестики соответствуют данным, а линия – результатам модели, используемой для извлечения параметров, описывающих исследуемые распады

Условия возможного проявления БФКЛ-эволюции на Большом адронном коллайдере при образовании двух струй с большим разделением по быстротам с использованием струйного вето

А. Ю. Егоров, В. Т. Ким

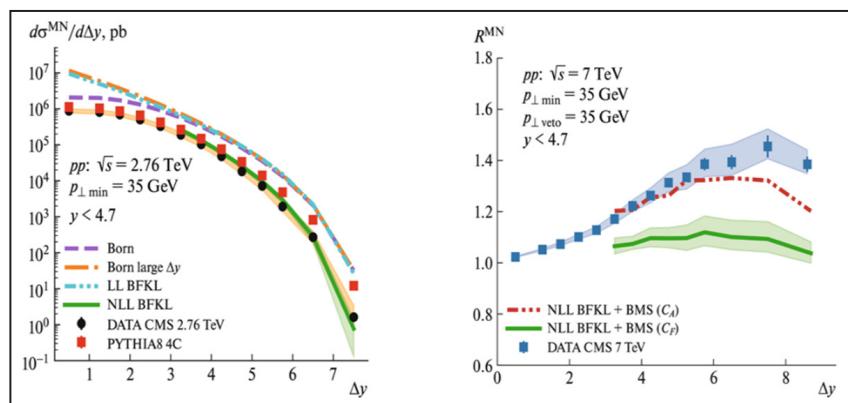
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ внес определяющий вклад в становление эволюции Грибова – Липатова – Альтарелли – Паризи – Докшицера (ГЛАПД), применимой в жестком высокоэнергетическом кинематическом режиме, а также в создание и развитие теории эволюции Балицкого – Фадина – Кураева – Липатова (БФКЛ), применимой в полужестком высокоэнергетическом режиме. Ожидается, что полужесткий режим станет доминирующим с увеличением энергии столкновения адронов на будущих ускорителях, таких как FCC и CEPC.

Группа Института выполнила ряд работ в составе эксперимента «Компактный мюонный соленид» (CMS) по поиску эффектов эволюции БФКЛ. Изучались события образования пар адронных струй с большим разделением по быстроте в протон-протонных столкновениях при энергиях 2,76 и 7 ТэВ, были представлены первые прямые свидетельства проявлений эффектов эволюции БФКЛ. Однозначной интерпретации полученных экспериментальных данных для части измеренных наблюдаемых препятствует отсутствие методов расчета с учетом следующего за главным логарифмическим приближения (СГЛП) в формализме БФКЛ, а также использование за пределами применимости моделей цветовой когерентности

в широко используемых Монте-Карло-генераторах событий, основанных на эволюции ГЛАПД. К таким наблюдаемым относятся сечения рождения пар адронных струй с вето на дополнительные струи.

Изучена возможность использования эволюции Банфи – Маркезини – Смая (БМС) для учета влияния условия вето на дополнительные струи в двухструйных сечениях. Ранее БМС-эволюция показывала хорошее согласие с наблюдаемыми, применяющими струйное вето и разработанными для поиска эволюции БФКЛ, измеренными коллаборацией ATLAS. Нами показано, что, в то время как учет СГЛП БФКЛ значительно улучшает согласие результатов расчетов с измерениями абсолютной величины сечения рождения пар адронных струй с максимальной разницей быстроты с поперечным импульсом выше определенного порога, так называемых пар струй Мюллера – Навеле (рис. а), учет вето на основе эволюции БМС недооценивает излучение дополнительных струй (рис. б) в условиях, когда отсутствует фазовое пространство для развития упорядоченного по поперечному импульсу партонного каскада. Таким образом, указывается на необходимость развития методов полного суммирования логарифмов БФКЛ для учета вето.



Двухструйное сечение Мюллера – Навеле; сравнение результатов СГЛП-расчетов с применением БФКЛ-эволюции с результатами измерения CMS при 2,76 ТэВ (слева); отношение двухструйного сечения Мюллера – Навеле к двухструйному сечению с вето; сравнение результатов расчетов с применением БМС-эволюции с результатами измерения CMS при 7 ТэВ (справа)

Бозон Браута – Энглера – Хиггса и область натуральности Стандартной модели

В. Т. Ким

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Изучение пределов применимости Стандартной модели (СМ) является одной из актуальных проблем, неразрывно связанных с проявлением эффектов новой физики. Одним из принципов, лежащих в основе физической квантовой теории поля, и, соответственно, СМ, является принцип натуральности. Он заключается в слабой чувствительности наблюдаемых параметров теории от предела масштаба импульсного обрезания, который определяет границу применимости данной теории.

Эволюция масс всех частиц СМ, как фермионов, так и векторных бозонов, согласуется с принципом натуральности, т. к. их эволюция в зависимости от масштаба имеет логарифмический ренормгрупповой характер, за исключением эволюции массы скалярного бозона Браута – Энглера – Хиггса (БЭХ). Квадрат массы скалярного бозона БЭХ имеет квадратичную расходимость в физических схемах перенормировки. Эта особенность является одним из аргументов, почему нужно было строить Большой

адронный коллайдер (БАК) в данном диапазоне энергий ~ 0 (1 ТэВ).

Данная оценка определения области натуральности СМ получилась при, казалось бы, естественном пренебрежении логарифмической зависимостью от масштаба обрезания на фоне квадратичной. Однако при обобщении критерия натуральности в общем случае было показано, что логарифмической зависимостью пренебрегать нельзя, что сказывается на определении границы применимости СМ. Для измеренной массы бозона БЭХ было получено, что СМ имеет большую область применимости ~ 0 (10 ТэВ), т. е. СМ более «натуральна», чем прежние оценки.

Таким образом, основываясь на принципе натуральности и на критерии, приведенном в Pivovarov G. B., Kim V. // Phys Rev. D. 2008. V. 78. No. 11. P. 016001, можно ожидать, что область применимости СМ более обширна, чем предполагалось ранее, и для проявления новой физики требуются энергии выше, чем на БАК.

Прецизионное измерение массы и ширины распада W -бозона в экспериментах CMS и ATLAS на Большом адронном коллайдере

А. А. Воробьев, В. Т. Ким, Ю. М. Иванов, А. Ю. Егоров, С. С. Волков, Г. Е. Гаврилов, В. Л. Головцов, Е. В. Кузнецова, П. М. Левченко, В. А. Мурзин, В. А. Орешкин, И. Б. Смирнов, Д. Е. Соснов, В. В. Сулимов, Л. Н. Уваров, С. Г. Барсов, В. Т. Грачев, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, В. А. Щегельский

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В низшем порядке в электрослабой теории Стандартной модели (СМ) физики элементарных частиц масса W -бозона m_W может быть выражена исключительно как функция массы Z -бозона m_Z постоянной тонкой структуры α и постоянной Ферми G_F . Поправки более высокого порядка вводят дополнительную зависимость массы W -бозона от калибровочных констант связи и масс тяжелых частиц СМ, таких как масса топ-кварка m_t и масса бозона Хиггса m_H .

Таким образом, в СМ физики элементарных частиц массы переносчиков слабого взаимодействия W - и Z -бозонов связаны уникальным образом. Физика за пределами СМ могла бы изменить эту связь посредством эффектов квантовых петель виртуальных частиц, что делает очень важным измерение этих масс с максимально возможной точностью. Хотя масса Z -бозона известна с замечательной точностью 22 части на миллион ($m_Z = 91\,188,0 \pm 2,0$ МэВ), масса W -бозона известна гораздо менее точно из-за большей сложности измерения. Глобальная аппроксимация электрослабых данных, используемая для предсказания массы W -бозона в СМ, дает неопределенность 6 МэВ. Достижение сопоставимой экспериментальной точности было бы чувствительным и фундаментальным тестом СМ.

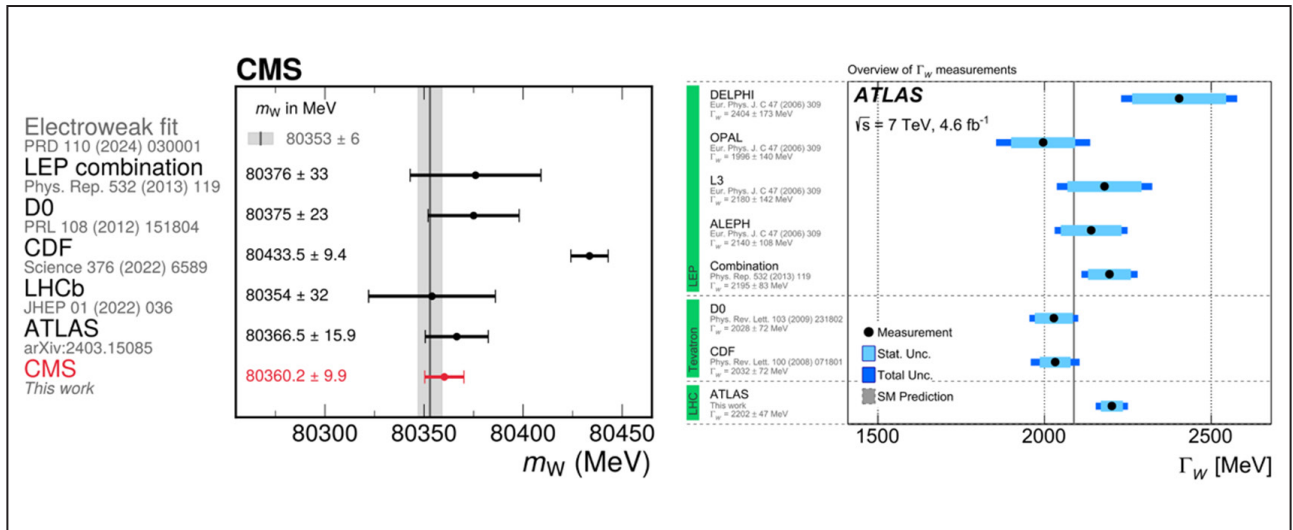
Электрослабая теория также предсказывает полную ширину распада W -бозона. Ожидается, что она будет равна сумме парциальных ширин трех поколений дублетов лептонов и двух поколений дублетов кварков, что дает ожидаемое значение $\Gamma_W = 2\,088 \pm 1$ МэВ. Гипотетические новые частицы, которые бы связывались с W -бозоном и массы которых были бы легче массы W , от-

крыли бы новый канал распада и изменили ширину его распада. Примерами являются суперсимметричные модели, в которых W -бозон распадается на легчайший суперпартнер заряженных калибровочных бозонов и легчайший суперпартнер нейтральных калибровочных бозонов. Текущее мировое среднее определение ширины распада W -бозона дает значение $\Gamma_W = 2\,085 \pm 42$ МэВ и основано на измерениях на LEP и Tevatron. Ранее измерение ширины распада W -бозона на Большом адронном коллайдере (БАК) не проводилось.

В новых работах коллабораций ATLAS и CMS, направленных к публикации, получены наиболее точные измерения массы и ширины W -бозона. Масса W -бозона измерена коллаборацией CMS на основе данных, набранных во втором сеансе работы БАК (Run-2) в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ. В данном наборе данных наблюдались распады W -бозона на мюон и мюонное нейтрино. Сравнение полученного значения массы $m_W = 80\,360,2 \pm 9,9$ МэВ с предыдущими измерениями и предсказаниями СМ на основе глобальной электрослабой аппроксимации представлено на рисунке слева.

Как видно из рисунка, предыдущее точное измерение массы W -бозона, выполненное коллаборацией CDF на коллайдере Tevatron в 2022 г., бросило вызов СМ, продемонстрировав статистически значимое отклонение от предсказаний глобальной электрослабой аппроксимации и других измерений. Настоящие измерения массы W -бозона подтверждают предсказания СМ.

Ширина W -бозона измерена коллаборацией ATLAS на основе набора данных по протон-про-



Результаты измерения массы W -бозона, выполненного коллаборацией CMS (слева); результаты измерения ширины W -бозона, выполненного коллаборацией ATLAS (справа)

тонным столкновениям при энергии 7 ТэВ, полученного в первом сеансе работы БАК (Run-1). Сравнение полученного значения ширины распада W -бозона $\Gamma_W = 2\,202 \pm 47$ МэВ с предыдущи-

ми измерениями и с предсказаниями СМ на основе глобальной электрослабой аппроксимации приведено на рисунке справа.

1. CMS Collab., ..., Gavrilov G., Golovtsov V., Ivanov Yu. et al. // arXiv: 2412.13872.

2. ATLAS Collab., ..., Barsov S., Ezhilov A., Fedin O. et al. // Eur. Phys. J. C. 2024. V. 84. Art. No. 1309.

Исследование интерференционных эффектов в когерентном фоторождении ρ -мезонов в эксперименте ALICE

Я. А. Бердников, Н. А. Бурмасов, М. Б. Жалов, Д. А. Иванищев, В. В. Иванов, Е. Л. Крышень, М. В. Малаев, В. Н. Никулин, А. Ю. Рябов, В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, А. В. Ханзадеев

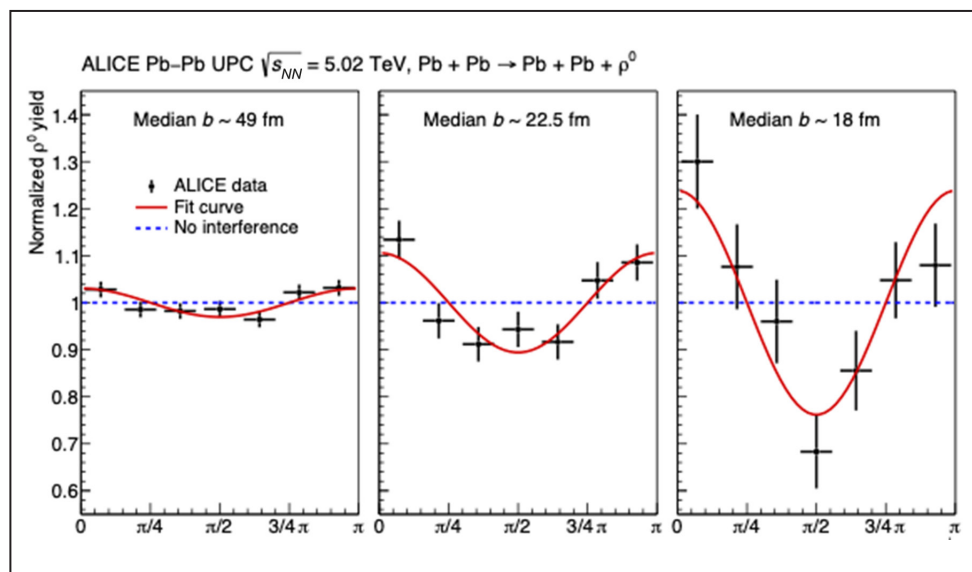
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Эксперимент ALICE провел исследование угловых распределений π -мезонов из распада ρ -мезонов, рожденных в ультрапериферических столкновениях ядер свинца, с целью проверки зависимости азимутальной анизотропии от среднего прицельного параметра между ядрами. Процесс фоторождения векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях можно рассматривать как аналог двухщелевого эксперимента, где расстоянию между щелями соответствует прицельный параметр между налетающими ядрами. Это позволяет исследовать квантово-механические интерференционные эффекты на фемтометровом масштабе.

В эксперименте была измерена анизотропия распределения угла между двумя векторами, образованными суммой и разностью поперечных импульсов π^+ - и π^- -мезонов, которая возникает в результате интерференции амплитуд фоторождения ρ -мезона на каждом из ядер. Все сигнальные

события были разделены на три класса по наличию нейтронов, регистрируемых калориметрами нулевого угла, которые могут появляться в процессе фоторождения в результате диссоциации одного или обоих ядер: $0n0n$ – когда нейтроны не зарегистрированы, $0nXn$ – когда нейтроны зарегистрированы с одной из сторон, $XnXn$ – когда нейтроны зарегистрированы с обеих сторон. Классы $0n0n$, $0nXn$ и $XnXn$ соответствуют средним прицельным параметрам 49, 23 и 18 фм. Было обнаружено, что при переходе от событий класса $0n0n$ к событиям класса $XnXn$ угловая анизотропия увеличивается больше чем на порядок (рис.).

В результате проведенного исследования впервые показано, что азимутальная анизотропия в фоторождении векторных мезонов увеличивается с уменьшением среднего прицельного параметра между ядрами, что согласуется с предсказаниями теоретических моделей.



Модуляция выхода ρ^0 -мезонов для различных средних значений прицельного параметра

Оболочечный эффект в зарядовых радиусах и магнитных моментах изотопов таллия вблизи магического числа $N = 126$

А. Е. Барзах¹, Г. О. Пенязьков², С. Д. Просняк², Л. В. Скрипников²

¹ Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

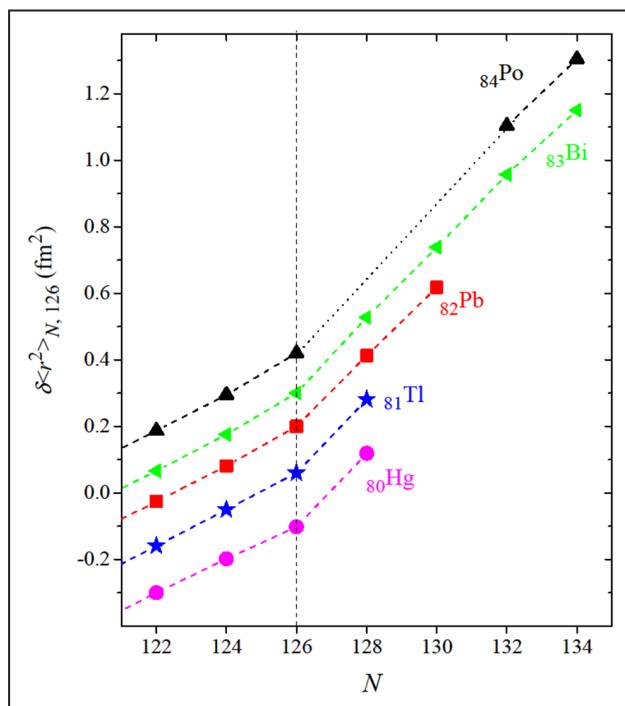
² Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
Колаборация IDS-RILIS

В последнее время резко возросло число работ, посвященных анализу оболочечных эффектов в магнитных моментах и зарядовых радиусах ядер – нерегулярностей в соответствующих изотопических зависимостях при переходе через магическое число нейтронов. Различные теоретические подходы предлагают противоречащие друг другу механизмы, определяющие возникновение данных эффектов, в связи с чем особую важность приобретает накопление релевантной экспериментальной информации и ее сравнение с теоретическими расчетами.

Измерены магнитные моменты и изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов для изотопов $^{207-209}\text{Tl}$, а также для изомера ^{207}Tl ($I^\pi = 11/2^-$). Измерение магнитного момента μ этого изомера позволило оценить перенормировку орбитального протонного g -фактора, связанную с влиянием мезонных токов. Изотопическая зависимость μ для основных состояний Tl ($I^\pi = 1/2^+$) удовлетворительно описывается в рамках теории функционала плотности энергии Фаянса (EDF–Fayans), построенного на основе теории конечных ферми-систем. Та же теоретическая модель хорошо описывает параболическую зависимость μ от N для состояний $I^\pi = 11/2^-$ в ядрах Eu, Au, Tl при изменении N от 82 до 126. Выявлены недостатки модели и указаны возможные пути их устранения.

В радиусах изотопов Tl при $N = 126$ наблюдается излом, аналогичный обнаруженному ранее для изотопических цепочек Pb, Hg, Bi (рис.). Показана независимость данного эффекта от состояния валентного протона ($\pi s_{1/2}$ для Tl и $\pi h_{9/2}$

для Bi). Расчеты с функционалом Фаянса описывают оболочечный эффект заметно лучше, чем расчеты в рамках релятивистской теории среднего поля (RMF), где возникает отчетливая Z -зависимость, отсутствующая в эксперименте. При этом в RMF условием описания излома является противоречащая эксперименту инверсия нейтронных состояний $vg_{9/2}$ и $vi_{11/2'}$, в то время как в EDF–Fayans-подходе расположение одночастичных уровней соответствует эксперименту и указанная инверсия отсутствует.



Изотопические изменения средних квадратов зарядовых радиусов ($\delta\langle r^2 \rangle$) ядер вблизи заполненной нейтронной оболочки $N = 126$

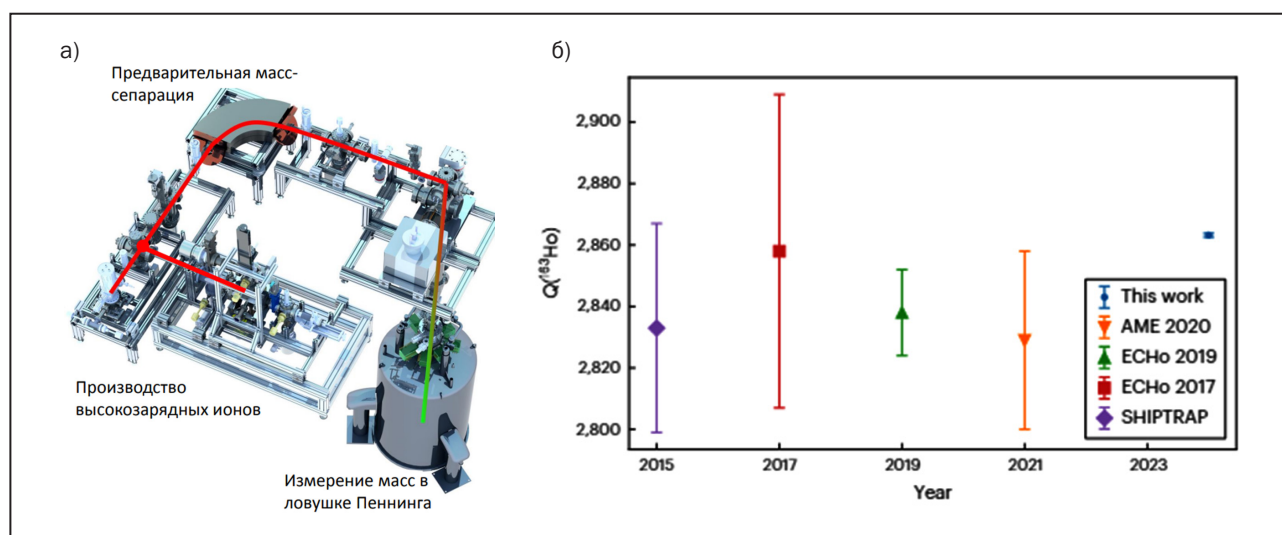
Высокопрецизионное измерение энергии распада ^{163}Ho для определения массы нейтрино

С. А. Елисеев, Ю. Н. Новиков

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
Колаборация PENTATRAP

Верхний предел на абсолютное значение эффективной массы нейтрино известен в настоящее время на уровне 150 эВ, тогда как для антинейтрино он составляет 0,6 эВ. Одна из основных причин такого несоответствия – неточное знание величины энергии распада нуклида ^{163}Ho – наилучшего кандидата для измерения массы нейтрино в процессе захвата орбитального электрона ядром. Эта энергия распада, наряду с абсолютной массой самого нейтрино, входит как параметр в болометрический спектр разрядки атома после захвата электрона ядром. Поэтому массу нейтрино, испускаемого в результате захвата, можно определить из сопоставления граничной энергии спектра и измеренной независимо полной энергии распада нуклида.

Эта энергия была измерена на установке PENTATRAP в Институте ядерной физики Общества Макса Планка в Гейдельберге (Германия). Установка (рис. а) состоит из генератора высокозарядных ионов нуклидов ($q = 38\text{--}40$), трассы ионного пучка и пяти ловушек Пеннинга, в тандемном режиме измеряющих массы ионов. Значение разности масс, т. е. энергии распада Q , определялось по измеренному отношению циклотронных частот ионов Ho и Dy с привлечением информации об энергиях связи электронов. Полученное значение $Q = 2\,863,2 \pm 0,6 \text{ эВ} \cdot \text{с}^{-2}$ на два порядка величины превосходит точность известного значения (рис. б). Этот результат позволяет определить массу электронного нейтрино на уровне электрон-вольта и ниже.



Общий вид системы PENTATRAP (а); результат измерения энергии распада Q нуклида ^{163}Ho в сравнении с литературными данными (б)

Поиск аксиоэлектрического эффекта в атомах Kr для солнечных аксионов

А. В. Дербин¹, И. С. Драчнев¹, В. Н. Муратова¹, Д. А. Семенов¹, М. В. Трушин¹,
Е. В. Унжаков¹, Ю. М. Гаврилюк², А. Н. Гангапшев², В. В. Казалов², В. В. Кузьминов²,
Д. А. Текуева², С. П. Якименко²

¹ Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

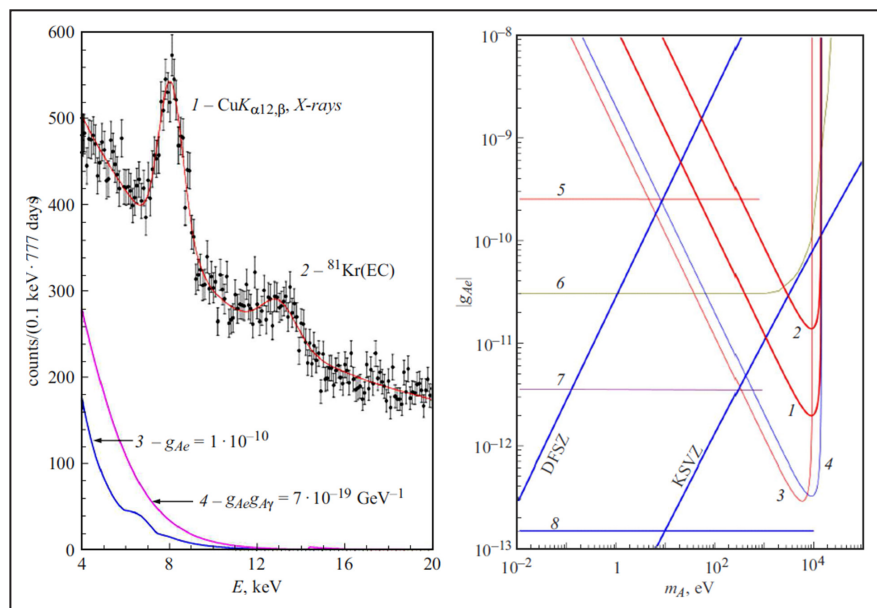
² Институт ядерных исследований РАН

Ожидаемый энергетический спектр солнечных аксионов содержит непрерывную часть и монохроматические линии. Монохроматические аксионы испускаются в ядерных реакциях pp -цепочки и CNO-цикла, в магнитных переходах в некоторых ядрах, низколежащие уровни которых возбуждаются за счет высокой (1,3 кэВ) температуры в центре Солнца. При разрядке ядерного уровня вместо γ -кванта или конверсионного электрона может испускаться аксион. Наиболее интенсивный поток монохроматических аксионов ожидается от изотопа ^{57}Fe (14,4 кэВ) из-за относительно высокого содержания атомов Fe в Солнце.

Целью работ являлся поиск аксиоэлектрического эффекта для аксионов, имеющих непрерывный спектр, и аксионов с энергией 14,4 кэВ, излучаемых в $M1$ -переходе в ядрах ^{57}Fe на Солн-

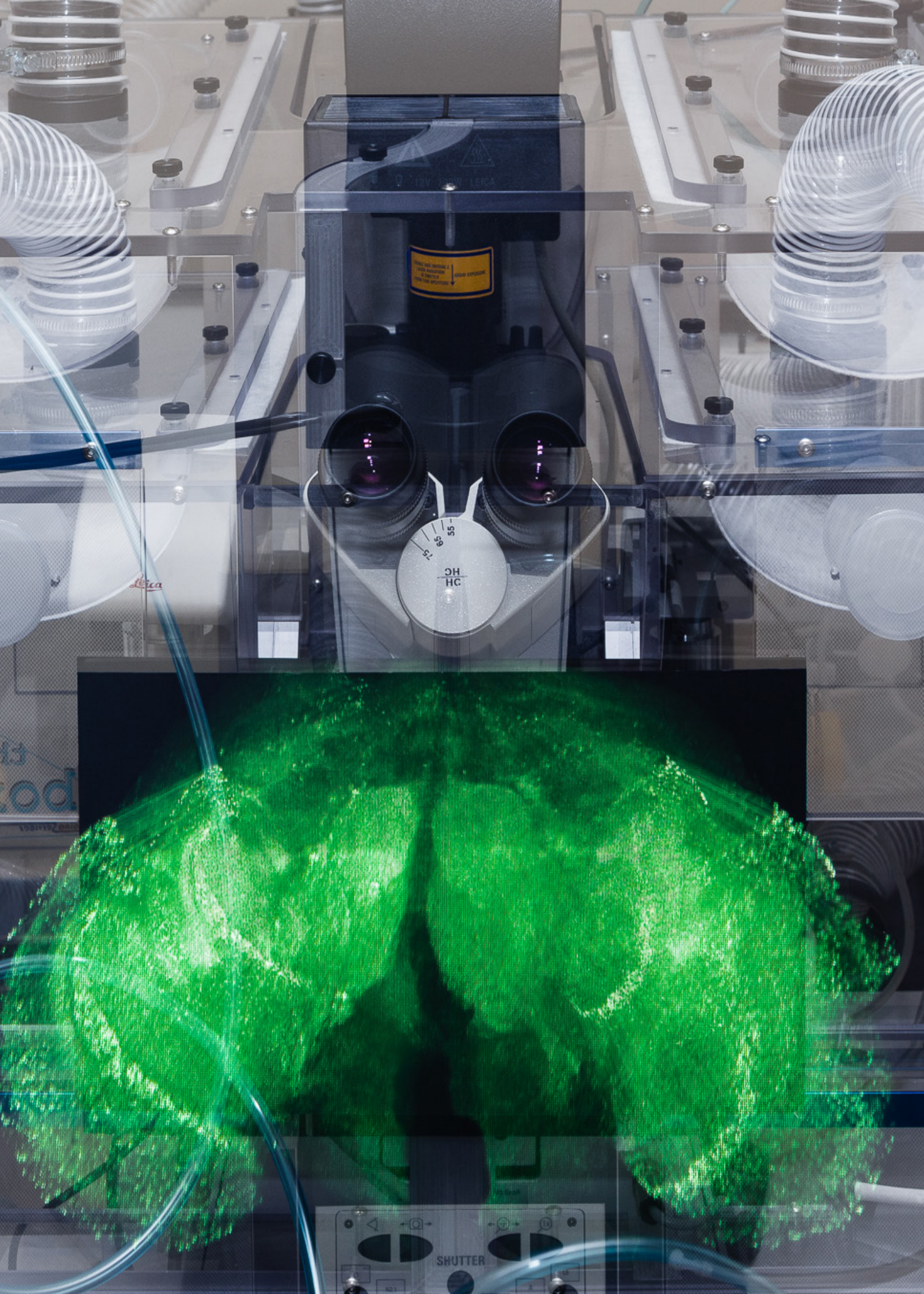
це соответственно. Для регистрации частиц, возникающих при разрядке ядерного уровня, использовался газовый пропорциональный счетчик, расположенный в низкофоновой установке в Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН. Спектр, измеренный счетчиком за 777 сут, показан на рис. слева, вместе с ожидаемыми вкладами от аксионов, которые не наблюдались. В результате получены новые ограничения на константы связи аксиона с электроном и нуклонами $|g_{\text{Ae}} g_{\text{AN}}^{\text{eff}}| \leq 3,2 \cdot 10^{-16}$ (90 % у. д.) (рис. справа), которые соответствуют новым ограничениям на массу аксиона $m_A \leq 3,3$ кэВ и $m_A \leq 22$ эВ в моделях KSVZ- и DFSZ-аксиона соответственно.

Работа поддержана грантом РНФ № 24-12-00046.



Слева – спектр пропорционального счетчика и результаты подгонки теоретической формой.

Справа – верхние ограничения на $|g_{\text{Ae}}|$, полученные в работе для моделей DFSZ (1) и KSVZ (2), в сравнении с результатами других экспериментов: резонансное поглощение аксионов ядром ^{83}Kr (3); Edelweiss (4); Si(Li)-детектор (5); данные по солнечным нейтрино (6); эксперимент LUX (7); астрофизические ограничения (8)



Биологические исследования

- 74 Аутосомно-доминантная болезнь Паркинсона, обусловленная мутацией E46K в гене SNCA в семье с русским происхождением
- 75 Влияние экстраклеточных везикул жировой ткани пациентов с ожирением и сахарным диабетом 2-го типа на экспрессию генов обратного транспорта холестерина в макрофагах
- 76 Молекулярный механизм действия представителей нового класса антимикробных пептидов – румицидинов
- 77 Архейная высокотермостабильная β -галактозидаза Da β Gal семейства GH35 с уникальной семидоменной укладкой
- 78 Инструменты для анализа внутри- и межмолекулярных водородных связей в траекториях молекулярной динамики
- 79 Антибактериальная активность дрожжей из уникальных биоценозов
- 80 Экспрессия *OCT4* в злокачественных глиомах зависит от клеточного метаболизма
- 81 Везикулы грейпфрута, нагруженные рекомбинантным белком HSP70, активируют противоопухолевый иммунитет на моделях карциномы толстой кишки *in vitro* и *in vivo*
- 82 Головоломка разнообразия протеоформ: где ключ?
- 83 Вариабельность протеоформ β -цепи гаптоглобина

Аутосомно-доминантная болезнь Паркинсона, обусловленная мутацией E46K в гене SNCA в семье с русским происхождением

А. К. Емельянов^{1,2}, К. А. Сенкевич³, И. В. Милыхина⁴, А. С. Журавлев², М. А. Шумилова⁵, М. В. Белецкая², Т. Ю. Скворцова⁴, С. Н. Пчелина^{1,2}, Е. Yu³, J. Ahmad³, F. Asayesh³, Z. Gan-Or³,

¹ Отделение молекулярной и радиационной биофизики «НИЦ Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова

³ The Neuro (Montreal Neurological Institute-Hospital), McGill University, Canada

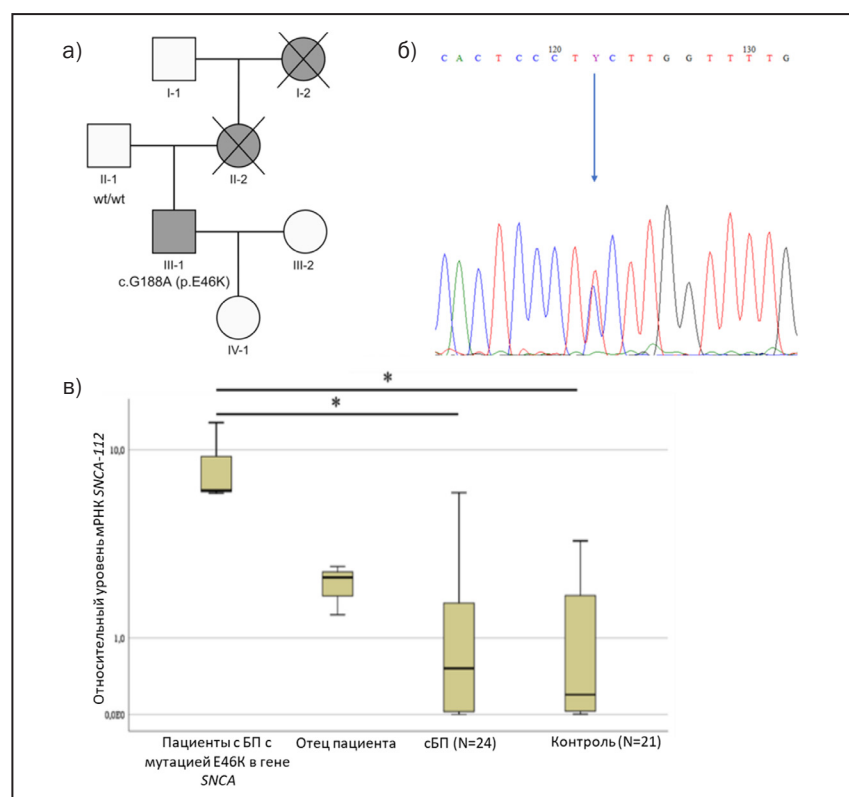
⁴ Институт мозга человека им. Н. П. Бехтеревой РАН

⁵ Университет информационных технологий, механики и оптики

На настоящий момент в гене SNCA описано восемь мутаций (A30G, A30P, E46K, H50Q, G51D, A53E, A53V и A53T), приводящих к развитию аутосомно-доминантной формы болезни Паркинсона (БП) с различным фенотипом. Ранее мутация E46K была обнаружена у пациентов с БП из двух различных семей, имеющих испанское происхождение.

В данной работе с использованием метода массового параллельного секвенирования нами

была найдена и описана третья в мире семья российского происхождения с аутосомно-доминантной формой БП с ранним началом, обусловленной мутацией E46K в гене SNCA (рис. а, б). С применением метода ПЦР в режиме реального времени и вестерн-блоттинга обнаружено, что мутация E46K в гене SNCA способствует увеличению уровня мРНК сплайсинг-изоформы SNCA-112, но не влияет на уровень α -синуклеина в клетках периферической крови (рис. в).



Семья с мутацией E46K (с. 188 G > A) в гене SNCA: а – родословная пациента с мутацией E46K в гене SNCA; б – подтверждение мутации E46K гена SNCA методом прямого секвенирования по Сэнгеру; в – относительный уровень сплайсинг-изоформы SNCA-112 в лимфоцитах периферической крови пациента с болезнью Паркинсона, обусловленной мутацией E46K в гене SNCA, его отца, пациентов со спорадической болезнью Паркинсона и лиц контрольной группы

Влияние экстраклеточных везикул жировой ткани пациентов с ожирением и сахарным диабетом 2-го типа на экспрессию генов обратного транспорта холестерина в макрофагах

К. В. Драчева¹, И. А. Побожева¹, К. А. Анисимова², А. А. Пантелеева¹, Л. А. Гараева¹,
С. Г. Баландов², З. М. Хамид², Д. И. Василевский², С. Н. Пчелина¹, В. В. Мирошникова¹

¹ Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет
им. акад. И. П. Павлова

В настоящее время экстраклеточные везикулы (ЭВ) жировой ткани (ЖТ) рассматриваются как важное звено патогенеза сопутствующих ожирению патологий – сахарного диабета 2-го типа (СД2), а также атеросклероза, который характеризуется отложением липидов во внутренней оболочке артерий. ЭВ ЖТ могут оказывать свои эффекты как локально в ЖТ, так и дистанционно, попадая в кровоток и будучи захваченными там клетками-реципиентами, преимущественно моноцитами/макрофагами. Исследования на модельных животных (мышах) уже продемонстрировали, что ЭВ висцеральной ЖТ (ВЖТ) могут способствовать накоплению холестерина в макрофагах и их трансформации в пенистые клетки, т. е. формированию атеросклеротической бляшки. Таким образом, ЭВ ЖТ могут играть роль в развитии атеросклероза при ожирении у человека.

Целью данной работы было изучение влияния ЭВ подкожной и висцеральной ЖТ (ПЖТ, ВЖТ) пациентов с ожирением и СД2 на экспрессию генов обратного транспорта холестерина в первичной культуре макрофагов человека.

В исследовании использовались пулированные образцы ЭВ, полученные при культивировании эксплантов ПЖТ и ВЖТ пациентов: 1) с ожирением и СД2 ($n = 26$, средний возраст 44 ± 11 лет, ИМТ $49,6 \pm 6,9$); 2) с ожирением без СД2 ($n = 27$, средний возраст 42 ± 11 лет, ИМТ $42,9 \pm 6,4$); 3) без ожирения ($n = 15$, средний возраст 47 ± 13 лет, ИМТ $25,2 \pm 3,2$). К макрофагам, полученным при дифференцировке моноцитов периферической крови здоровых до-

норов, добавляли ЭВ ЖТ на 24 ч. Уровень мРНК генов-транспортеров холестерина (*ABCA1*, *ABCG1*) и регулирующих их экспрессию транскрипционных факторов (*LXRβ* (*NR1H2*), *LXRα* (*NR1H3*) и *PPARG*) в макрофагах оценивали методом ПЦР в реальном времени, уровень белка – методом вестерн-блот.

В результате было показано, что ЭВ ПЖТ и ВЖТ, полученные от пациентов с ожирением и СД2, демонстрируют более выраженный эффект на экспрессию генов обратного транспорта холестерина в макрофагах, заключающийся в повышении экспрессии гена *ABCG1* и одновременном снижении экспрессии генов *LXRα* и *PPARG*. Уровень мРНК гена *ABCA1* увеличивался при добавлении любых ЭВ ВЖТ, а также ЭВ ПЖТ пациентов с ожирением и СД2 и лиц контрольной группы. Уровень мРНК гена *LXRα* в макрофагах снижался при воздействии ЭВ ПЖТ и ВЖТ пациентов с СД2, а уровень мРНК гена *LXRβ*, напротив, повышался в два раза при воздействии ЭВ ПЖТ и ВЖТ пациентов с СД2, что может частично объяснить повышение уровня мРНК генов *ABCA1* и *ABCG1*. Дополнительно нами было продемонстрировано локальное снижение уровня мРНК гена *PPARG* в ПЖТ и ВЖТ пациентов с ожирением и СД2.

Таким образом, т. к. имеет место и аналогичное снижение в макрофагах при воздействии ЭВ ЖТ, наши результаты могут свидетельствовать о важной роли транскрипционного фактора *PPARγ* в развитии СД2 и атеросклероза на фоне ожирения.

Молекулярный механизм действия представителей нового класса антимикробных пептидов – румицидинов

Е. Б. Пичкур, Е. В. Полесскова, О. В. Шуленина, А. Г. Мясников, А. Л. Коневега

Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

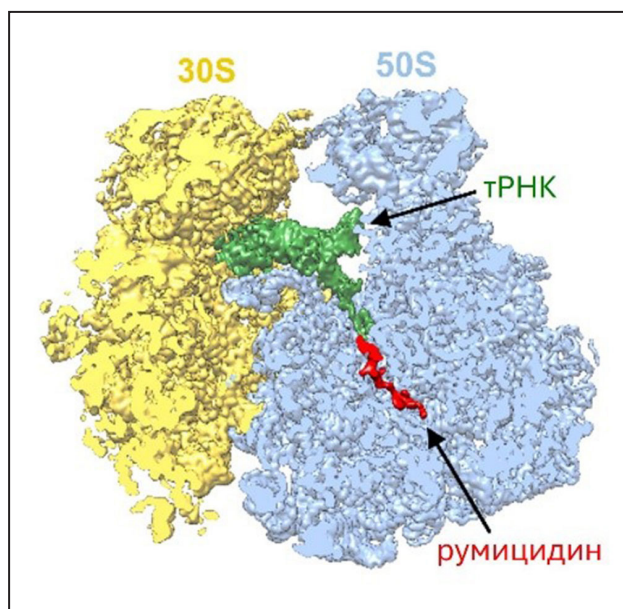
Распространение антибиотикорезистентности у бактерий является одной из наиболее актуальных проблем в медицине, ведь известные и давно используемые антибиотики со временем теряют свою эффективность. Антимикробные пептиды в настоящее время являются перспективной альтернативой традиционным антибиотикам, т. к. они обходят многие механизмы резистентности, не являются токсичными, легко синтезируются и обладают высокой скоростью действия.

В данной работе был обнаружен новый класс пролин-богатых антимикробных пептидов, названный румицидинами, и определен молекулярный механизм ингибирующего действия его представителей.

Изначально было определено, что основной мишенью румицидинов является именно бактериальная рибосома. Дальнейшее использование набора флуоресцентных и радиоактивных меток в составе рибосомного комплекса, а также визуализация при помощи метода криогенной электронной микроскопии позволили определить, как именно изучаемые антимикробные пептиды нарушают процесс синтеза белка прокариот (рис.).

Румицидины входят в выходной тоннель рибосомы в обратной ориентации относительно растущей полипептидной цепи и используют множественные водородные связи, стэкинг и взаимодействия Ван-дер-Ваальса, чтобы закупорить его. Более того, румицидины полностью блокируют прохождение пептидилтрансферазной реакции, указывая на то, что ключевой ингибирующий эффект – нарушение трансляции на этапе реакции

транспептидации, который дополнительно усиливается стерической невозможностью растущего пептида пройти в выходной тоннель рибосомы. Среднее разрешение рибосомных комплексов, содержащих румицидин, составило 1,95 Å. Отчетливая плотность пептида, наблюдаемая внутри выходного тоннеля рибосомы, позволила идентифицировать все аминокислотные остатки румицидина в средней части тоннеля и обнаружить уникальные взаимодействия в области сужения тоннеля.



Криоэлектронно-микроскопическая структура бактериального рибосомного комплекса (50S-субъединица – голубой; 30S-субъединица – желтый; инициаторная тРНК – зеленый) с румицидином (красный), связанным в выходном тоннеле рибосомы

Архейная высокотермостабильная β -галактозидаза Da β Gal семейства GH35 с уникальной семидоменной укладкой

Ю. В. Киль¹, Е. Б. Пичкур^{1, 2, 3}, В. Р. Сергеев^{1, 4}, Я. А. Забродская^{4, 5}, А. Г. Мясников¹,
А. Л. Коневега^{1, 2, 4}, Т. А. Штам^{1, 2}, В. Р. Самыгина^{2, 3}, Г. Н. Рычков^{1, 4}

¹ Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² НИЦ «Курчатовский институт»

³ ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

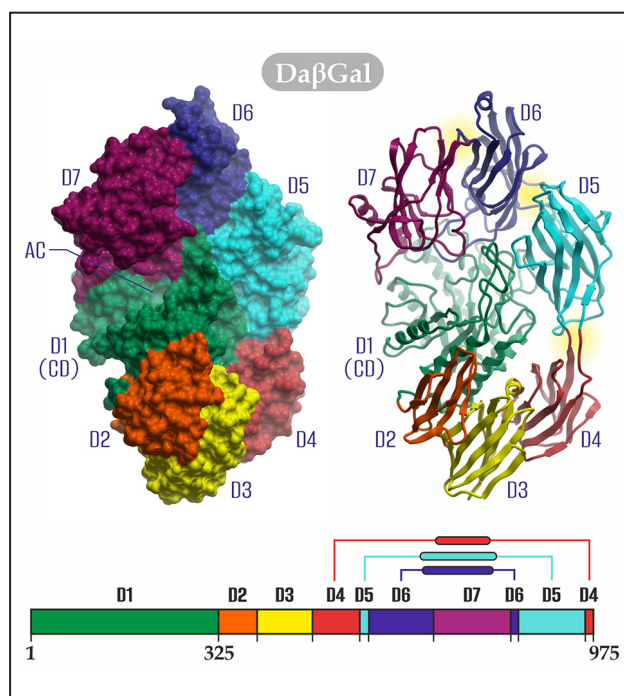
⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

⁵ Научно-исследовательский институт гриппа им. А. А. Смородинцева

Исследование термостабильных β -галактозидаз расширяет фундаментальные знания о механизмах высокотемпературного ферментативного гидролиза. Эти ферменты востребованы в производстве продуктов питания с пониженным содержанием лактозы, пребиотиков и других соединений, а их термостабильность позволяет оптимизировать высокотемпературные технологические процессы, снижая риск контаминации и повышая эффективность.

Нами впервые получена β -галактозидаза Da β Gal семейства GH35 из гипертермофильной археи *Desulfurococcus amylolyticus* и охарактеризованы ее структура и свойства. Пространственная структура определена методами криоэлектронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа (рис.). Установлено, что фермент является гомодимером и обладает уникальной семидоменной структурой. Da β Gal демонстрирует высокую термостабильность (период полураспада при 95 °C составляет 73 мин) и сохраняет активность в широком диапазоне pH (4,1–6,2). Фермент эффективно гидролизует лактозу и синтетические субстраты, проявляя максимальную активность при 98 °C. Уникальной особенностью Da β Gal является способность гидролизовать pNP- β -фукопиранозид с наибольшей эффективностью. Структурно-функциональный анализ Da β Gal, включая молекулярное моделирование, позволил установить ключевые аминокислотные остатки, определяющие субстратную специфичность.

Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание структурной организации термостабильных β -галактозидаз и открывают перспективы использования Da β Gal в высокотемпературных биотехнологических процессах, включая производство низколактозных продуктов питания и синтез галактоолигосахаридов.



Доменная организация мономера Da β Gal. В сравнении с грибными β -галактозидазами фермент содержит дополнительный домен D7, имеющий укладку типа β -сэндвич, а также три составных домена (D4, D5 и D6), сформированных отдаленными друг от друга участками полипептидной цепи

Инструменты для анализа внутри- и межмолекулярных водородных связей в траекториях молекулярной динамики

С. В. Горелов, А. И. Титов, О. А. Толичева, А. Л. Коневега, А. В. Швецов

Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Водородные связи играют важную роль для биомакромолекулярных систем, т. к. по сути являются тем самым фактором, который позволяет образовывать вторичные структуры белков, а также удерживает нити ДНК вместе, позволяя биомакромолекулярным системам функционировать. При этом для биомакромолекулярных систем важны как внутримолекулярные водородные связи, так и межмолекулярные. Водородные связи участвуют в сворачивании белка, формировании вторичной структуры и молекулярного распознавания, по сути являются одним из ключевых факторов, влияющих на пространственную структуру и динамику биомакромолекул. Взаимодействие между белками и их лигандами часто основано на водородных связях, которые обеспечивают специфичность и направленность, имеющую решающее значение для молекулярного распознавания. Тем самым развитие инструментов анализа внутри- и межмолекулярных водородных связей по траекториям молекулярной динамики является важным для улучшения понимания функционирования, а также структурной организации биомакромолекул.

В данной работе нами были предложены улучшенные алгоритмы анализа сетей внутри- и межмолекулярных водородных связей. В частности,

был представлен новый алгоритм поиска сетей водородных связей для биомакромолекулярных систем по траекториям молекулярной динамики (рис. 1). Данный алгоритм позволил обойти недостатки существующих алгоритмов, таких как медленная работа и чрезмерное потребление памяти, а также показал высокую скорость работы относительно известных ранее алгоритмов.

Также нами был усовершенствован ранее известный алгоритм DSSP, который нашел широкое применение для анализа вторичных структур в белках. Алгоритм DSSP является одним из стандартных инструментов анализа вторичных структур в белках. Усовершенствованная версия алгоритма DSSP, разработанная нами, устраняет недостатки существующей версии, в частности было снято ограничение на размер структуры, которую может анализировать алгоритм DSSP, добавлена возможность работы с траекториями молекулярной динамики, а также значительно (более чем в 10 раз) увеличена скорость работы алгоритма (рис. 2).

Разработанные инструменты анализа внутри- и межмолекулярных водородных связей успешно интегрированы в один из распространенных пакетов для анализа молекулярной динамики GROMACS и доступны начиная с версии 2024.

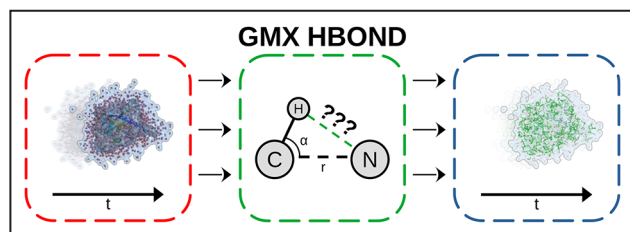


Рис. 1. Схема алгоритма поиска сетей водородных связей

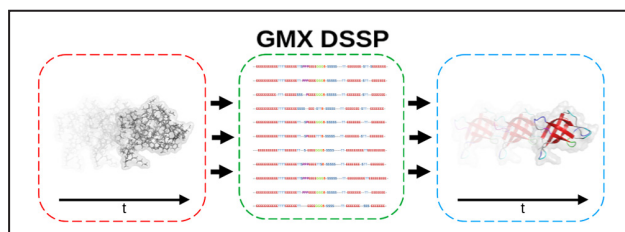


Рис. 2. Схема алгоритма DSSP

1. Gorelov S. et al. // J. Chem. Inf. Model. 2024. V. 64. Iss. 9. P. 3593–3598.
2. Gorelov S. et al. // J. Chem. Inf. Model. 2024. V. 64. Iss. 16. P. 6241–6246.

Антибактериальная активность дрожжей из уникальных биоценозов

О. В. Шуленина, Е. А. Суханова, Б. Ф. Яровой, Е. А. Толстыко, А. Л. Коневега, Е. В. Полесскова
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Одной из приоритетных задач современной биомедицины является пополнение банка веществ, обладающих терапевтическим потенциалом. Природное многообразие организмов и микроорганизмов является важным источником биологически активных соединений. В данной работе была изучена антибактериальная активность дрожжей из уникальной коллекции, содержащей более 3000 штаммов, обнаруженных на полуострове Камчатка, Курильских островах и острове Сахалин.

Для анализа антимикробных свойств дрожжей была использована бактериальная репортерная система с двойным флуоресцентным репортером, идентифицирующая вещества, вызывающие остановку рибосом или индуцирующие реакцию SOS-ответа из-за повреждения ДНК. Для проведения количественной оценки ингибиторных свойств исследуемых образцов, культуральных жидкостей дрожжей, была разработана методика анализа в жидкой среде. Данная методика была протестирована с помощью набора антибиотиков с известным механизмом действия.

Проведен анализ антибактериальной активности 810 штаммов дрожжей, из которых 251 от-

носился к коллекции, собранной на Сахалине, и 559 – на Камчатке. Показано, что сахалинские штаммы преимущественно стимулировали рост бактерий, а большая часть штаммов Камчатки проявляла ингибирующие свойства. Более половины штаммов с выраженными антибактериальными свойствами были найдены в ущелье рядом с Паужетской геотермальной электростанцией на татарнике и полыни. Анализ данных показал, что именно совокупность растений и места их произрастания приводили к появлению антибактериальных качеств у культуральных жидкостей дрожжей.

Для 19 штаммов, проявивших антибактериальную активность, была проведена таксономическая идентификация. Выявлено, что данная группа представлена преимущественно дрожжами рода *Cryptococcus* (*Naganishia*), это согласуется с предыдущими сообщениями о токсичности представителей данного рода, обитающих в различных географических зонах.

Полученные данные подтверждают ценность уникальной дальневосточной коллекции и демонстрируют необходимость сохранения и изучения биоразнообразия.

Экспрессия *OCT4* в злокачественных глиомах зависит от клеточного метаболизма

А. В. Волницкий, К. А. Шабалин, Р. А. Пантина, Е. Ю. Варфоломеева, Р. А. Ковалев, В. С. Бурдаков, С. С. Емельянова, Л. А. Гараева, А. П. Якимов, М. В. Согоян, М. В. Филатов, А. Л. Коневега, Т. А. Штам

Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

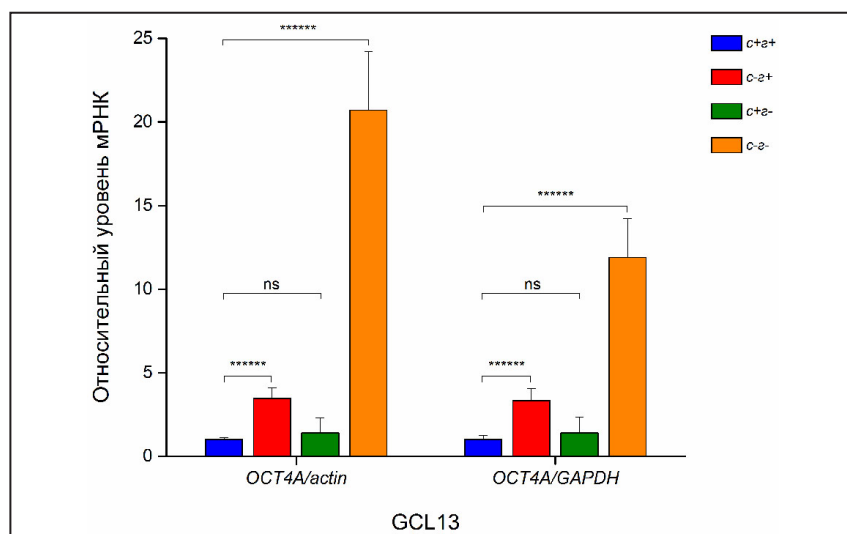
Транскрипционный фактор *OCT4* необходим для поддержания стволового статуса клеток на ранних стадиях эмбриогенеза и участвует в образовании индуцированных плюрипотентных стволовых клеток, однако его роль в онкогенезе еще не вполне ясна.

В данной работе экспрессия *OCT4* была исследована в злокачественных глиомах. Были использованы 20 клеточных линий глиом и образец нормальной ткани головного мозга взрослого пациента, прилегающей к опухолевой ткани одной из глиом. Экспрессия *OCT4* была найдена во всех исследованных линиях глиом, но отсутствовала в норме. В 19 из 20 линий мРНК *OCT4* была представлена как изоформой *OCT4A*, кодирующей транскрипционный фактор, так и изоформой *OCT4B*, неспособной связываться с ДНК. Белок *OCT4A* присутствовал в ядрах клеток глиом, но в основном был локализован в цитоплазме, что могло указывать на ограничение его ак-

тивности как транскрипционного фактора. В одной из линий нокдаун *OCT4* приводил к гибели опухолевых клеток.

По данным ядерного магнитного резонанса, в клетках, инкубированных в среде без сыворотки, замедляется поглощение глюкозы и снижается уровень интермедиатов, входящих в гликолиз и цикл Кребса. Цикл Кребса и L-глутамин являются источниками α -KG, который поддерживает активность некоторых ферментов, регулирующих экспрессию генов и участвующих в перепрограммировании клеток. Мы обнаружили, что экспрессия *OCT4* увеличивалась при инкубации клеток в среде без сыворотки и этот эффект значительно усиливался в среде без сыворотки и L-глутамина (рис.).

Таким образом, экспрессия *OCT4* в глиомах может регулироваться α -KG-зависимым метаболическим перепрограммированием клеток.



Экспрессия *OCT4* в клетках GCL13, инкубированных в среде с сывороткой и L-глутамином (c+g+), без сыворотки (c-g+), без L-глутамина (c+g-) или обоих компонентов одновременно (c-g-) в течение 48 ч. Уровни мРНК *OCT4A* нормированы на уровни мРНК *actin* β или *GAPDH*

Везикулы грейпфрута, нагруженные рекомбинантным белком HSP70, активируют противоопухолевый иммунитет на моделях карциномы толстой кишки *in vitro* и *in vivo*

Л. А. Гараева¹, Е. Ю. Комарова², С. С. Емельянова¹, Е. Д. Путевич¹, А. Л. Коневега¹,
Б. А. Маргулис², И. В. Гужова², Т. А. Штам¹

¹ Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Институт цитологии РАН

Метод иммунотерапии рака, основанный на возвращении иммунным клеткам способности распознавать опухолевые клетки, считается относительно новым и перспективным методом борьбы с раковыми заболеваниями. Белок теплового шока 70 (HSP70) в многочисленных лабораторных исследованиях продемонстрировал высокий потенциал в качестве эффективного адъюванта противоопухолевого иммунного ответа, но ввиду его недостаточно эффективной иммуногенности не используется в клинической практике.

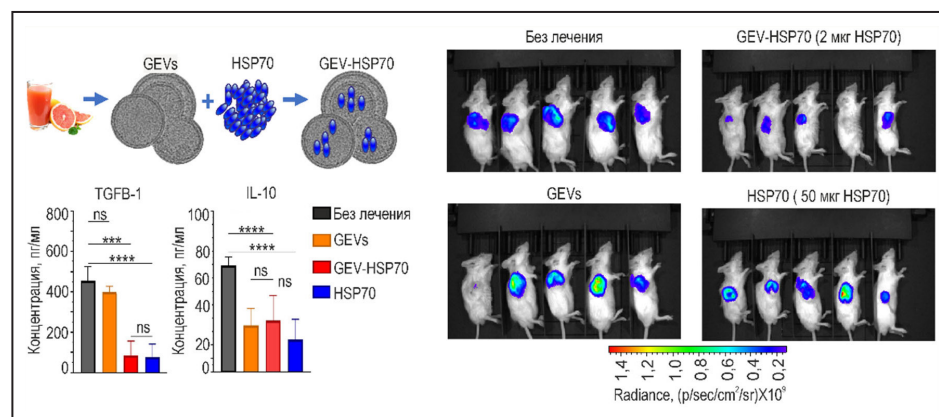
Для повышения биодоступности и стабильности рекомбинантного HSP70 нами было предложено инкапсулировать его в растительные везикулы – экзосомоподобные наночастицы, секретируемые растительными клетками. Ранее мы обнаружили, что доставка в опухолевые клетки белка HSP70 везикулами сока грейпфрута (GEVs) способствует его более эффективному накоплению в цитоплазме клеток с сохранением функциональной активности.

Для проверки гипотезы о возможности активировать противоопухолевый иммунный ответ при помощи белка HSP70, инкапсулированного в GEVs, экстрагированные из сока грейп-

фрута GEVs были нагружены рекомбинантным HSP70 (GEV-HSP70). GEV-HSP70, содержащие 2 мкг, нагруженного HSP70, были введены мышам Balb/c одновременно с опухолевыми клетками карциномы толстой кишки CT-26 (рис.).

Такая инъекция привела к увеличению продолжительности жизни на 50 % и уменьшению размера опухолевого узла в три раза. Эффект был подтвержден снижением уровня проопухолевых цитокинов TGF- β 1 и IL-10 в плазме крови экспериментальных животных. Важно, что наблюдаемые противоопухолевые эффекты эквивалентны при введении GEV-HSP70 и свободного HSP70 в количестве в 25 раз большем, чем в составе GEVs. При добавлении к клеткам CT-26 CD8+Т-лимфоцитов, полученных из селезенки животных, которым вводили GEV-HSP70 и HSP70, наблюдали снижение пролиферативной активности опухолевых клеток, что свидетельствует об опосредованности наблюдаемых противоопухолевых эффектов клетками адаптивного иммунного ответа.

Полученные результаты демонстрируют перспективность и эффективность новой методики для активации специфического ответа на опухоли толстой кишки на основе HSP70.



Оценка активации противоопухолевого иммунитета при помощи GEV-HSP70 на мышинной модели карциномы толстой кишки. На правой панели представлена прижизненная визуализация опухолевых узлов; на левой панели – изменение цитокинового профиля в плазме крови экспериментальных животных

Головоломка разнообразия протеоформ: где ключ?

С. Н. Нарыжный

Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Одной из загадок человеческого протеома является дисбаланс между теоретически рассчитанными и экспериментально измеренными количествами протеоформ. С учетом комбинации различных посттрансляционных модификаций (ПТМ) количество возможных протеоформ огромно (рис. 1). Оценка дает более миллиона различных протеоформ в каждом типе клеток. В результате каждый белок теоретически может иметь много протеоформ в соответствии с количеством возможных сайтов модификаций, но из-за различных систем персональной регуляции наборы ПТМ для данного белка в каждом организме немного отличаются.

Хотя возможности разнообразия человеческих протеоформ, возникающих из-за ПТМ, огромны, доступная информация указывает на то, что реализуется лишь малая его часть. Похоже, что существует строгий контроль над производством и поддержанием ПТМ. Этот контроль может быть специфичным для организма и немного

отличаться для разных людей. В целом же из-за этой индивидуальной вариабельности протеоформы, представленные в человеческой популяции, возможно, могут представлять все варианты протеоформ.

Однако необходимо не только провести инвентаризацию протеоформ, но и выяснить, как они функционируют, как протеоформы различаются по типам клеток и как они изменяются при заболеваниях. Более того, это необходимо для того, чтобы понять функции, лежащие в основе многих этиологических процессов. Именно здесь персонализированная медицина может помочь лучше понять многие вещи, которые влияют на здоровье пациента. Персонализированная медицина – это подход к лечению и профилактике заболеваний, который учитывает индивидуальные геномные, протеомные и метаболомные характеристики, а также образ жизни и влияние окружающей среды (рис. 2).

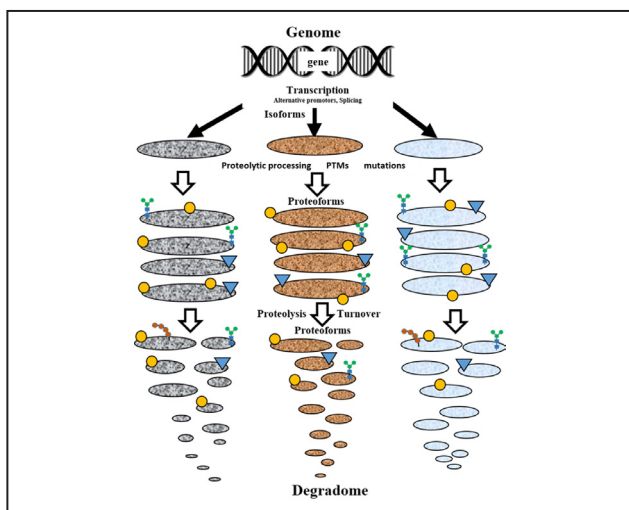


Рис. 1. Общая схема образования и оборота протеоформ



Рис. 2. Пример рабочего процесса персонализированной медицины

Вариабельность протеоформ β -цепи гаптоглобина

Н. Л. Ронжина¹, Е. С. Зорина², М. Г. Завьялова², О. К. Легина¹, С. Н. Нарыжный¹

¹ Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Научно-исследовательский институт биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича

С помощью двумерного электрофореза (2DE) в комбинации с масс-спектрометрическим и иммунным детектированием были проанализированы образцы плазмы как от здоровых доноров, так и от пациентов, у которых была диагностирована первичная глиобlastома IV степени, и получена детальная композитная 2DE-карта распределения протеоформ β -цепи, а также полноразмерной формы гаптоглобина (зонулина; рис.). Оказалось, что если общий уровень гаптоглобина в плазме онкобольных, особенно

глиобlastомных, повышен по сравнению с нормой, то присутствие отдельных протеоформ индивидуально. Была обнаружена вариабельность как у зонулина, так и у β -цепи Нр. А присутствие щелочной формы зонулина в плазме может считаться условным, но недостаточным биомаркером глиобlastомы.

Таким образом, мы обнаружили, что на уровне минорных протеоформ гаптоглобина даже в норме присутствует высокая индивидуальная вариабельность.

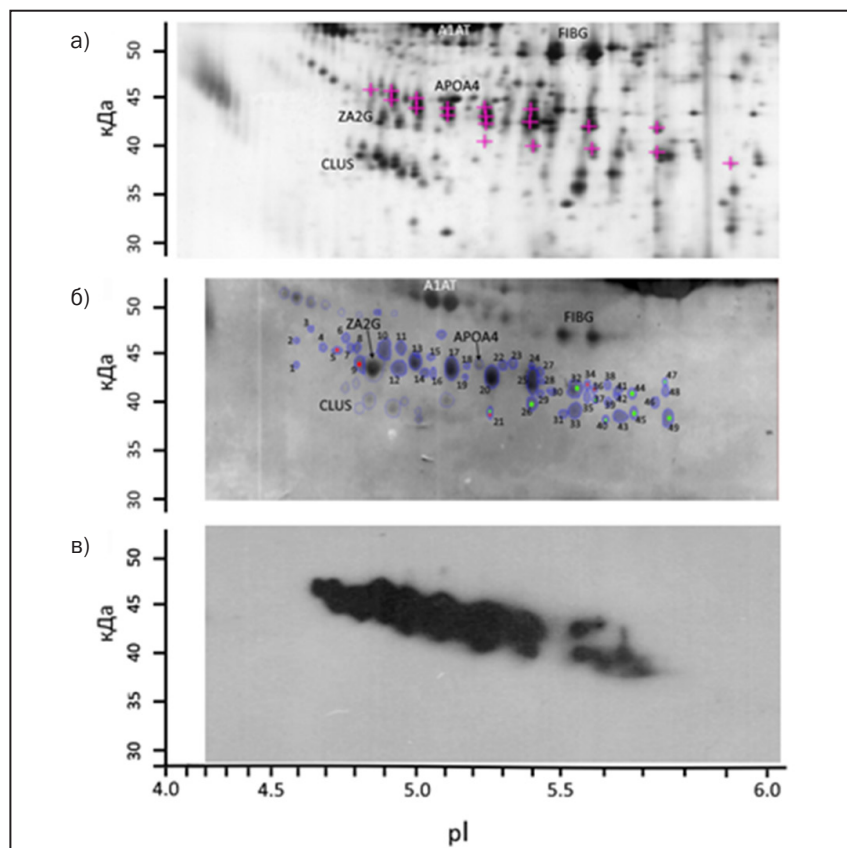
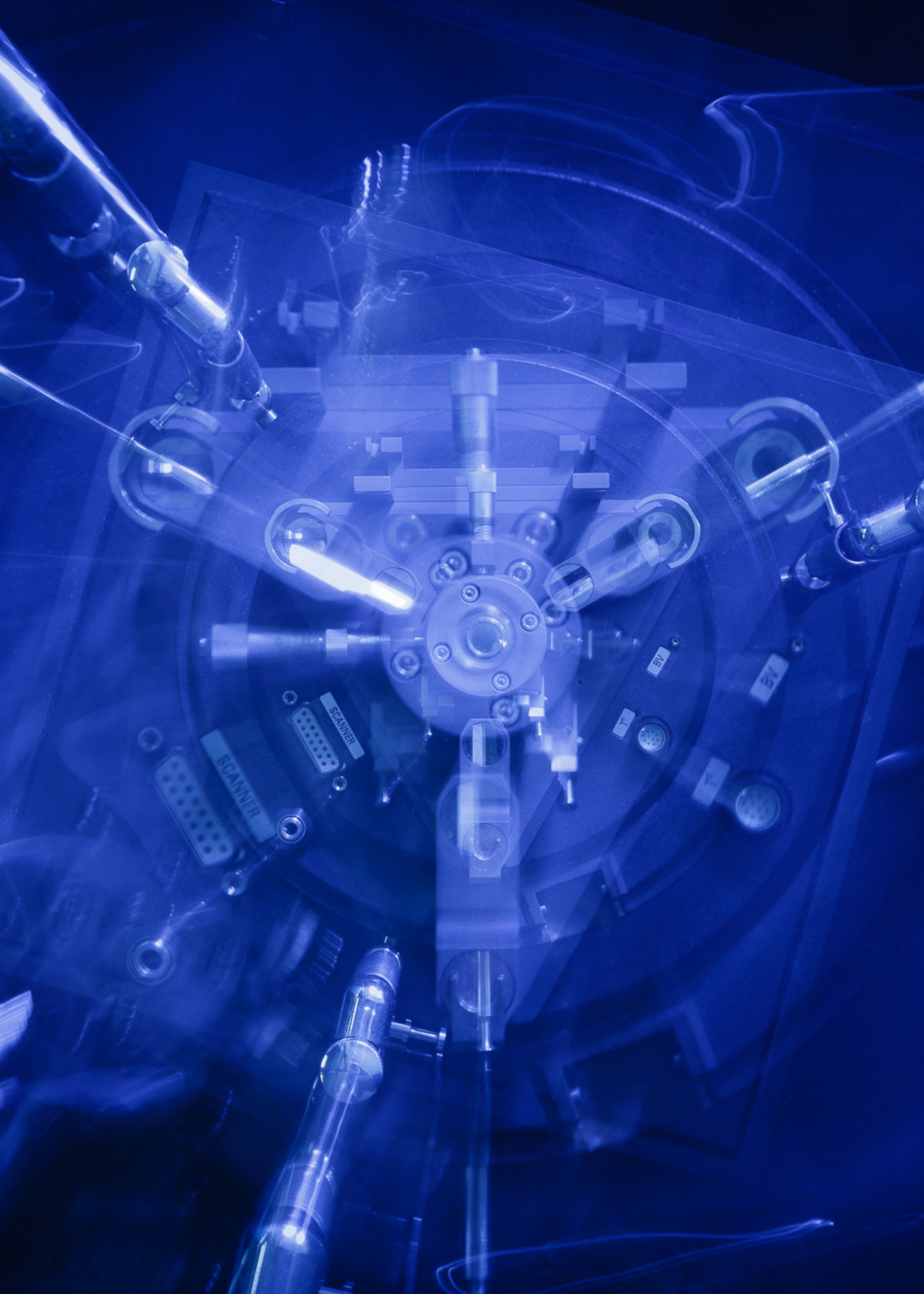


Схема расположения пятен β -цепи гаптоглобина на двумерной электрофоретической карте (2DE): а – увеличенная область нахождения пятен β -цепи на двумерной карте белков плазмы человека из базы данных SWISS-2DPAGE; б – композитная карта распределения протеоформ β -цепи гаптоглобина, построенная на основании 2DE-образцов с последующим иммунологическим и масс-спектрометрическим детектированием; в – иммунодетектирование β -цепи образца плазмы пациента с глиобlastомой



Ядерная медицина

- 86 Оценка ингибирования роста опухолей молочной железы и кишечника при блокировании VEGFR-1 моноклональными антителами
- 88 Новые линии клеток глиобластомы: анализ генетических изменений и оценка чувствительности к радиотерапии и иммунотерапии
- 90 Разработка таргетных радиофармацевтических лекарственных препаратов на основе изотопов тербия
- 92 Разработка новых селенсодержащих противоопухолевых препаратов для фотодинамической терапии
- 94 Гарантия качества в протонной лучевой терапии опухолей глаза и придаточного аппарата

Оценка ингибирования роста опухолей молочной железы и кишечника при блокировании VEGFR-1 моноклональными антителами

Т. А. Штам, А. В. Демьянов, Л. А. Гараева, С. С. Емельянова, А. В. Никитина, Е. Д. Путевич, А. С. Потысьева, М. С. Биджиева, А. В. Волницкий, В. В. Кванчиани, Л. А. Соломина, К. А. Шабалин, Е. В. Сергеева, Ж. Ю. Сидорова, А. В. Жахов, В. С. Бурдаков, Н. А. Верлов, А. Л. Коневега

Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

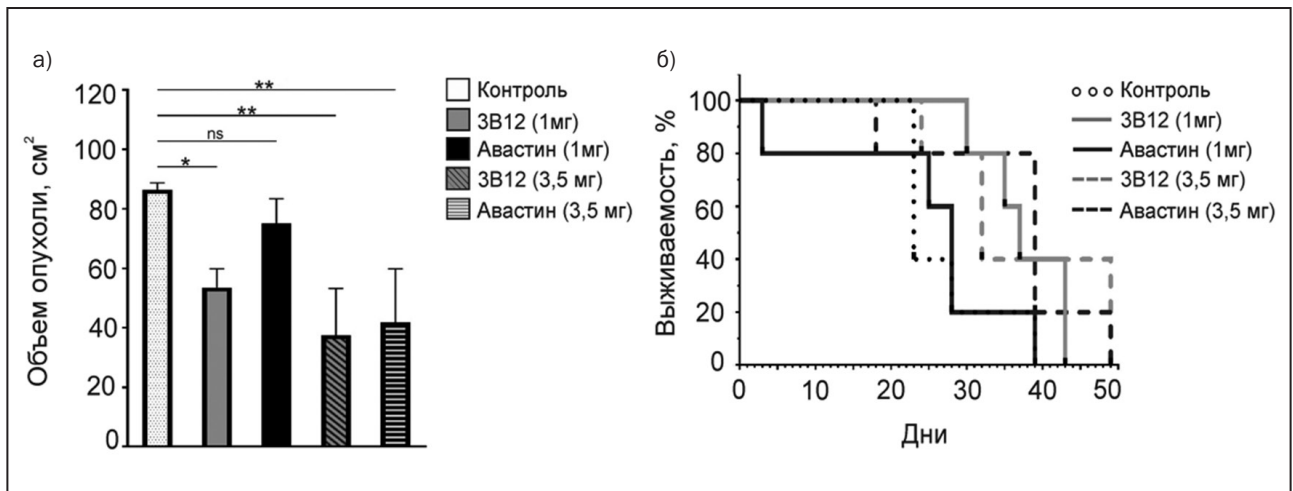
Рецептор-1 фактора роста эндотелия сосудов (VEGFR-1) играет критическую роль в опухолеассоциированном ангиогенезе. VEGFR-1 обнаруживается на поверхности опухолевых клеток и клеток опухолевого микроокружения. Блокирование данного рецептора приводит к подавлению пролиферации и усилению апоптоза опухолевых клеток, уменьшению васкуляризации опухоли, ингибированию выработки иммуносупрессивных цитокинов опухолеассоциированными макрофагами, подавлению инвазии и метастазирования опухоли. Для изучения терапевтического потенциала ингибирования VEGFR-1 при раках молочной железы (РМЖ) и кишечника (РК) с помощью антител мы разработали моноклональные антитела (мАт) против рекомбинантного белка VEGFR-1 человека.

Моноклональные антитела, связывающие человеческий VEGFR-1, получали от мыши, иммунизированной белком VEGFR-1 человека. Анализ связывания показал, что отобранные мАт к рецептору VEGFR-1 обладают сильной связывающей активностью с человеческим VEGFR-1.

Экспрессию VEGF-A и VEGFR-1 анализировали с помощью ОТ-ПЦР в реальном времени в клетках линий РМЖ (MCF-7, MDA-MB-23, EMT-6) и РК (Hutu-80, SW-480, LoVo, CT-26) человека и мыши. VEGF-A экспрессировался во всех клеточных линиях человека. Транскрипты VEGFR-1 были обнаружены во всех клеточных линиях, за исключением клеток линии LoVo. Все клеточные линии были положительными в отношении экспрессии на клеточной поверхности VEGFR-1, что было проверено с помощью проточной цитометрии.

Чтобы оценить рост клеток РМЖ или РК при блокировании VEGFR-1 моноклональными антителами, пролиферация всех клеточных линий была проанализирована с использованием инструмента xCELLigence DP, позволяющего детектировать клеточный индекс в режиме реального времени. Использование антител незначительно влияло на пролиферацию клеток линий MCF-7 и SW-480 и значительно подавляло рост линий MDA-MB-231, EMT-6, Hutu-80, LoVo и CT-26. Чтобы оценить *in vivo*, предотвращает ли блокада VEGFR-1 рост опухолей кишечника, клетки линии CT-26 трансплантировали мышам породы DBA/BALB и через три дня после прививки опухоли проводили внутривенное введение мАТ (клон 3B12) в количестве 1 мг/мышь и 3,5 мг/мышь, а также препарата «Авастин». Системное введение мАТ в дозе 1 мг/мышь и 3,5 мг/мышь каждые три дня приводило к статистически значимому подавлению роста опухолевых трансплантатов CT-26 (рис. а). При этом детектировали значимое увеличение продолжительности жизни животных, получавших введение мАТ в количестве 1 мг/мышь, по сравнению с контролем (рис. б). Таким образом, полученные в данном исследовании мАт к рецептору VEGFR-1 уменьшают темп роста опухолевого узла *in vivo* и продлевают выживаемость мышей с перевитыми клетками карциномы кишечника CT-26.

Главным результатом работы можно считать, что полученные в исследовании новые моноклональные антитела имеют сродство к рецептору VEGFR-1 и эффективно ингибируют рост опухолевых клеток РМЖ или РК *in vitro* и *in vivo*.



Объем опухоли (а) и продолжительность жизни животных (б) при внутривенном введении моноклональных антител

Новые линии клеток глиобластомы: анализ генетических изменений и оценка чувствительности к радиотерапии и иммунотерапии

С. С. Емельянова, А. В. Волницкий, А. М. Соляник, Н. Х. Чан, Л. А. Гараева, Р. А. Пантина, М. Н. Грунина, Е. Д. Путевич, А. С. Потысьева, А. М. Голубев, В. С. Бурдаков, Н. А. Верлов, С. Н. Нарыжный, А. Л. Коневега, Т. А. Штам

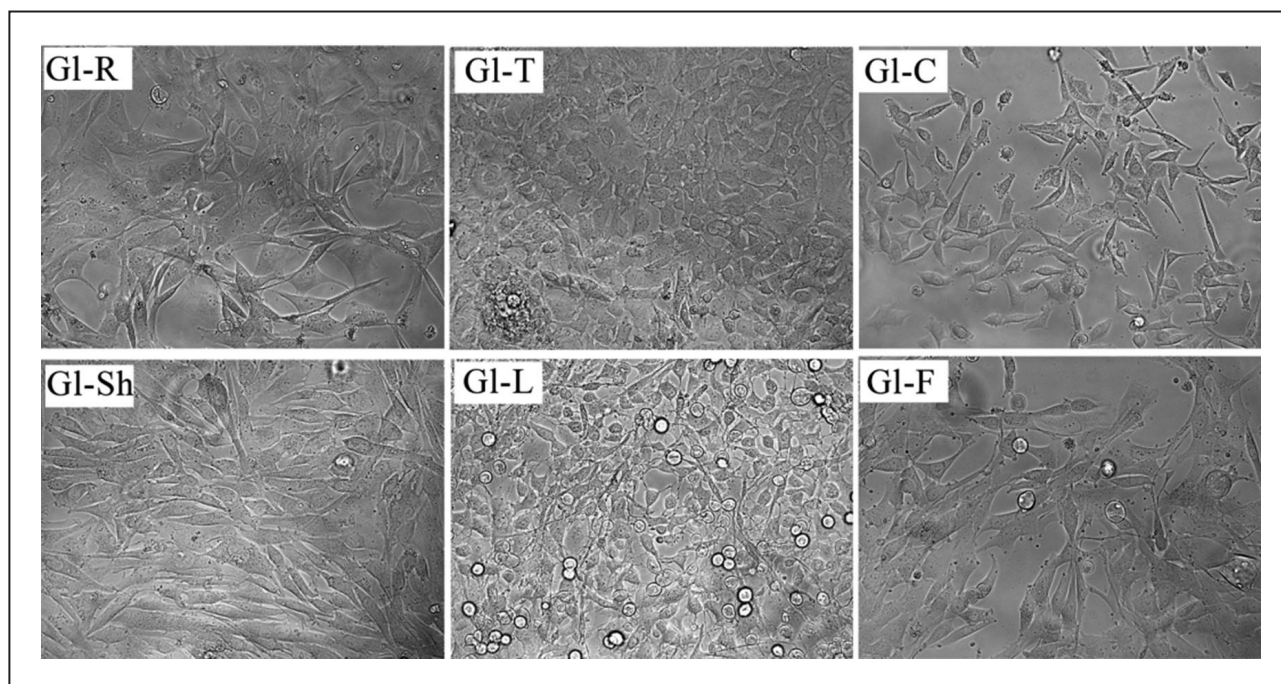
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Целью работы явилось описание новых клеточных культур глиобластом, полученных в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ из опухолевой ткани пациентов, для оценки перспективности их использования в качестве моделей для исследования причин возникновения радиорезистентности опухолей мозга, а также для разработки и тестирования схем противоопухолевой иммунотерапии, направленной на блокирование рецептора фактора роста эндотелия сосудов 1-го типа (VEGFR-1).

Глиобластомы – это наиболее частые и агрессивные первичные опухоли головного мозга IV степени, плохо поддающиеся лечению. Из-за диффузных границ их невозможно полностью удалить хирургическим путем, а гетероген-

ность глиобластом и устойчивость к разным видам противоопухолевой терапии делает необходимым постоянный поиск новых клеточных моделей для подбора и оценки эффективности различных схем лечения.

Шесть описанных нами клеточных культур оказались стабильно культивируемыми, отличающимися друг от друга размерами и формой клеток опухолевыми культурами, идентифицирующимися как взрослый тип диффузных глиом с немутировавшими генами *IDH1* и *IDH2* с плохим прогнозом терапии (рис.). Описанные глиобластомы имеют различные p53- и p73-статусы и, соответственно, потенциально разные ответы на радиотерапию и противоопухолевые препараты, направленные на активацию апоптоза. Две



Клеточные линии глиобластом

глиобластомы несут малоописанную в литературе патогенную мутацию p.Arg110Pro в гене онкосупрессора *TP53*. Также во всех культурах обнаружены различные полиморфизмы в значимых участках этого гена. Все шесть культур экспрессируют РНК онкосупрессорной и онкогенных изоформ белка-аналога p53 – p73 в различных соотношениях.

Описанные глиобластомы по-разному отвечают на радиотерапию рентгеновскими и γ -лучами, причем пять из них более устойчивы к γ -облучению, чем стандартная линия глиомы A172. Также они не имеют мутаций в горячих точках гена *KRAS*, экспрессируют РНК генов *VEGF-A*

и *VEGFR-1* в различных соотношениях. Тестирование иммунотерапевтической схемы с моноклональными антителами к *VEGFR-1* подтвердило, что исследуемые глиобластомы, в отличие от стандартной клеточной линии A172, чувствительны к блокировке антителами VEGF и его рецептора.

Все это делает описанные культуры перспективными моделями для определения молекулярных механизмов возникновения радиорезистентности, подбора схем радио- и иммунотерапии и поиска новых мишеней противоопухолевой терапии глиобластом.

Разработка таргетных радиофармацевтических лекарственных препаратов на основе изотопов тербия

Т. А. Штам¹, Н. А. Верлов¹, Л. А. Гараева¹, Е. В. Сергеева¹, Е. Д. Путевич¹, С. С. Емельянова¹, А. В. Никитина¹, А. С. Спицына¹, Л. А. Соломина¹, М. С. Биджиева¹, А. С. Потысьева¹, А. В. Волницкий¹, А. М. Соляник¹, А. В. Демьянов¹, Ж. Ю. Сидорова¹, Д. С. Виноградова¹, А. А. Грачев¹, О. А. Толичева¹, П. С. Касацкий¹, А. В. Жахов¹, В. С. Бурдаков¹, И. А. Кулаков¹, В. В. Кванчиани¹, А. Л. Коневега¹, О. А. Шашкова², К. О. Авров², С. В. Соловьева², Л. А. Терехина², А. А. Пиневиц², С. В. Шатик², В. В. Зайцев², М. А. Надпорожский², А. А. Станжевский², М. П. Самойлович², Р. А. Алиев³, Е. Б. Фуркина³

¹ Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. акад. А. М. Гранова

³ НИЦ «Курчатовский институт»

Радиоиммунотерапия – комбинированный метод лечения, который совмещает в себе возможности радиотерапии и иммунотерапии. Радиоиммунотерапия злокачественных опухолей имеет целый ряд преимуществ перед другими видами системного лечения, к которым относят селективную доставку цитотоксической дозы радиации к опухолевой клетке, длительное дозируемое воздействие излучения на опухоль и снижение минимального воздействия на нормальные окружающие ткани. Для разработки радиофармакологических лекарственных препаратов (РФЛП) был выбран радиоизотоп ¹⁶¹Tb и хелатирующий агент DOTA. В качестве нацеливающей части использовались моноклональные антитела (МАТ) к рецептору Stabilin-1, наноантитела к рецептору PD-L1 и лиганд PSMA-617. Stabilin-1 – многофункциональный лимфатический и сосудистый эндотелиальный рецептор, PD-L1 играет важную роль в подавлении противоопухолевого иммунного ответа, экспрессируется на поверхности многих типов опухолевых клеток и взаимодействует с рецептором PD-1 на Т-лимфоцитах. PSMA-617 – низкомолекулярный лиганд с высоким сродством к PSMA, простатспецифическому мембранному антигену, гиперэкспрессирующемуся в тканях опухолей предстательной железы и метастазах.

Проверка специфической фармакологической активности РФЛП ¹⁶¹Tb-DOTA-FVST15 была проведена на животных моделях с индуцированными опухолями кишечника или молочной железы. Показано, что моноклональные антитела

к рецептору Stabilin-1 человека (FVST15) обладают способностью к специфическому накоплению в опухолях ЕМТ-6 – карциномы молочной железы мыши и СТ-26 – карциномы кишечника мыши (рис. 1). РФЛП в дозе 10 МБк подавляет скорость роста опухоли ЕМТ-6, а в дозах 10 и 20 МБк – скорость роста опухоли СТ-26 на мышинной модели.

Для сравнительного исследования фармакокинетических параметров и биораспределения полноразмерных терапевтических антител и рекомбинантных однодоменных антител (наноантител, VHH), меченных ¹²⁵I и специфичных к рецептору PD-L1 человека, использовалась оригинальная мышинная модель опухолевого процесса, индуцированного трансплантацией клеток СТ26-PD-L1, экспрессирующих рецептор PD-L1 человека на своей поверхности. Время полувыведения для VHH оказалось почти в 10 раз короче, чем для полноразмерных антител. Основной путь выведения обоих препаратов из организма – через мочу. Отмечено аномально быстрое снижение концентрации VHH в крови мышей в первые 5 мин после введения препарата. Радиографические исследования показали сходный профиль распределения препаратов полноразмерных антител и наноантител, а также их способность накапливаться в тканях опухолевого узла СТ26-PD-L1. Исследование вносит значительный вклад в понимание фармакокинетики и биораспределения антител к PD-L1, что имеет важное значение для разработки новых

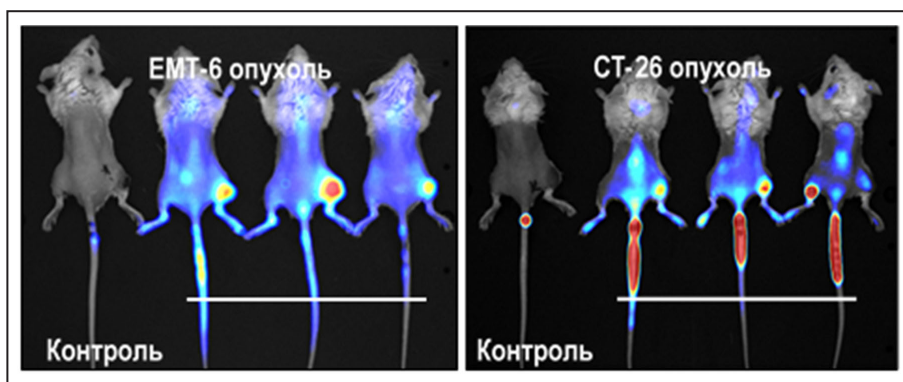


Рис. 1. Прижизненная визуализация распределения антител к Stabilin-1 человека (FVST15) в организме мышей с перевитыми опухолями рака молочной железы (EMT-6) и рака кишечника (CT-26)

радиофармацевтических препаратов для диагностики и терапии злокачественных новообразований. Полученные данные могут способствовать оптимизации дозировки и режимов введения препаратов на основе антител к PD-L1, а также помочь в выборе наиболее эффективных и безопасных кандидатов для дальнейших клинических исследований.

Для валидации на новых моделях *in vitro* и *in vivo* препарата PSMA-617-Tb-161 использована оригинальная технология получения ^{161}Tb , разработанная в НИЦ «Курчатовский институт». PSMA-617 является одним из наиболее широко применяемых молекул-носителей для радиолитической терапии изотопом ^{177}Lu опухолей пред-

стательной железы. ^{161}Tb является более эффективным изотопом для проведения такого вида терапии. Прототип РФАП синтезирован из компонентов российского производства в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и исследован в моделях *in vitro* на специализированных клеточных линиях и *in vivo* на животных с индуцированной опухолью, экспрессирующей (мишень) и не экспрессирующей (контроль) человеческий антиген PSMA. Использована оригинальная клеточная модель на основе линии клеток CT26, экспрессирующих человеческий антиген PSMA. Показано эффективное и селективное накопление препарата только в опухоли, экспрессирующей рецептор (рис. 2).

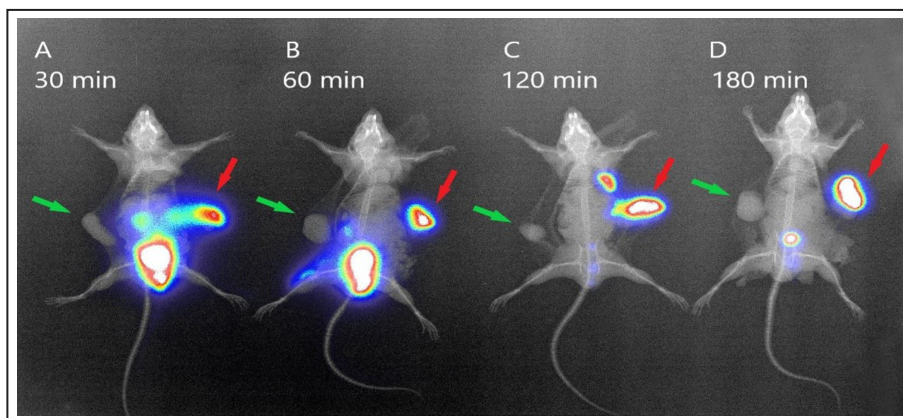


Рис. 2. Биораспределение радиоактивного препарата ^{161}Tb -DOTA-PSMA-617. Зеленый указатель – опухолевый узел CT26; красный указатель – опухолевый узел CT26-PSMA

1. Антитела против рецептора стабиллин-1 (stabilin-1) человека: пат. РФ на изобретение RU 2823309 C1 / Демьянов А. В. и др.; опубли. 22.07.2024.
2. Verlov N. et al. // Nanobiotechnol. Rep. 2024. V. 19. P. S210–S217.
3. Shashkova O.A. et al. // Nanobiotechnol. Rep. 2024. V. 19. P. S218–S225.

Разработка новых селенсодержащих противоопухолевых препаратов для фотодинамической терапии

С. В. Валуева^{1, 2}, П. Ю. Морозова¹, А. Б. Данилова², М. Э. Вылегжанина¹, И. В. Иванов¹

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Петрова Минздрава России

Разработаны методики синтеза полимерных гибридных трехкомпонентных наносистем (ГТН) на основе наночастиц (НЧ) селена (Se^0), фотосенсибилизатора – радахлорина (РХ) и полимерных носителей (ПН, двух модификаций амфифильных щеток) – графт-сополимеров (графт-СП) с полиимидной (образцы 1 и 2) или целлюлозной (образец 3) основной цепью и боковыми цепями полиметакриловой кислоты (ПМАК). Использование НЧ селена перспективно для дополнительного увеличения противоопухолевой активности ГТН, т. к. НЧ Se^0 способны воздействовать на врожденный и регуляторный иммунитет.

С целью выявления оптимального ПН при использовании в фотодинамической терапии (ФДТ) было проведено комплексное сравнительное исследование синтезированных ГТН и получены (методами УФ-видимой спектроскопии и атомно-силовой микроскопии (АСМ)) спектральные и морфологические характеристики этих ГТН. Синтезированные ПН характеризовались плотностью прививки боковых цепей f_{in} , равной 100 %, и степенью полимеризации m боковых цепей ПМАК: $m = 180$ (образец 1); $m = 270$ (образец 2); $m = 200$ (образец 3). Синтез ГТН осуществлялся в две стадии: проводилась стабилизация НЧ селена ПН с последующим введением РХ (стандартный концентрат для приготовления раствора для инфузий 0,35 %). Концентрации Se^0 , ПН и РХ были постоянными.

Совокупность представленных спектральных данных, полученных методом УФ-спектроскопии, позволила предположить, что при формировании ГТН имеет место стерическая стабилизация НЧ Se^0 макромолекулами ПН преимущественно за счет гидрофобных взаимодействий с метильными группами ПН с последующим

встраиванием НЧ Se^0 по типу металл-порфириновых комплексов внутрь порфиринового кольца РХ. Сравнение величины оптической плотности D для ГТН в области Q -полосы ($\lambda_Q = 640\text{--}675$ нм) показало незначительное уменьшение этого параметра в ряду $D_{\text{ГТН-1}} > D_{\text{ГТН-2}} > D_{\text{ГТН-3}}$.

На рисунке 1 представлены 3D-изображения поверхности тонких пленок, отлитых из водных растворов ПН – Se^0 (рис. 1а–в) и ГТН (рис. 1г–е). Для наносистем ПН – Se^0 четко визуализируются дискретные наноструктуры сферической формы диаметром $D_{\text{АСМ}} = 80\text{--}300$ нм. Важно отметить, что для нанодисперсии ПН – Se^0 , полученной на графт-СП с $m = 180$, помимо сферических дискретных наноструктур визуализируются также «капсулы» размером 300–400 нм (рис. 1а). Для ГТН методом АСМ четко визуализировались дискретные наноструктуры сферической формы диаметром $D_{\text{АСМ}} = 80\text{--}400$ нм, причем самой компактной являлась ГТН-1. Накопление и локализация ГТН в опухолевых клетках были оценены методом флуоресцентной конфокальной микроскопии в культуре клеток мышечно-неинвазивного рака мочевого пузыря человека 587 ВiCan TVV (*in vitro*) и у мышей линии BALB/с (Филиал ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий ФМБА России» – питомник лабораторных животных «Столбовая», Россия) с внутрикожно перевитой опухолью Эрлиха методом флуоресцентной визуализации системой Fluor i In Vivo (Южная Корея).

Анализ конфокальных изображений продемонстрировал, что ГТН накапливаются в цитоплазме злокачественных клеток, при этом интенсивность процесса сопоставима с накоплением РХ (рис. 2). Исследование *in vivo* было проведено на 10 мышах (5 самцах и 5 самках для визуальной оценки гендерной зависимости и получения

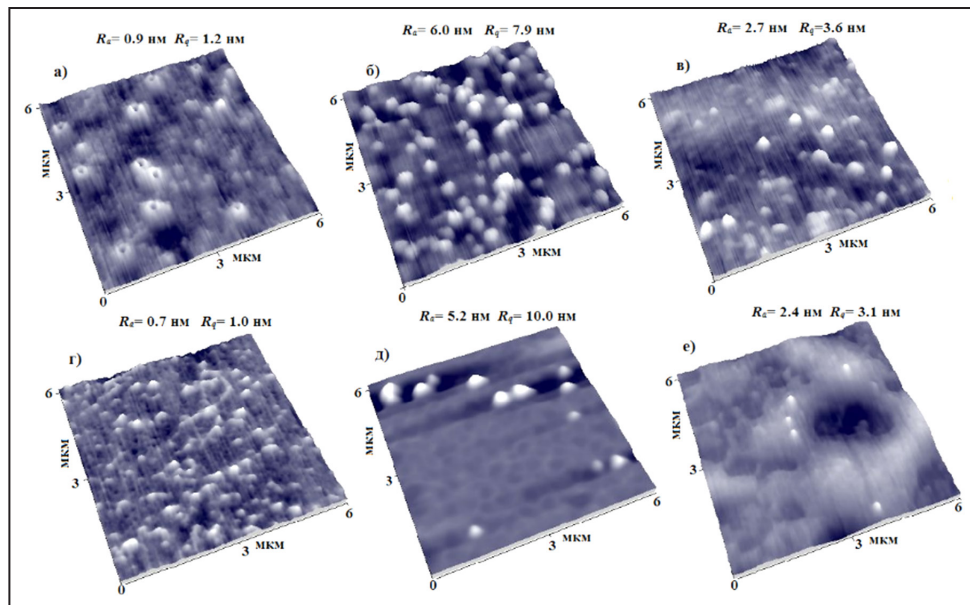


Рис. 1. 3D-изображения поверхности тонких пленок, полученных из водных растворов графт-сополимеров, загруженных наночастицами Se^0 : а–в – бинарные наносистемы: ПН-1 – Se^0 (а), ПН-2 – Se^0 (б), ПН-3 – Se^0 (в); загруженных наночастицами Se^0 и РХ: г–е – гибридные трехкомпонентные наносистемы: ГТН-1 (г), ГТН-2 (д), ГТН-3 (е)

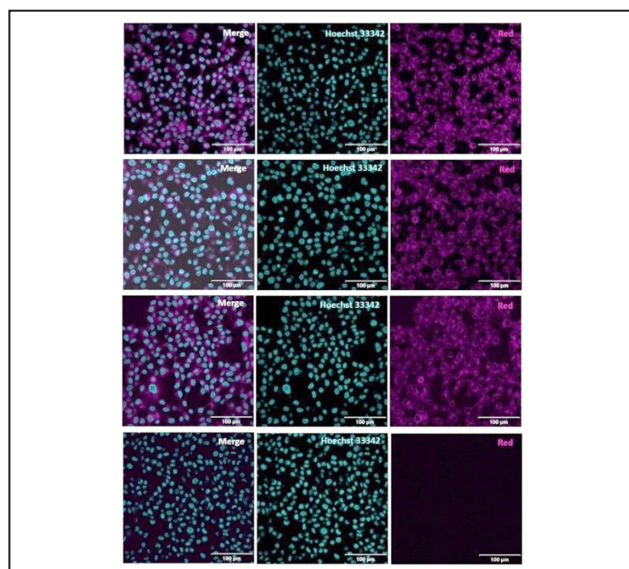


Рис. 2. Флуоресцентные фотографии микропрепаратов клеток рака мочевого пузыря РМП 587 BICan TVV после 24 ч инкубации с веществами: *верхний ряд* – инкубация с РХ; *второй ряд* – инкубация с ГТН-1; *третий ряд* – инкубация с ГТН-3; *нижний ряд* – отрицательный контроль. *Слева направо* – совмещенное изображение, окраска Hoechst 33342, флуоресценция радахлорина, ГТН-1 и ГТН-3 соответственно

усредненных данных о распределении ГТН). Для регистрации флуоресценции использовали систему флуоресцентной визуализации Fluor i In Vivo с возможностью подключения аппарата газового наркоза. Полученные цифровые изображения анализировали в программе ImageJ (National Institute of Health, Bethesda, MD, США). Визуальных отличий в накоплении ГТН и РХ у животных разного пола не наблюдалось.

Показано, что изученные ГТН при введении *in vivo* поступают в опухоль, не захватываясь ретикуло-эндотелиальной системой, и обе-

спечивают замедленное (по сравнению с РХ) выведение из опухоли. Это обусловлено тем, что диапазон размеров наноструктур ГТН подходит для обеспечения длительной циркуляции и усиленного накопления с уменьшением выведения. Совокупность полученных результатов показывает перспективность разработки селеносодержащих ГТН для лечения и диагностики онкологических заболеваний, в т. ч. методом ФДТ.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 24-25-00413.

1. Валуева С. В., Морозова П. Ю., Данилова А. Б. // Тенд. разв. науки и образ. 2024. Т. 33. № 109 (Ч. 14). С. 223.
2. Valueva S.V., Morozova P.Yu., Vylegzhanina M.E., Ivanov I.V. // Nanobiotechnol. Rep. 2024. V. 19. No. 6. P. 959–965.
3. Валуева С. В., ..., Морозова П. Ю., ..., Данилова А. Б. и др. // Вопр. онкол. 2024. Т. 70. Вып. 6. С. 1068.

Гарантия качества в протонной лучевой терапии опухолей глаза и придаточного аппарата

Ж. С. Лебедева, Д. И. Гранин, В. И. Максимов

Отдел медицинской радиологии НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ создается онкоофтальмологический комплекс протонной лучевой терапии (ПЛТ) на базе циклотрона Ц-80. Комплекс, состоящий из специализированного технологического и медицинского оборудования, представляет собой инструмент для формирования горизонтального широкого пучка протонов с энергией до 70 МэВ и максимальным диаметром пучка 3 см для лечения онкоофтальмологических новообразований. Циклотрон Ц-80 будет решать такие задачи, как генерация высокоинтенсивного пучка протонов с целью наработки изотопов для медицинского использования в диагностике и терапии и генерация низкоинтенсивного протонного пучка для проведения ПЛТ с энергией протонов до 70 МэВ онкоофтальмологических пациентов.

Протонная терапия становится все более популярной. Американская ассоциация медицинских физиков (AAPM) разработала несколько протоколов, посвященных контролю качества протонных пучков. Однако эти протоколы не распространяются на системы с фиксированным в горизонтальной плоскости направлением пучка протонов, предназначенные для ПЛТ онкоофтальмологических пациентов. И так как на сегодняшний день в мире насчитывается чуть более десятка подобных установок, то подходы к контролю их качества и частота проведения сильно отличаются. Единой особенностью ПЛТ онкоофтальмологических пациентов является то, что лечение выполняется в положении сидя с использованием техники добровольной фиксации взгляда с помощью специального устройства для обеспечения оптимального входа пучка в структуры глаза. Совместно с этим используется система слежения за направлением взгляда пациента, которая обычно реализуется через

видеокамеры, и прерывание облучения при отведении взгляда. Как сама медицинская технология, так и все оборудование, применяемое в процессе, требуют пристального внимания и контроля, чтобы сохранялась возможность устранить систематические ошибки.

В связи с этим для поддержания качества ПЛТ были решены следующие задачи:

- 1) обеспечение преемственности метода и сравнение с традиционной технологией;
- 2) проектирование технологии контроля качества оборудования.

Результатом стала разработанная система контроля качества для фиксированного горизонтального пучка протонов с целью лечения офтальмологических заболеваний и программное обеспечение (ПО), интегрирующее максимум тестов, проводимых на всех типах фантомов и дозиметрического оборудования.

Представленные тесты контроля качества основаны на протоколе AAPM TG-224 и дополнены тестами, специфичными для протонной онкоофтальмологии. Уровни допустимых отклонений для разных тестов выработаны на основе литературных данных и данных технического проекта и заложены в ПО как базисные. Все тесты поделены на ежедневные, ежемесячные и ежегодные и включают проверку радиационного выхода, симметрии и соосности пучка, дистального спада модифицированной кривой Брэгга и других параметров. Такая программа гарантии качества должна пересматриваться в среднем раз в три года, а статистика, собранная в течение первого года, позволяет оптимизировать процесс на основе полученных данных.

В разработанном ПО «ОКО» для контроля качества, позволяющем строить тренды различных параметров всех подсистем комплекса, ис-

пользуются как результаты автоматизированных проверок, так и требующих действий оператора. Интерактивные подсказки проводят пользователя через всю серию необходимых по расписанию тестов (в т. ч. со вспомогательным оборудованием) и разрешают вход в лечебный режим при успешном завершении. Несмотря на значительные технические различия центров в лечении ПЛТ онкоофтальмологии, локальный контроль опухоли в большинстве случаев достигает более 95 % и может приблизиться к 100 % за счет повышения точности доставки дозы. В то же время не стоит забывать, что клиниче-

ский эффект определяется не только контролем опухоли, но и развивающимися лучевыми реакциями и качеством жизни пациента. Ввиду того что в ПЛТ мы имеем дело с высокими градиентами дозы, самое незначительное изменение в положении глаза может приводить к значительным изменениям в дозе на критические структуры. Контроль случайных и систематических ошибок позволит повысить качество доставки дозы и, возможно, уменьшить традиционный отступ на неточности в 2,5–3 мм, а также предоставить возможность контроля осложнений лучевой терапии.



Исследования полимеров

- 98 Электропроводящие композиты на основе сополи(уретан-имид)ов и наночастиц графена для клеточных технологий
- 99 Новая методика получения ультрафильтрационных мембран на основе нетканых сополи(уретан-имид)ов
- 100 Водорастворимые сульфосодержащие полимеры с собственной противовирусной активностью
- 101 Влияние типа осадителя на структуру фазоинверсионных полиамидоимидных мембран
- 103 Влияние добавленного растворителя на структуру полимеризующегося глубокого эвтектического растворителя на основе холин-хлорида и акриловой кислоты и связь его полимеризационных характеристик со структурными изменениями
- 104 Теория кинетики фотоиндуцированного упорядочения и деформации азобензолсодержащих полимеров
- 106 Антразолиновые люминофоры в полимерной цепи: квантово-химическая теория и эксперимент
- 107 Модификация нанокристаллической целлюлозы для получения композиционных материалов с остеокондуктивными свойствами
- 109 Факторы, определяющие морфологию поверхностного слоя частиц «ядро – оболочка»
- 110 Молекулярные щетки с полифлуореновой основной цепью и боковыми цепями полиметакриловой кислоты: люминесцентные свойства и самоорганизация в растворах
- 111 Звездообразные термочувствительные поли-N-ацилпропиленимины с ядром трианглана
- 113 Полимерные носители ионов ванадия на основе сополимеров N-винилпирролидона с винилиминами
- 114 Метод синтеза композитов на основе полиизопрена с повышенной прочностью
- 115 Полиэлектролитные щетки с белковоподобными нанокolloидами

Электропроводящие композиты на основе сополи(уретан-имид)ов и наночастиц графена для клеточных технологий

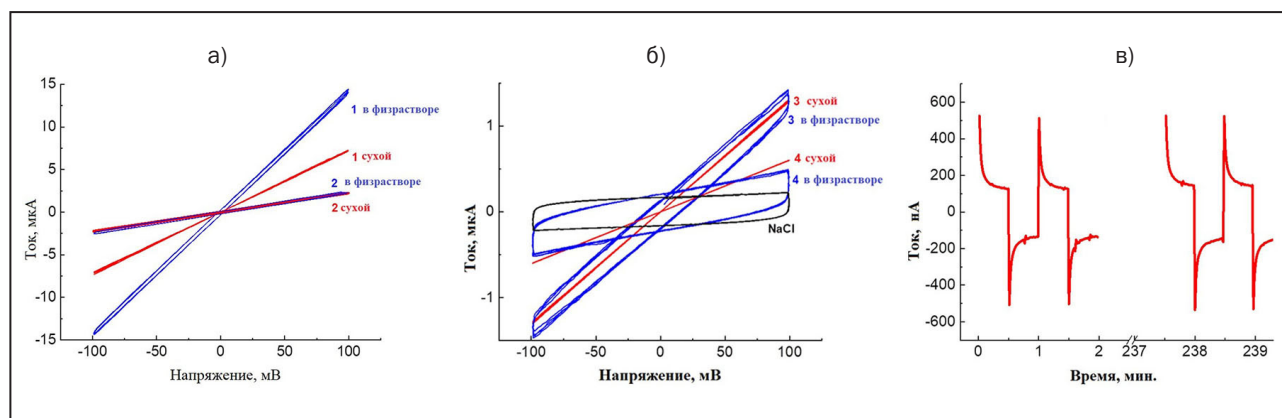
А. Л. Диденко, А. М. Камалов, М. А. Шишов, Н. В. Смирнова, К. А. Колбе,
А. С. Нестерова, Г. В. Ваганов, В. Е. Юдин, В. В. Кудрявцев

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

В ходе селективной деструкции уретановых звеньев термолизом в наполненном графеном сополимере получены полиимидные пленки с пористой поверхностной структурой для лучшего прикрепления клеток. Отношение уретановых блоков к имидным составляло в мольном соотношении 1 к 10. Масса введенного графена – 1 % от общей массы сополимера. Изучены механические, электрические и сорбционные свойства полученных композитов. Показано, что синтезированные образцы по механическим свойствам удовлетворяют требованиям к гибким полимерным электродам. Параметры вольт-амперных характеристик синтезированных

гибридных образцов (рис. а–в) соответствуют требованиям, предъявляемым к полимерным материалам для биоэлектродов. Композитные пленки протестированы в качестве субстратов (подложек) для культивирования на их поверхности дермальных фибробластов человека.

Из результатов метилтетразолиевых тестов следует, что разработанные гибридные пленки являются биосовместимыми и, согласно данным по их электропроводности, могут быть использованы для электрической стимуляции клеток. Полученные композиты перспективны для биомедицинских применений при решении задач клеточных и регенеративных технологий.



Вольт-амперные характеристики (а, б) для: сухих образцов (красный); образцов, смоченных физиологическим раствором (синий); физиологического раствора (черный). Развертка токов во времени для образца композиции сополи(уретан-имид)а, содержащего 1 масс. % графена, термолизованного при 300 °С (в). Показаны величины токов в первые минуты измерений и спустя 4 ч непрерывного циклирования потенциалом ± 100 мВ П-образной формы

Новая методика получения ультрафильтрационных мембран на основе нетканых сополи(уретан-имид)ов

А. С. Нестерова¹, Е. М. Иванькова¹, Г. В. Ваганов¹, А. Л. Диденко¹, А. М. Камалов¹,
Е. Н. Попова¹, Т. С. Анохина², И. Л. Борисов², В. Е. Крафт², В. Е. Юдин¹, А. О. Малахов²,
В. В. Кудрявцев¹

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

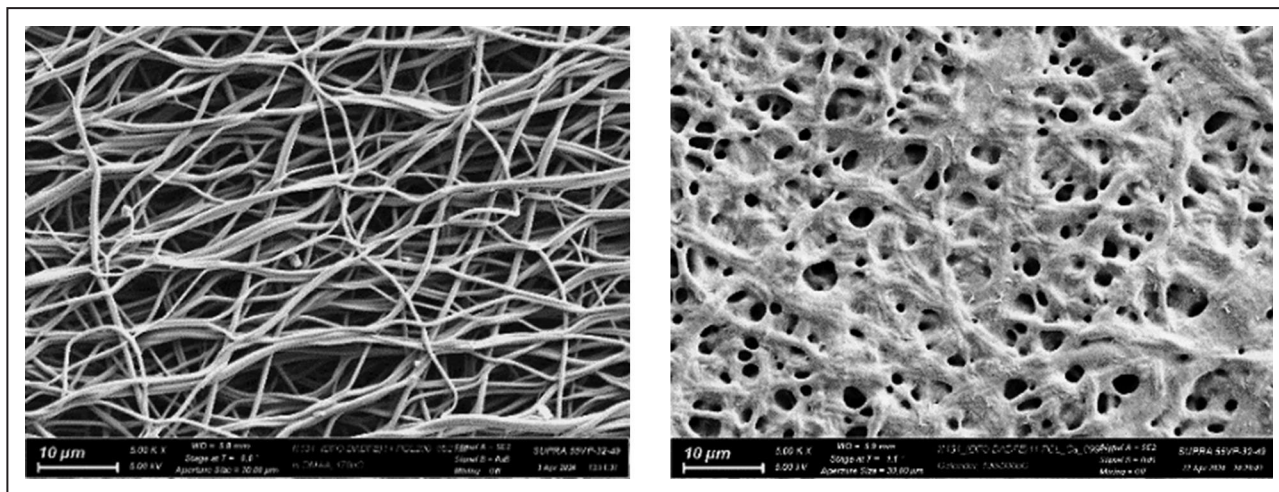
² Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН

На основе ангидридов ароматических тетракарбоновых кислот (пиромеллитовой, дифенил-оксидтетракарбоновой), диаминов (диаминодифенилового эфира), толуиленизоцианата и поликапролактона синтезированы сополи(уретан-имид)ы (СПУИ), содержащие в своей структуре блоки ароматических имидов и поликапролактона. Форполимеры сополимеров подвергнуты электроосаждению из их растворов в амидных растворителях. В результате получены полимерные маты со структурой переплетенных цилиндрических микроволокон.

Показано, что в результате высокотемпературного каландрирования полученных матов происходит компактизация структуры СПУИ. Эффект компактизации подтверждается результатами исследования образцов методами сканирующей электронной микроскопии, динамического меха-

нического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии. Каландрированные маты имеют модуль упругости 850–1650 МПа, прочность на разрыв 87 МПа и удлинение при разрыве 85 %. В результате каландрирования образцов их пористость, определенная пикнометрическим методом, снижалась и находилась на уровне 0,412 %. По результатам анализа свойств полученных каландрированных матов сделано заключение о перспективности их использования для получения мембран для ультрафильтрации кислых водных растворов и растворов амидных растворителей, используемых в фармацевтике. Структура нетканого и каландрированного материала представлена на рис. а, б.

Работа поддержана грантом РНФ № 22-19-00831.



Микрофотографии сканирующей электронной микроскопии образца нетканого СПУИ-материала (слева); того же образца, каландрированного в течение 15 мин при $T = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ (справа). Размер пор 0,1–0,05 мкм

Водорастворимые сульфосодержащие полимеры с собственной противовирусной активностью

Е. Ф. Панарин¹, А. А. Штро², Н. А. Нестерова¹, И. И. Гаврилова², А. В. Гаршинина²,
А. В. Галочкина², Ю. В. Николаева²

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Научно-исследовательский институт гриппа им. А. А. Смородинцева Минздрава России

Опыт пандемии COVID-19 показал, что инфекционный процесс трудно контролировать в глобальных масштабах. В связи с этим как никогда актуальна разработка новых противовирусных препаратов широкого спектра действия. С этой целью осуществлен синтез 14 сополимеров стиролсульфоната натрия (CCNa) с различными функциональными сомономерами, установлена структура синтезированных полимеров, их физико-химические свойства, а также конформационные и молекулярные характеристики.

В Научно-исследовательском институте гриппа им. А. А. Смородинцева Минздрава России исследована цитотоксичность новых полимеров, а также их противовирусная активность. Для оценки противовирусной активности были выбраны три вируса с разными стратегиями репродукции и способами передачи: респираторно-синцитиальный вирус, вирус гриппа А и вирус герпеса 1-го типа.

Установлена взаимосвязь между строением полимеров и их биологической активностью. Выявлена различная чувствительность вирусов и клеток к исследованным полимерам, что, вероятно, связано с особенностями строения оболочки вируса и стенки клеток. Показано, что введение в структуру CCNa различных функциональных групп не приводит к снижению противовирусной активности, но существенно снижает цитотоксичность. Установлено заметное влияние на противовирусную активность молекулярной массы полимеров.

Выявлены соединения с высоким химиотерапевтическим индексом, активные одновременно в отношении трех исследованных вирусов, перспективные для углубленного изучения. Полученные результаты демонстрируют перспективность сополимеров CCNa в качестве модели для разработки на их основе противовирусного препарата широкого спектра действия.

Влияние типа осадителя на структуру фазоинверсионных полиамидоимидных мембран

Н. В. Захарова¹, Г. К. Лебедева¹, Н. Н. Сапрыкина¹, Е. В. Кручинина¹,
Е. А. Новожилова², С. В. Кононова¹

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Получены пористые фазоинверсионные мембраны сложной морфологии на основе ароматических полиамидоимидов (PAI-V, Ну-соPAI's, химическое строение которых представлено на рис. 1) с различным числом гидроксильных групп в диаминной составляющей повторяющегося звена. Изучено влияние «жесткого» и «мягкого» осадителей на структурно-морфологические особенности полимерных мембран различного химического строения.

В случае использования мягкого осадителя при приготовлении мембран их морфология существенно меняется по сравнению с теми, что сформированы в условиях жесткого осадителя (вода). Полученные пористые пленки имеют губчатую структуру (рис. 2а–г) с более крупными

каплевидными порами, размер которых увеличивается в направлении нижней поверхности мембраны. С увеличением количества гидроксильных групп в макромолекуле размер пор и доля губчатых пор увеличиваются, а количество более крупных пор существенно уменьшается. Поверхностный скин-слой исчезает, что видно, например, на микрофотографии образца Ну-соPAI II, осажденного в этанол (см. рис. 2). Мембраны Ну-соPAI II и Ну-PAI I, полученные в водной осадительной ванне, проявляют ультрафильтрационные свойства при повышенном давлении. Что касается образца Ну-соPAI III (см. рис. 2г), то на снимках сканирующей электронной микроскопии видны крупные пористые образования в скин-слое, что способствует высокому потоку через мембрану.

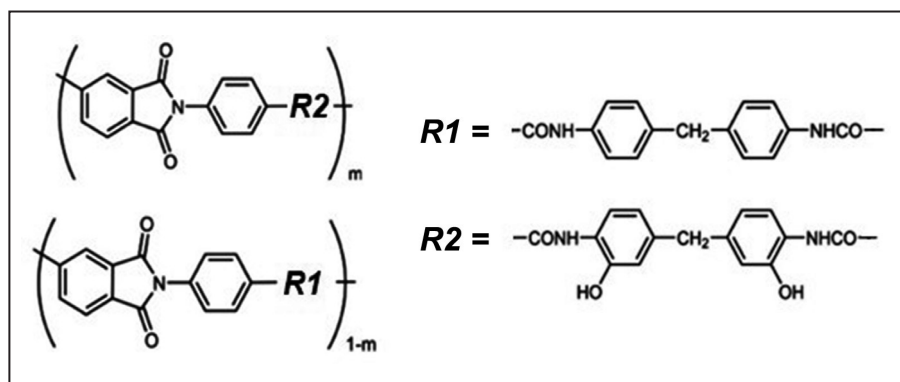


Рис. 1. Строение Ну-PAI I ($m = 1$), Ну-соPAI's II–IV ($m = 0,7; 0,5; 0,3$), PAI V ($m = 0$)

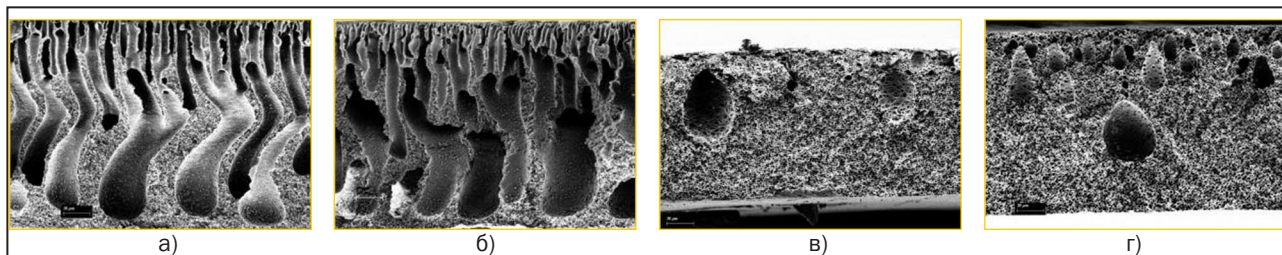


Рис. 2. Асимметричные микропористые мембраны на основе Ну-соPAI II (а, в) и Ну-соPAI III (б, г): осадители – вода (а, б) и этанол (в, г)

Исследование разбавленных растворов мембранообразующих полимеров оптическими методами выявило изменение состояния системы в присутствии растворителя и осадителя. На основании полученных результатов удалось оценить чувствительность исследуемой системы «полимер – растворитель – осадитель» к изменению состава сополимера (числа гидроксильных групп в повторяющемся звене).

Таким образом, найдены основные факторы и показано их влияние на фазоинверсионный процесс формования мембран, что расширяет возможности управления градиентно-пористой структурой и получения образцов целевого назначения – от фильтрационных до диффузионных пермеационных мембран.

Влияние добавленного растворителя на структуру полимеризующегося глубокого эвтектического растворителя на основе холин-хлорида и акриловой кислоты и связь его полимеризационных характеристик со структурными изменениями

Н. В. Лукашева, В. К. Воробьев, В. С. Андреева, М. А. Смирнова,
А. В. Добродумов, М. А. Смирнов

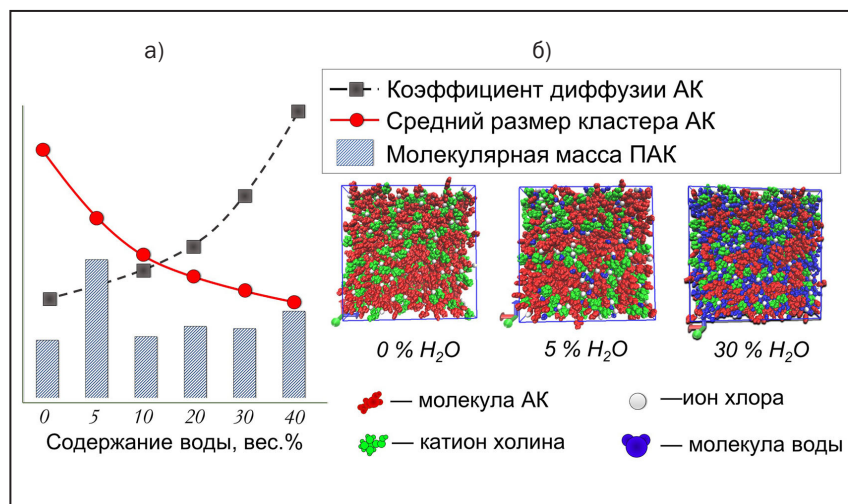
Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

Впервые с помощью компьютерного моделирования и экспериментальных методов исследовано влияние добавленного растворителя (воды) на молекулярную организацию полимеризующегося глубокого эвтектического растворителя (ГЭР) на основе акриловой кислоты (АК) и холин-хлорида и на процесс его радикальной полимеризации.

С помощью компьютерного моделирования установлено, что в чистом ГЭР на основе холин-хлорида и АК молекулы АК объединяются в кластеры, формируя матрицу, в которой распределены другие компоненты (рис.). Показано, что существует критическая доля добавленной воды (20 вес. %), ниже которой молекулы воды еще встраиваются в структуру ГЭР, а при больших величинах – формируют кластеры. Показано, что добавление воды приводит к уменьшению размеров кластеров АК, сопровождающемуся увеличением ориентационной подвижности и коэф-

фициента диффузии компонентов. Анализ экспериментально полученных полимеризационных характеристик ГЭР и их связи со структурными изменениями показал, что при оптимальном сочетании размера кластеров АК и ориентационной и трансляционной подвижности макрорадикалов достигается условие синтеза полимера с высокой молекулярной массой. Установлено, что содержание воды 5 вес. % является условием получения молекул полиакриловой кислоты (ПАК) с максимальной молекулярной массой.

Практическое применение – подбор условий синтеза молекул ПАК с большой молекулярной массой, что важно для достижения высоких механических характеристик материала. Полученные знания предоставляют ценную информацию о структуре и полимеризационных свойствах ГЭР на основе мономеров, что имеет решающее значение для разработки функциональных ионных гелей.



Зависимости размеров кластеров акриловой кислоты, коэффициентов диффузии и молекулярной массы полиакриловой кислоты от содержания воды в системе (а); мгновенные снимки молекулярной организации в глубоком эвтектическом растворителе при различном содержании воды (б)

Теория кинетики фотоиндуцированного упорядочения и деформации азобензолсодержащих полимеров

В. П. Тощевиков¹, М. Saphiannikova², N. Tverdokhle²

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Институт полимерных исследований Ассоциации Лейбница, Германия

Одной из актуальных задач в науке о полимерах является создание стимул-чувствительных материалов, способных изменять свои свойства под влиянием внешних воздействий. Азобензолсодержащие полимеры способны изменять оптические свойства и свою форму под влиянием светового облучения за счет анизотропии изомеризации азобензольных хромофоров по отношению к направлению поляризации света (рис. а).

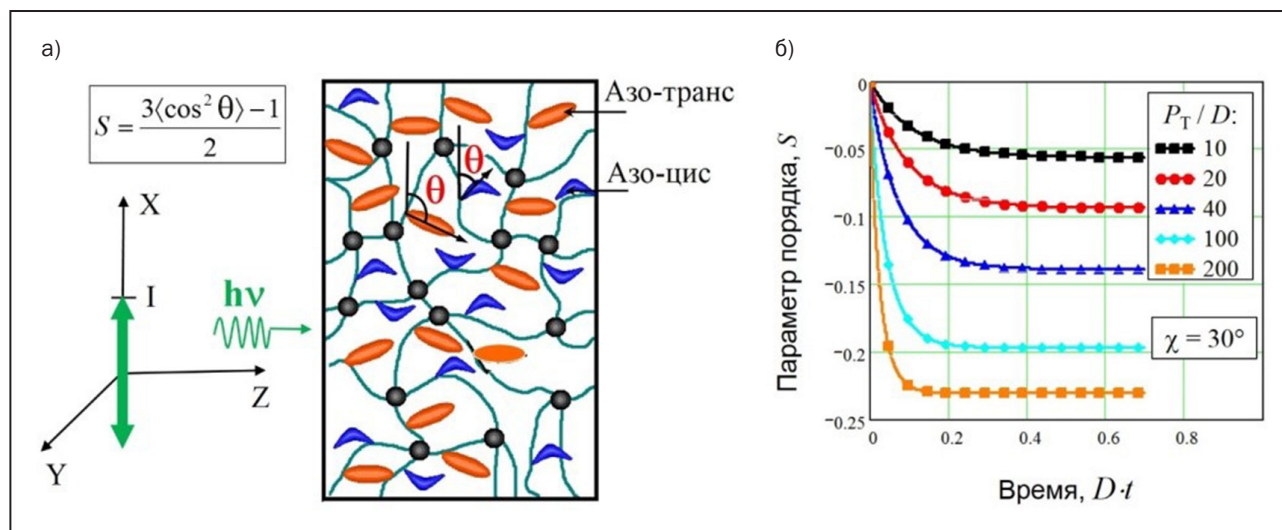
В настоящей работе представлен теоретический подход, позволяющий описать закономерности кинетики фотоиндуцированного упорядочения и деформации широкого класса азобензолсодержащих полимеров под воздействием линейно-поляризованного света. Используются уравнения фотоизомеризации азобензольных хромофоров, в которых вероятность перехода хромофора из основного транс-состояния в цис-состояние за единицу времени W_T определяется углом θ между главной осью хромофора и направлением поляризации света: $W_T = P_T \cos^2 \theta$. Величина P_T пропорциональна интенсивности светового облучения. В модели предполагается, что при переходе из транс- в цис-состояние хромофор меняет свою ориентацию на некоторый угол χ .

Показано, что под воздействием линейно-поляризованного света возникает одноосное упорядочение азобензольных хромофоров по отношению к направлению поляризации света с преимущественной ориентацией хромофоров в плоскости, перпендикулярной направлению поляризации света с параметром порядка $S < 0$. Скорость изменения параметра порядка со временем, а также абсолютное значение параметра порядка увеличиваются при увеличении интенсивности света и зависят от коэффициента вращатель-

ной диффузии D азобензольных хромофоров, связанного с вязкостью полимерной матрицы (рис. б).

Переориентация азобензольных хромофоров под воздействием линейно-поляризованного света изменяет конформации полимерных цепей за счет жесткости спейсеров, связывающих хромофоры с полимерными цепями, и приводит к деформации азобензолсодержащих полимеров. Показано, что возникающее механическое напряжение может достигать значений нескольких сотен мегапаскалей при интенсивности света 100 мВт/см^2 , что может приводить к необратимой деформации азобензолсодержащих полимеров, находящихся в стеклообразном состоянии. В зависимости от распределения ориентации хромофоров внутри полимерных цепей, которое связано с химической структурой, азобензолсодержащие полимеры могут демонстрировать либо растяжение, либо сжатие по отношению к направлению поляризации света. Фотоиндуцированная деформация сшитых азобензолсодержащих полимерных сеток зависит от плотности сшивок и концентрации азобензольных хромофоров, при этом теоретически предсказанные зависимости степени деформации от плотности сшивок хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Внедрение азобензольных хромофоров в жидкокристаллические (ЖК) полимеры позволяет контролировать ориентационное упорядочение и деформацию таких многокомпонентных полимеров путем светового облучения. Показано, что облучение линейно-поляризованным светом может приводить к двусосному упорядочению и двусосной деформации азобензолсодержащих ЖК-полимеров, при этом одна из осей анизотро-



Схематическое изображение азобензолсодержащего полимера под воздействием линейно-поляризованного света (а); зависимости параметра порядка азобензольных хромофоров от времени при разных значениях параметра P_T/D , пропорционального интенсивности светового облучения (б)

пии связана с направлением поляризации света, а другая – с направлением ЖК-директора, который выстраивается перпендикулярно направлению поляризации света.

Приведенные выше результаты теоретических расчетов находятся в качественном и количественном согласии с экспериментальными данными и результатами компьютерного моделирования по фотоиндуцированному упорядочению и деформации широкого класса азобензолсодержащих полимеров под воздействием линейно-поляризованного света. Это указывает на универсальность разработанного теоретического подхода и открывает возможность его применения в дальнейшем для исследования упорядочения и деформации азобензолсодержащих полимеров под воздействием светового облучения других поляризаций (циркулярно-поляризованного света, эллиптически-поляризованного света и светового облучения с меняющимся

в пространстве направлением поляризации). Дополнительно можно отметить, что ориентационное упорядочение азобензольных хромофоров и изменение конформаций полимерных цепей под воздействием света приводит также к анизотропии оптических свойств азобензолсодержащих полимеров.

Таким образом, путем изменения направления поляризации и интенсивности света можно контролировать ориентационное упорядочение, а также изменение механических и оптических свойств азобензолсодержащих полимеров в зависимости от их вязкоупругих характеристик.

Результаты работы могут представлять интерес для создания фоточувствительных полимеров с заданными свойствами для практических приложений, где требуется управление механическими и оптическими свойствами материалов с помощью света.

Антразолиновые люминофоры в полимерной цепи: квантово-химическая теория и эксперимент

Р. Ю. Смыслов¹, И. А. Щугорева², И. А. Насирова¹, М. Я. Гойхман¹, Ф. Н. Томили³, П. А. Аврамов⁴, А. В. Якиманский¹

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Красноярский научный центр СО РАН

³ Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»

⁴ Research Center, Kyungpook National University, Republic of Korea

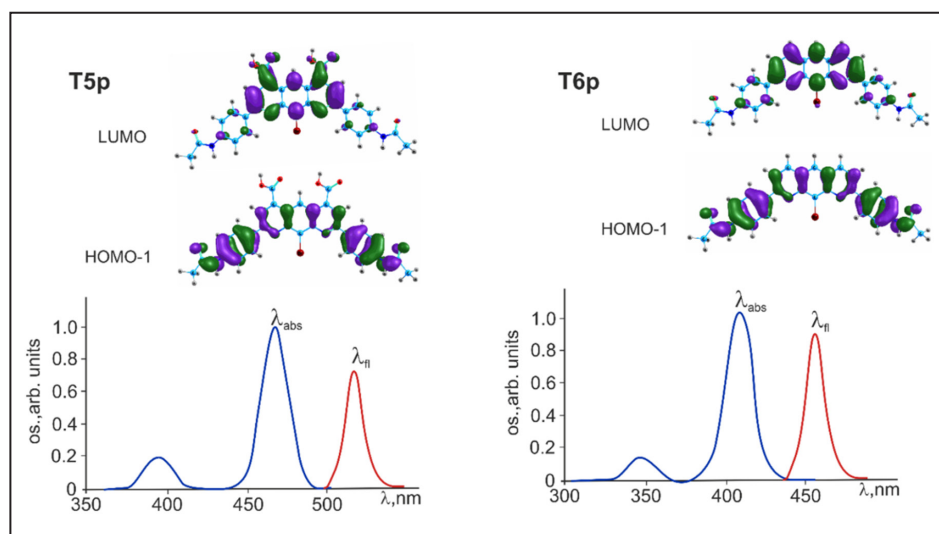
Люминесцентными методами исследованы растворы и пленки полиамидов, содержащих в макромолекулярном хребте 1,9-антразолин с фрагментами пара- или мета-[(карбонил)амино]фенил-1-ена, как продолжение работ коллектива. В то же время для квантово-химических моделей антразолинсодержащих бифункциональных структурных единиц с помощью теории функционала плотности с временной зависимостью изучены оптические свойства.

Проведено сравнение теоретических спектров поглощения и люминесценции 10 атомистических моделей с соответствующими экспериментальными данными и предсказаны оптические свойства 2 новых люминесцирующих молекул с бром-ауксохромом (рис.). Анализ оптических свойств показал идентичное влияние типа и положения заместителя на спектры макромолекул,

содержащих пара- или мета-[(карбонил)амино]-фенил-1-еновых 1,9-антразолинов.

Установлено, что спектры поглощения и люминесценции теоретических моделей параконфигурации сдвинуты в более длинноволновую область и имеют более высокие интенсивности, чем у соответствующих моделей метаконфигурации. Аналогичное явление наблюдалось и в эксперименте с низкомолекулярными соединениями и соответствующими полимерами в растворах и массе.

Полученные результаты позволяют разработать теоретические подходы к конструированию макромолекул, содержащих в основной цепи многоядерные люминофорные группы с гетероатомами при наличии ряда заместителей, с целью оптимизации оптических и электронных характеристик.



Теоретические спектры поглощения (синие кривые) и фотолуминесценции (красные кривые), а также НОМО-1- и LUMO-состояния, участвующие в переходах S_0-S_1 , для квантово-химических моделей с параконфигурацией фениленовых колец при антразолиновом ядре, содержащем в качестве заместителей атом брома и две карбоксильные группы (Т5р) либо только атом брома (Т6р)

Модификация нанокристаллической целлюлозы для получения композиционных материалов с остеокондуктивными свойствами

О. А. Соломаха¹, М. А. Степанова¹, А. В. Добродумов¹, И. В. Гофман¹, Ю. А. Нащекина², А. В. Нащекин³, Е. Г. Коржикова-Влах¹

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Институт цитологии РАН

³ Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН

Целлюлоза – один из основных возобновляемых полимеров, свойства которого очень привлекательны во многих областях, включая биомедицинские приложения. Модификация нанокристаллической целлюлозы (НСС) открывает возможности создания наноматериалов с интересующими свойствами, а также комбинирования полученных наноматериалов с другими биомедицинскими полимерами. Среди последних особый интерес представляют биосовместимые и способные к биodeградации алифатические сложные полиэфиры, такие как полилактид, поликапролактон, сополимер лактида и гликолида, и др. Ключевой проблемой в получении композитов на основе данного класса полимеров и НСС являются различия в их физико-химических свойствах, а именно диаметрально противоположные гидрофильно-гидрофобные свойства, что в свою очередь осложняет равномерное распределение НСС (наполнитель) в матрице полимера. Указанная проблема может быть решена путем модификации поверхности НСС для придания ей амфифильных свойств и, как следствие, улучшения распределения наполнителя в матрице гидрофобного полимера. Повышение однородности распределения наполнителя в матрице полимера напрямую связано с улучшением механических свойств композита.

Ранее было показано, что НСС, модифицированная олигомерами глутаминовой кислоты, может выполнять роль наполнителя для получения композиционных материалов на основе алифатических сложных полиэфиров. Подобные материалы показали хорошую биосовместимость и обладали остеокондуктивными свойствами, благодаря чему их можно изучать для применения

в области регенерации костной ткани. На данном этапе работы для получения композиционных материалов на основе поликапролактона (PCL) и модифицированной НСС были предложены различные методы ковалентной модификации НСС амфифильными полианионами, такими как модифицированный гепарин (Hep-mod), поли(α -глутаминовая кислота) (PGlu), а также поли(α -глутаминовая кислота), модифицированная лизином (PGlu-Lys; рис.). Успешность модификации НСС была подтверждена методами инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье и твердотельной спектроскопии ядерного магнитного резонанса на ядрах ^{13}C , а также методами динамического и электрофоретического рассеяния света и термогравиметрического анализа.

Изучение пленок методом оптической микроскопии в проходящем и отраженном свете, а также методом сканирующей электронной микроскопии показало увеличение равномерности распределения наполнителя и формирования однородной поверхности материалов при использовании в качестве наполнителя модифицированной НСС. Механические свойства полученных композитов исследовали в испытаниях на растяжение. Наилучшие механические свойства наблюдались для пленок PCL, наполненных НСС, Hep-mod или PGlu, привитой после силанизации НСС.

Биологическая оценка *in vitro* показала низкую адгезию мезенхимальных стволовых клеток на поверхности пленки из чистого PCL и композита PCL/NCC-APTES-PGlu и высокую адгезию клеток на поверхности композитов PCL/NCC, PCL/NCC-Hep-mod или PCL/NCC-PGlu-Lys. Изучение остеокондуктивных свойств полученных

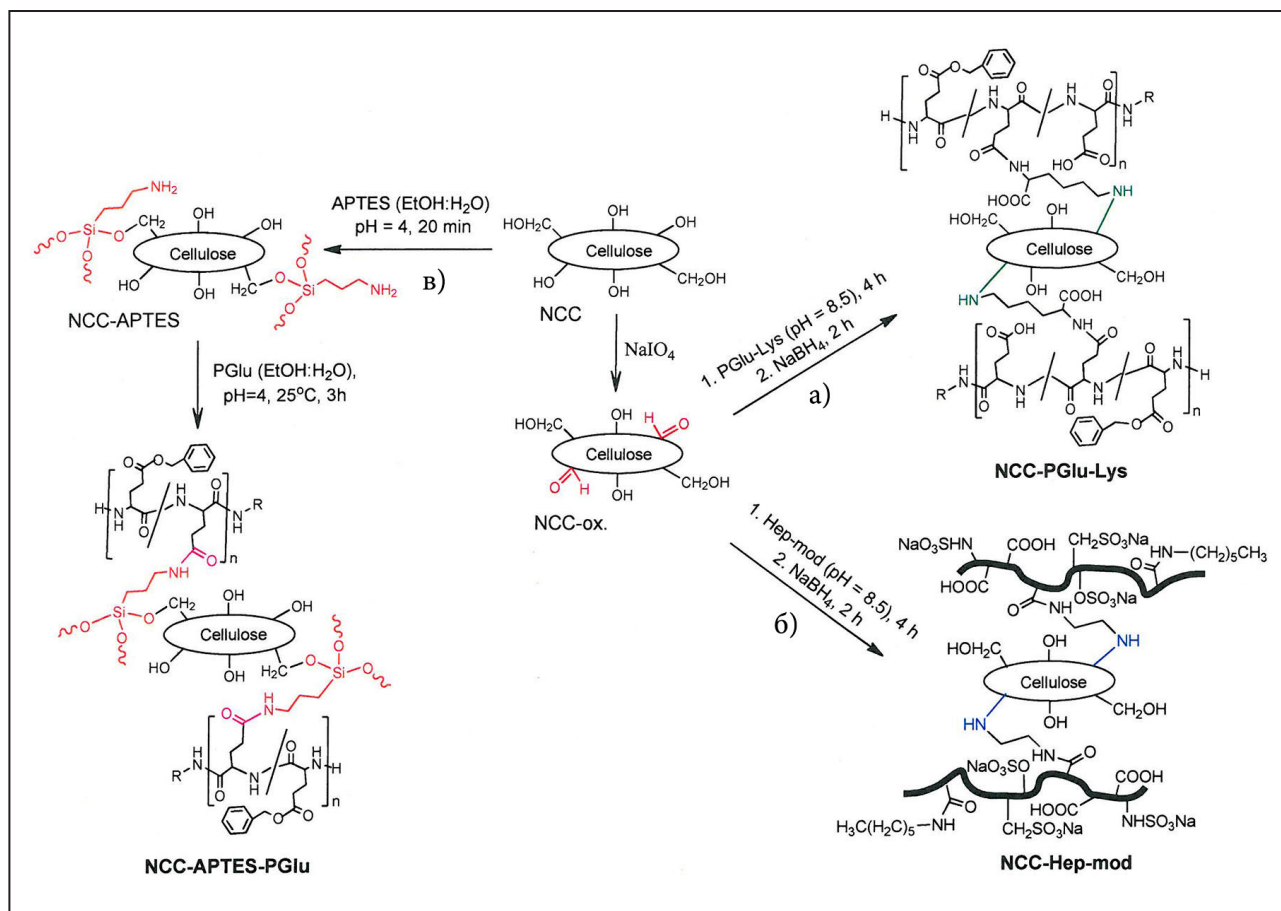


Схема модификации нанокристаллической целлюлозы (NCC) амфифильными полианионами: а – окисление NCC перйодатом натрия и модификация PGlu-Lys; б – Hep-mod соответственно; в – силанизирование с помощью (3-аминопропил)триметоксисилана (APTES) с последующей реакцией с активированной PGlu

компози́тов осуществляли путем проведения остеогенной дифференцировки мезенхимальных стволовых клеток, адгезированных на поверхности компози́тов, с последующим качественным детектированием щелочной фосфатазы – маркера раннего остеогенеза – и визуализации минеральных отложений (кальций-специфическое окрашивание). Все полученные компози́ты, содержащие модифицированную NCC, про-

демонстрировали osteoconductive свойства, однако наилучшими свойствами обладали компози́ты PCL/NCC-Hep-mod и PCL/NCC-PGlu-Lys.

Разработанные компози́ты на основе PCL и NCC, функционализированные модифицированными полианионами, представляются весьма перспективными для дальнейшего изучения в качестве 3D-скафолдов для регенерации костной ткани.

Факторы, определяющие морфологию поверхностного слоя частиц «ядро – оболочка»

О. Д. Якобсон, Е. М. Иванькова, Е. Н. Попова, Н. Н. Шевченко

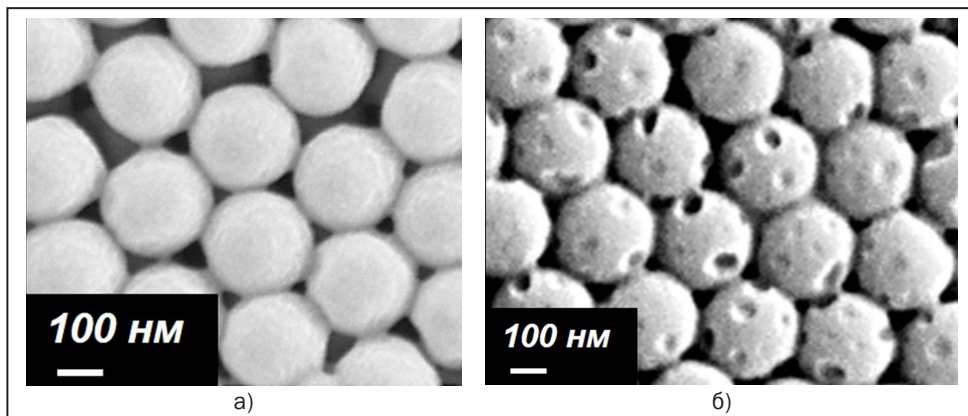
Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

Контроль морфологии полимерных частиц является важной частью производства высококачественной продукции, используемой, в частности, в медицинских диагностикумах. Чаще всего при эмульсионной полимеризации образуются сферические частицы. Однако морфологию частиц можно контролировать за счет включения гидрофильных (со)мономеров или сшивающих агентов в процессе их синтеза. Несмотря на значительный прогресс в области формирования частиц заданной морфологии на основе одного полимера/сополимера, задача управления структурой поверхностного слоя композитных частиц, образованных термодинамически несовместимыми полимерами, до конца не решена.

С целью понимания факторов, определяющих морфологию поверхностного слоя частиц «ядро – оболочка», было исследовано влияние различных способов их формирования с сохранением общего химического состава оболочки неизменным. Изучена эмульсионная полимеризация смеси метилметакрилата и бутилакрилата на затравочных ядрах на основе полистирола (или его сополимера) в различных режимах (затравочная или последовательная полимеризации). Анализ

кинетики изменения состава частиц «ядро – оболочка» проводили с применением метода инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье, методом гравиметрического анализа и динамического рассеяния света. Показано, что в процессе синтеза оболочек частиц более однородная граница между термодинамически несовместимыми полимерами, образующими ядро и оболочку, обеспечивается при использовании одного и того же сомономера как для синтеза ядра, так и для синтеза оболочки. Получение частиц с однородной или гольфоподобной структурой поверхностного слоя определяется в первую очередь термодинамическими факторами, тогда как количество и глубина вмятин – кинетическими параметрами, а именно направлением диффузии мономера в ядре (рис.).

Полученные результаты позволяют целенаправленно регулировать образование частиц с развитой удельной поверхностью с контролируемым количеством и глубиной вмятин или частиц с однородной поверхностью и минимальной полидисперсностью в зависимости от предполагаемого использования.



Изображения растровой электронной микроскопии частиц «ядро – оболочка» с гладкой (а) и гольфоподобной (б) структурой поверхностного слоя

Молекулярные щетки с полифлуореновой основной цепью и боковыми цепями полиметакриловой кислоты: люминесцентные свойства и самоорганизация в растворах

К. И. Каскевич¹, М. А. Симонова¹, М. М. Ромашева¹, М. Д. Зеленцов¹, А. В. Зиминов²,
С. М. Рамш², Л. С. Литвинова¹, С. А. Черевков³, А. П. Филиппов¹, А. В. Якиманский¹

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

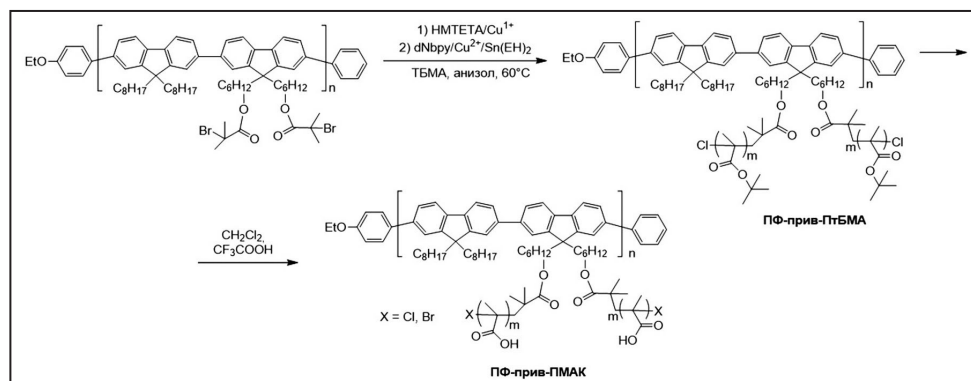
³ Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Методом радикальной полимеризации с переносом атома получена серия молекулярных щеток с полифлуореновой (ПФ) основной цепью и боковыми цепями полиметакриловой кислоты (ПМАК) различной длины. Структура и состав синтезированных соединений подтверждены методами ¹H-ЯМР- и ИК-спектроскопии. Проанализировано влияние длины основной цепи на спектральные и конформационные параметры макромолекул в растворах. Спектральными методами определена зависимость прививки боковых цепей от люминесцентных свойств полимерных растворов, в т. ч. квантовых выходов. Исследованы растворы комплексов ПФ–прив–ПМАК с модельным веществом куркумином. Изучены молекулярные щетки с фталоцианином цинка – потенциальные системы для фотодинамической и фототермической терапии.

Синтезирован ПФ-макроинициатор с высокой молекулярной массой ($M_n = 39,4 \cdot 10^3 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$), использованный для получения амфифильных молекулярных щеток. Для этого методом радикальной полимеризации с переносом атома

к ПФ-макроинициатору были привиты боковые цепи поли-трет-бутилметакрилата, а затем с помощью кислотного гидролиза получены амфифильные молекулярные щетки с боковыми цепями ПМАК (рис.). Образцы щеток различались длиной боковых цепей. Плотность прививки боковых цепей – около 90 %. Исследованы люминесцентные свойства растворов молекулярных щеток. Показано, что при прививке боковых цепей в растворах разрушаются агрегаты, что обуславливает рост квантового выхода по сравнению с макроинициатором.

Растворы комплексов ПФ–прив–ПМАК с модельным веществом куркумином были приготовлены двумя способами. В водных растворах комплексов образуются мономолекулярные мицеллы. Их размер не зависит от способа приготовления комплексов и содержания куркумина. С другой стороны, радиус мицеллы увеличивался с удлинением амфифильных боковых цепей. Показано, что мицеллы с фталоцианином цинка потенциально могут быть использованы в фотодинамической и фототермической терапии.



Синтез амфифильных молекулярных щеток ПФ – прив – ПМАК

Звездообразные термочувствительные поли-N-ацилпропиленимины с ядром триангламина

М. П. Курлыкин, Н. Д. Козина, Т. Ю. Кирилэ, А. В. Теньковцев

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

Предложенные Квитом гексааза[2₆]ортопара-циклофаны могут быть получены с высоким выходом и в препаративных количествах, в т. ч. в энантиомерно чистой форме путем восстановления соответствующих макроциклических оснований Шиффа, которые образуются при [3 + 3]-циклоконденсации ароматических диальдегидов с диаминами. Установлено, что эти соединения и их гидрированные производные (макроциклические полиамины – триангламин) образуют стабильные комплексы определенной стехиометрии с различными ароматическими соединениями, а их оптически активные комплексы с солями меди и цинка допускают стереоспецифические превращения, например альдольную конденсацию с энантиомерным выходом до 85 %.

Кроме того, было обнаружено, что триангламин образует кристаллические молекулярные комплексы различной стехиометрии с широким спектром ароматических соединений, что, вероятно, представляет интерес для биомедицинского применения. Существенным ограничением для использования такого макроцикла в биологических системах является его нерастворимость в воде. Эту трудность можно преодолеть, используя триангламин в качестве сердцевин звездыобразных полимеров, концы которых обеспечивают растворимость объекта, в то время как сердцевина обеспечивает комплексообразующую способность полимера.

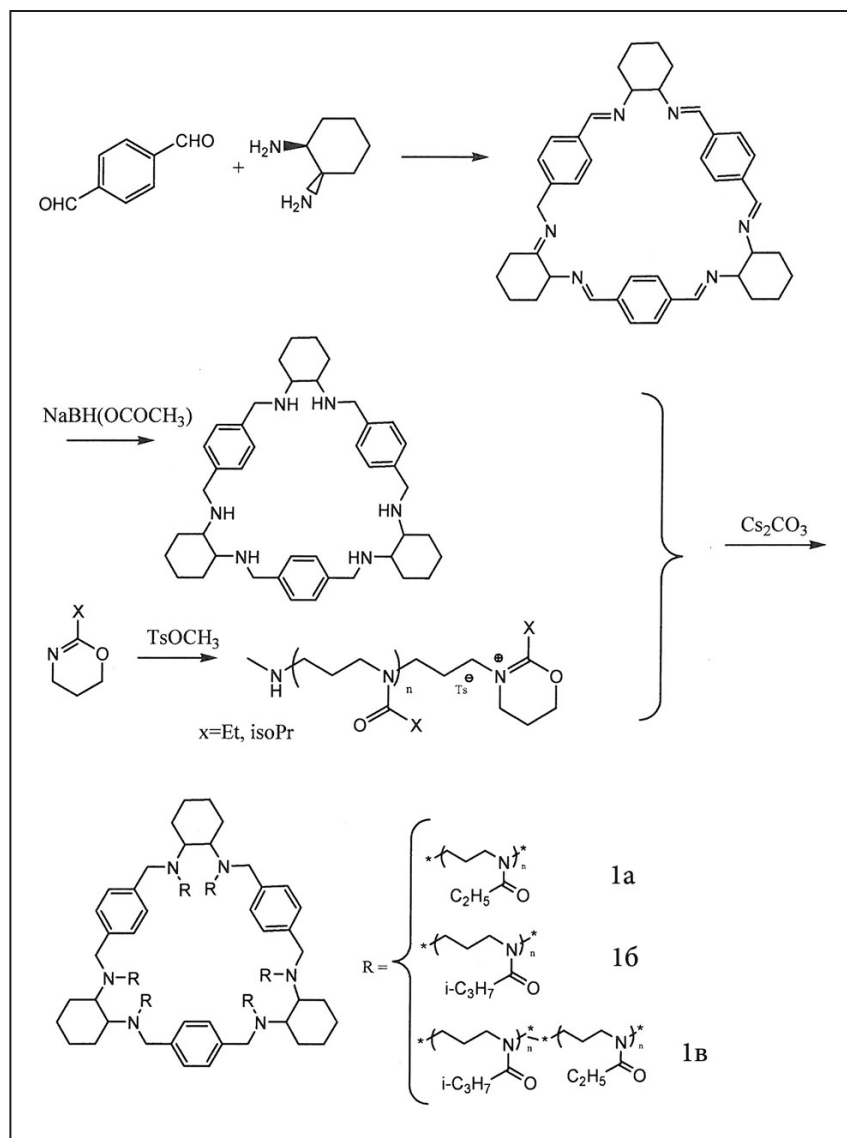
Одним из наиболее хорошо изученных классов термочувствительных псевдополипептоидов являются поли-2-алкил-2-оксазолины и поли-2-алкил-5,6-дигидро-4Н-оксазины. Они демонстрируют низкую критическую температуру растворимости в водных растворах, в то время как температура фазового перехода зависит от длины бокового радикала и может колебаться практически от 0 до 100 °С. Благодаря своей биосовместимости

и стабильности в биологических средах они широко используются в медицине и биотехнологии. В частности, комплексы линейных поли-2-алкил-2-оксазолинов с низкомолекулярными соединениями используются в качестве систем доставки лекарственных препаратов, ДНК, а также материалов для создания биосовместимых композитных структур.

По нашему мнению, термочувствительные звездообразные полимеры с треугольным аминовым ядром могут быть полезными наноконтейнерами для ионов европия и гадолиния и использоваться в качестве контрастных веществ для исследований с помощью магнитно-резонансной томографии, учитывая возможность концентрации контрастного вещества вблизи пораженного органа, температура которого часто выше температуры окружающих тканей. Такие полимеры также могут быть использованы для сольubilизации гидрофобных биологически активных веществ.

Для реализации этой идеи был синтезирован триангламин путем [3 + 3]-циклоконденсации терефталевого альдегида и транс-1,2-циклогександиамина с последующим восстановлением промежуточного основания Шиффа трис(ацетоксиборгидрид)ом натрия (рис.). Для получения звездообразных полимеров с треугольной сердцевинкой и термочувствительными поли-5,6-дигидро-4Н-оксазиновыми ветвями был использован метод «прививки». В этом случае синтезированные лучи взаимодействуют с ранее полученным ядром, содержащим функциональные группы, которые комплементарны концевым группам лучей.

Было обнаружено, что при проведении реакции с трехкратным избытком олиго-5,6-дигидро-4Н-оксазинов в присутствии карбоната цезия можно достичь степени функционализации 0,95–



Синтез гексааза[2₆]циклофана и звездообразных полимеров на его основе

0,97, если реакция протекает в термодинамически хороших растворителях, например в сульфолане. Данные гелепроникающей хроматографии показывают, что полученные образцы являются мономодальными, что в сочетании со спектральными данными подтверждает структуры 1а–в на рисунке.

Все синтезированные полимеры обладают термочувствительностью и имеют температуру помутнения в водных 0,5%-ных растворах: 65 °С для 1а, 25 °С для 1б и 42 °С для 1в. Анализ диаграмм Джоба показывает способность полученных полимеров к образованию комплексов в соотношении 1 : 1 между триангламином

и ионом европия (III), а также куркумином. Последний является перспективным лекарственным средством с плеiotропной противоопухолевой активностью, исключительно низкая растворимость которого в воде препятствует его медицинскому применению.

Полученные полимеры могут быть использованы в различных биомедицинских приложениях, например контрастные вещества – для ЯМР-томографии, системы доставки лекарственных средств и т. д.

Работа поддержана грантом РНФ № 23-13-00205.

Полимерные носители ионов ванадия на основе сополимеров N-винилпирролидона с винилиминами

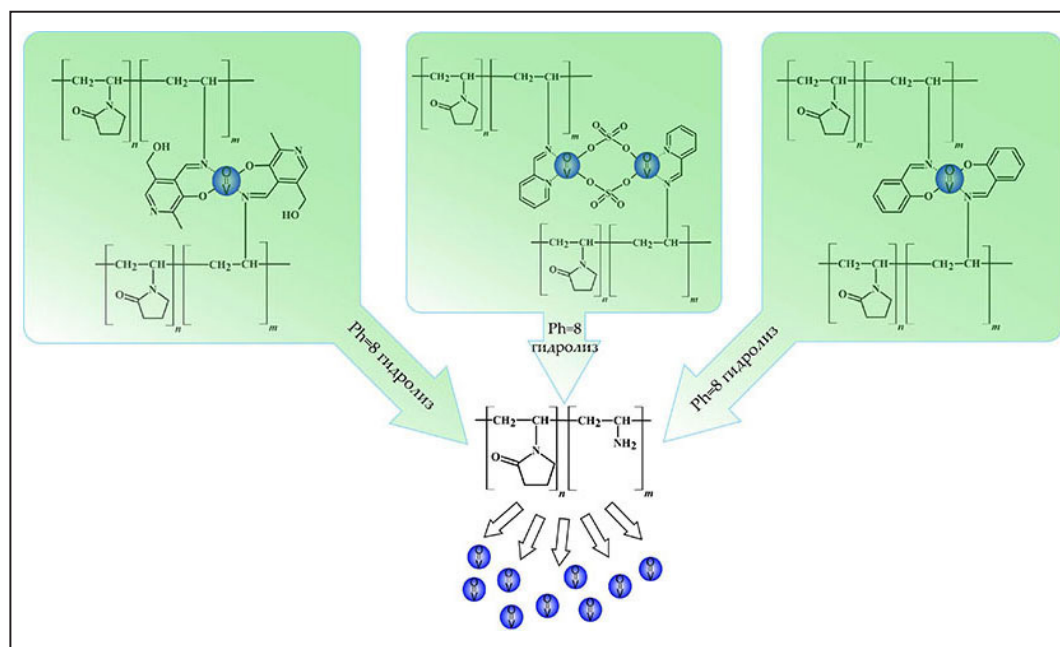
Е. Н. Дубров, М. А. Безрукова, А. И. Киппер, А. А. Селютин, А. Г. Иванов

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

В связи с широким распространением сахарного диабета существует острая необходимость разработки новых гипогликемических препаратов с большей эффективностью и меньшим количеством побочных эффектов по сравнению с уже существующими. С целью изучения противодиабетической активности полимерных производных ванадия разработана методика синтеза и синтезированы новые иминопроизводные сополимеров винилпирролидона и виниламина с варьируемыми значениями молекулярных масс и содержания иминных групп. Новые хелатирующие сополимеры: поли(N-винилпирролидон-со-винилсалицилиденимин), поли(N-винилпирролидон-со-винилпиколиниденимин) и поли(N-винилпирролидон-со-винилпиридоксилиденимин) с молекулярными массами

$(20\text{--}400) \cdot 10^3$ г/моль – и их комплексы с ванадием (IV) (рис. 1) предназначены для доставки и pH-зависимого высвобождения ионов ванадия в кишечной среде.

Хелатирующие полимеры были получены из поли(N-винилпирролидона-со-N-виниламин)а путем полимераналогичных превращений с соответствующими альдегидами. Содержание ванадия, определенное методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой и спектрофотометрии, составило 5,36, 4,99 и 9,1 % соответственно. Все комплексы продемонстрировали зависимое от pH высвобождение низкомолекулярных соединений ванадия, что делает их перспективными кандидатами для разработки ванадийсодержащих систем для перорального применения.



Металлополимерные иминокомплексы ванадия

Метод синтеза композитов на основе полиизопрена с повышенной прочностью

В. В. Зуев¹, А. В. Калинин², Е. С. Новикова², Л. В. Агибалова², Н. Н. Сапрыкина¹

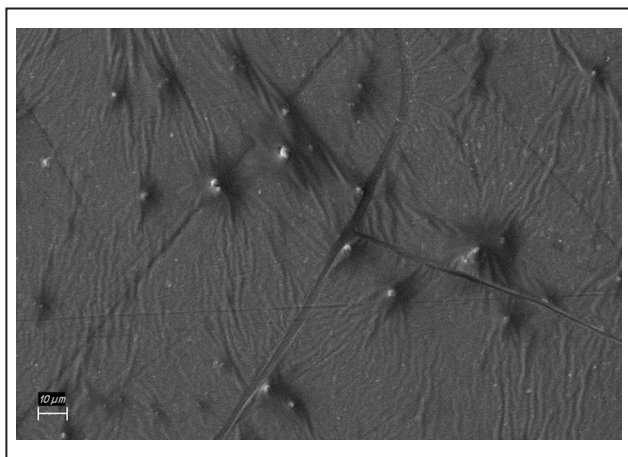
¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. акад. С. В. Лебедева

Проведена гетерогенная полимеризация изопрена с использованием в качестве катализатора неодеканоата неодима, нанесенного на промышленные детонационные наноалмазы (НА) размером 4–5 нм, покрытые полисилоксановой оболочкой. Показано, что в результате гетерогенной полимеризации получается полиизопрен с молекулярной массой, в полтора раза большей, чем при гомогенной полимеризации с использованием того же катализатора с сохранением 97 % доли цис-1,4-звеньев (рис.). Этот эффект обусловлен повышением активности катализатора

в результате его комплексообразования со звеньями Si–O–Si на поверхности НА. Полимерная оболочка на поверхности НА имеет преимущество перед единичными силоксановыми звеньями, образующимися на поверхности НА при использовании производных этоксисилана, т. к. стимулирует активность катализатора Циглера – Натта при полимеризации диенов.

Предложенный метод позволяет синтезировать наполненные НА композиты полиизопрена с повышенной до 500 % прочностью на разрыв.



СЭМ-изображение распределения модифицированных наноалмазов в полиизопреновой матрице (содержание – 0,5 масс. %)

Полиэлектролитные щетки с белковоподобными нанокolloидами

Е. Б. Жулина¹, О. В. Борисов¹, Т. О. Попова²

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

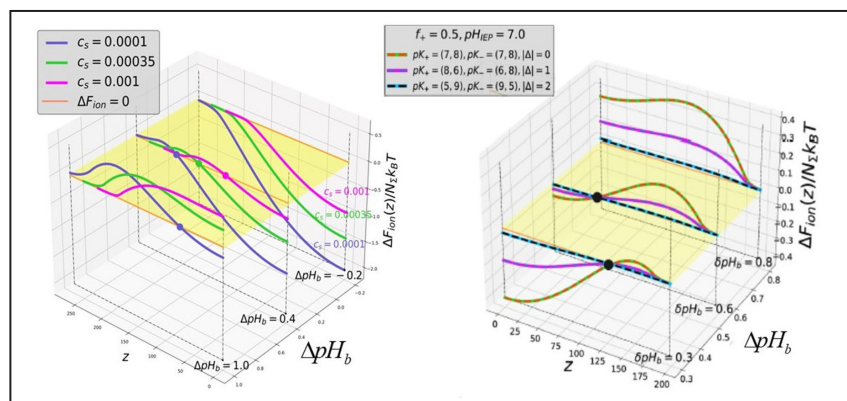
Теоретическое изучение взаимодействия полиэлектролитных щеток с моделями глобулярных белков может дать важные сведения о распознавании клеток и биоадгезии, селективном молекулярном транспорте через биологические мембраны и других процессах, происходящих в живой природе.

В рамках среднеполевого приближения Пуассона – Больцмана была разработана теория взаимодействия амфолитных нанокolloидных частиц (НЧ), имитирующих глобулярные белки, с полиэлектролитными щетками. Была предложена схема расчета позиционно зависимой свободной энергии НЧ в щетке, которая включает, наряду с энергией кулоновского взаимодействия и работой против силы осмотического давления, свободную энергию ионизации слабых катионных и анионных групп на поверхности НЧ. Электростатические взаимодействия между НЧ и щеткой контролируются набором параметров: условиями окружающей среды, архитектурой щетки, а также составом катионных и анионных групп на поверхности НЧ и их константами ионизации.

Разработанная теория раскрывает в рамках среднеполевого приближения механизм взаимо-

действия НЧ с полиэлектролитной щеткой и объясняет наблюдаемое в эксперименте уменьшение абсорбции НЧ щеткой при увеличении концентрации соли или/и отклонения pH от изоэлектрической точки (рис.). Также показано, что чем больше разница между значениями pK для катионных и анионных групп на поверхности частицы, тем слабее термодинамическая движущая сила абсорбции. Теория привела к двум нетривиальным предсказаниям: 1) существование метастабильных состояний НЧ с инвертированным зарядом внутри щетки, означающее, что инверсия знака заряда является необходимым, но не достаточным условием для поглощения наночастиц одноименно заряженной полиэлектролитной щеткой; 2) кинетический, а не термодинамический контроль абсорбции НЧ одноименно заряженной щеткой из-за барьера свободной энергии на периферии щетки. Эти теоретические результаты можно использовать для количественного прогнозирования характера взаимодействия полиэлектролитных щеток с глобулярными белками и нанокolloидами.

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-13-00174.



Профили позиционно зависимой свободной энергии нанокolloидных частиц в полиэлектролитной (полианионной) щетке при различных значениях $\Delta pH_b = pH_b - pI$ отклонения pH буфера от изоэлектрической точки и различных концентрациях соли (левая панель) и различных значениях $\Delta = pK_+ - pK_-$ констант ионизации катионных и анионных групп (правая панель)



Химия неорганических материалов и гибридных органо-неорганических систем

- 118** Новые люминофоры $(Y_{1-x}Eu_x)_2(SO_4)_3$ с термическим антитухением люминесценции вследствие огромного отрицательного теплового расширения
- 119** Плотность и структура стабилизированного натриевообратного стекла при температурах ниже температуры стеклования
- 120** Химически стойкие природоподобные керамические матрицы на основе циркона
- 121** Пионерские исследования в области синтеза, структуры и свойств соединений гиперкоординированного германия
- 122** Универсальный алюмосиликатный сорбент для извлечения белков и токсинов различной молекулярной массы
- 124** Комплекс исследований синхронных генераторов новой конструкции с поперечным магнитным потоком
- 125** Фотолюминофоры на основе пористых стекол, соактивированных Cu^{2+} и Y^{3+} : синтез и спектральные свойства
- 126** Реакционно-диффузионный синтез материалов с регулярной периодической микроструктурой
- 127** Испарение оксикарбидной керамики на основе МАХ-фаз, содержащих гафний

Новые люминофоры $(Y_{1-x}Eu_x)_2(SO_4)_3$ с термическим антитушением люминесценции вследствие огромного отрицательного теплового расширения

А. П. Шаблинский¹, О. Ю. Шорец¹, А. В. Поволоцкий², Р. С. Бубнова¹, М. Г. Кржижановская²,
С. Ю. Янсон², В. Л. Уголков¹, С. К. Филатов²

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

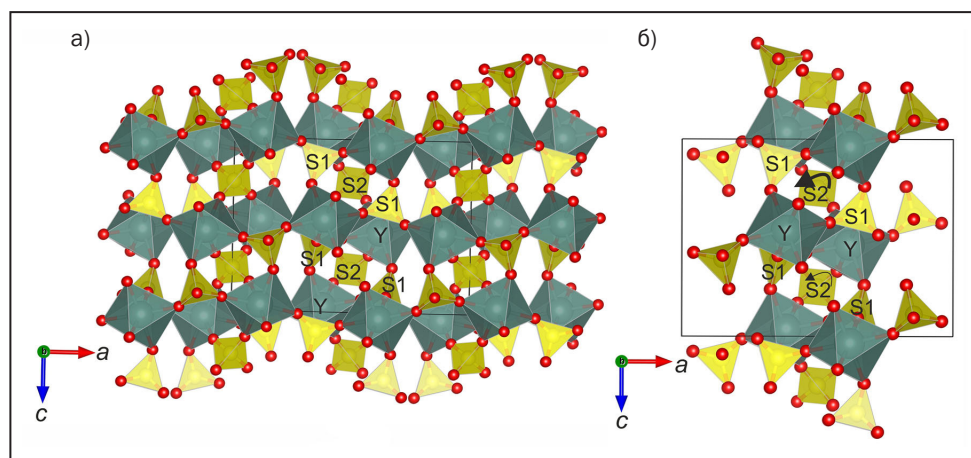
² Санкт-Петербургский государственный университет

Новые перспективные красноизлучающие люминофоры $(Y_{1-x}Eu_x)_2(SO_4)_3$ ($x = 0; 0,17; 0,33; 0,5; 0,66$) демонстрируют термическое антитушение люминесценции вследствие отрицательного объемного теплового расширения; они были получены путем кристаллизации из водных растворов. Кристаллическая структура $Y_2(SO_4)_3$ может быть описана как гетерополиэдрический каркас, состоящий из тетраэдров SO_4 и октаэдров YO_6 , полимеризованных через общие вершины (рис.). Кристаллическая структура твердого раствора $x = 0,5$ уточнена при 400 и 500 °С до $R_B = 1,70$ и 1,94 % соответственно. Небольшие развороты тетраэдров SO_4 приводят к отрицательному объемному тепловому расширению.

Термическое расширение всех образцов получено по данным порошковой терморентгенографии: выявлено, что структура сжимается

по всем направлениям ($\alpha_a = -7(3)$; $\alpha_b = -15(3)$; $\alpha_c = -22(2)$; $\alpha_v = -44(2) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ при 500 °С для $YEu(SO_4)_3$). Объемное термическое расширение образцов $x = 0; 0,17$ и 0,50 относится к огромному отрицательному тепловому расширению.

Интенсивность фотолюминесценции значительно увеличивается (в 1,8 раза) с температурой до 500 °С. Антитермическое тушение люминесценции Eu^{3+} можно объяснить термически усиленным переносом энергии между ионами Eu^{3+} , которому способствует отрицательное термическое расширение твердых растворов $(Y_{1-x}Eu_x)_2(SO_4)_3$ во всех неэквивалентных кристаллографических направлениях. Люминофоры $(Y_{1-x}Eu_x)_2(SO_4)_3$ могут быть пригодны для разработки оптических датчиков температуры.



Кристаллическая структура $Y_2(SO_4)_3$ в проекции ac (а); часть структуры $Y_2(SO_4)_3$ (б). Стрелки показывают повороты тетраэдров при повышении температуры

1. Shablinskii A.P., Shorets O.Yu., Povolotskiy A.V. et al. // Crystals. 2024. V. 14. P. 1074.
2. Шорец О. Ю., Бубнова Р. С., Кржижановская М. Г. // Тез. докл. XX Междунар. совещ. по кристаллохимии, рентгенографии и спектроскопии минералов и VI Междунар. совещ. по органич. минералогии. СПб.: ООО «Скифия-принт», 2024. С. 183–184.
3. Шаблинский А. П., Шорец О. Ю., Поволоцкий А. В. и др. // Сб. тез. Всеросс. конф. для молодых ученых, посвященной 75-летию кафедры кристаллографии и кристаллохимии геологического факультета МГУ «Минералы и минералоподобные соединения: кристаллохимия и перспективы применения». Москва, 2024. С. 50.

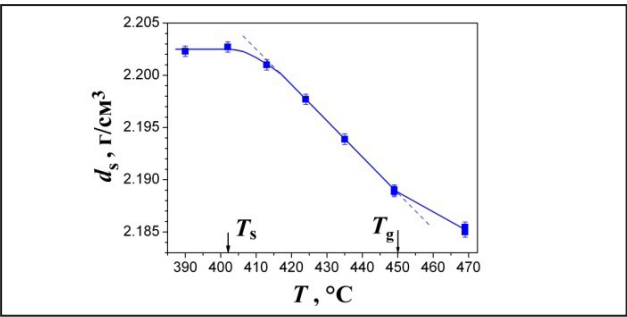
Плотность и структура стабилизированного натриевоборатного стекла при температурах ниже температуры стеклования

Н. С. Юрицын, Н. М. Ведищева
Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

Впервые установлена взаимосвязь между плотностью и структурой стекла $20\text{Na}_2\text{O}\cdot 80\text{B}_2\text{O}_3$ (мол. %), стабилизированного ниже температуры стеклования T_g ($450\text{ }^\circ\text{C}$). Обнаружено, что при уменьшении температуры стабилизации от $450\text{ }^\circ\text{C}$ плотность стекла росла и достигла постоянного значения при $402\text{ }^\circ\text{C}$ (рис.). Расчет химического строения стекла проведен в интервале $1200\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$. Стекло рассматривается как раствор, компонентами которого являются продукты взаимодействия оксидов, – химические группировки. Предполагается, что стехиометрически и структурно они подобны кристаллическим соединениям, существующим в системе $\text{Na}_2\text{O}\text{--}\text{B}_2\text{O}_3$. Формализм этой модели позволяет определить равновесные концентрации различных группировок, присутствующих в стекле, которые определяют его химическое строение.

В таблице показано химическое строение стекла $20\text{Na}_2\text{O}\cdot 80\text{B}_2\text{O}_3$ (мол. %), рассчитанное при $1200\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$. С понижением температуры содержание доминирующей химической группировки $\text{Na}_2\text{O}\cdot 4\text{B}_2\text{O}_3$ увеличивается до 93 % за счет группировок $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$ и B_2O_3 , доли которых становятся минимальными при $402\text{ }^\circ\text{C}$.

Поскольку химическая группировка $\text{Na}_2\text{O}\cdot 4\text{B}_2\text{O}_3$ вносит в стекла тетраборатную надструктурную единицу, характерную для соответствующего кристаллического соединения, можно предположить, что при температуре $402\text{ }^\circ\text{C}$ структура стекла становится максимально похожей на структуру соответствующего кристалла $\text{Na}_2\text{O}\cdot 4\text{B}_2\text{O}_3$. Это предположение подтверждается тем, что при $402\text{ }^\circ\text{C}$ плотность стабилизированного стекла достигает наибольшего значения.



Плотность d_s стабилизированного стекла $20\text{Na}_2\text{O}\cdot 80\text{B}_2\text{O}_3$ (мол. %) как функция температуры стабилизации. Плотность определялась после охлаждения образца стекла до комнатной температуры. Плотность ниже T_g сначала увеличивается с понижением температуры, а затем достигает постоянного значения при T_s .

Таблица. Химическое строение состава $20\text{Na}_2\text{O}\cdot 80\text{B}_2\text{O}_3$ (мол. %) как (мета)стабильного расплава и стекла после его стабилизации при T_g и ниже

Химические группировки	Мольные доли химических группировок в составе $20\text{Na}_2\text{O}\cdot 80\text{B}_2\text{O}_3$ (мол. %) при различных температурах				
	Расплав $1200\text{ }^\circ\text{C}$	Метастабильный расплав		Стабилизированное стекло	
		$800\text{ }^\circ\text{C}$	$600\text{ }^\circ\text{C}$	$450\text{ }^\circ\text{C} (T_g)$	$402\text{ }^\circ\text{C} (T_s)$
$\text{Na}_2\text{O}\cdot 4\text{B}_2\text{O}_3$	0,35	0,68	0,81	0,90	0,93
$\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$	0,17	0,13	0,09	0,07	0,06
$\text{Na}_2\text{O}\cdot \text{B}_2\text{O}_3$	0,04	0,01	0	0	0
B_2O_3	0,44	0,18	0,10	0,03	0,01

1. Yuritsyn N.S., Vedishcheva N.M. // Phys. Chem. Glasses – Eur. J. Glass Sci. Technol. Part B. 2024. V. 65. Iss. 5. P. 129–138.
2. Vedishcheva N.M., Yuritsyn N.S. // Book of Abstr. XXIV Int. Conf. on Chemical Thermodynamics in Russia (RCCT-2024). 2024. P. 302.

Химически стойкие природоподобные керамические матрицы на основе циркона

В. Л. Уголков¹, А. В. Осипов¹, Л. П. Мезенцева¹, Л. А. Коптелова¹, Ю. С. Кудряшова¹,
Р. Ш. Абиев¹, А. А. Акатов²

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

По специально разработанным методикам (обратное осаждение с применением магнитных мешалок и микрореакторный синтез с использованием двухступенчатого аппарата с интенсивно закрученными потоками реагентов) синтезированы порошки-прекурсоры $(1-x)(\text{H}_2\text{SiO}_3-\text{ZrO}(\text{OH})_2)-x\text{ZrO}(\text{OH})_2$ и $(1-x)(\text{H}_2\text{SiO}_3-\text{ZrO}(\text{OH})_2)-x\text{Hf}(\text{OH})_4$, где $x = 0,0; 0,5; 0,7; 0,8$ и $1,0$. Изучены их физико-химические свойства и термическое поведение до 1500°C . Показана высокая дисперсность полученных порошков (до 5 нм). Спеканием в интервале температур $1000-1300^\circ\text{C}$ на воздухе получены керамические образцы $(1-x)\text{ZrSiO}_4-x\text{ZrO}_2$ и $(1-x)\text{ZrSiO}_4-x\text{HfO}_2$.

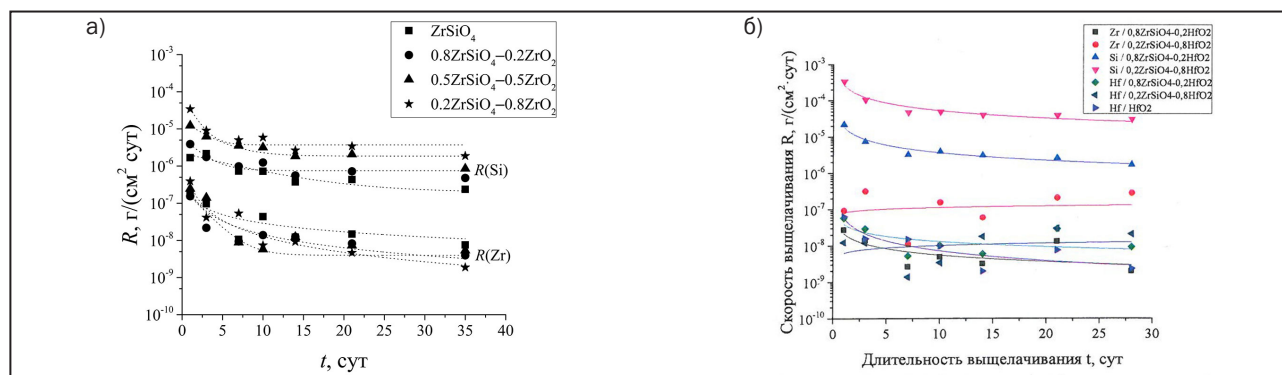
Показано, что в системе $\text{ZrSiO}_4-\text{ZrO}_2$ оксид циркония улучшает термическую стабильность циркона в композитах при его содержании от 70 мол. %. В отличие от композитов $(1-x)\text{ZrSiO}_4-x\text{ZrO}_2$, которые при 1300°C представляют собой смесь ZrSiO_4 , моноклинного ZrO_2 и гексагонального SiO_2 (кварца), композиты $(1-x)\text{ZrSiO}_4-x\text{HfO}_2$ состоят из моноклинных твердых растворов

$\text{Hf}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$ и SiO_2 . При этом добавление HfO_2 к циркону благоприятствует образованию твердых растворов $\text{Hf}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$ и их кристаллизации уже при 1000°C . Таким образом, системы $\text{ZrSiO}_4-\text{ZrO}_2$ и $\text{ZrSiO}_4-\text{HfO}_2$ не являются аналогами при температурах выше 1000°C .

Были получены концентрационно-температурные зависимости микротвердости по Виккерсу (до 29 ГПа) и теплопроводности ($2,3-1,9$ Вт/м·К). Отметим, что полученные концентрационные зависимости позволяют выбрать композицию с необходимой величиной теплопроводности.

Опыты по выщелачиванию в дистиллированной воде показали довольно высокую химическую стойкость образцов (матриц) систем $\text{ZrSiO}_4-\text{ZrO}_2$ и $\text{ZrSiO}_4-\text{HfO}_2$ (рис.). Отмечены более низкие значения скорости выщелачивания циркония из исследованных керамических матриц к концу эксперимента – на уровне примерно 10^{-8} г/(см²·сут) – по сравнению с ионами кремния.

Все представленные результаты получены впервые.



Зависимости скорости выщелачивания R от времени t ионов Zr , Si и Hf из керамических образцов после спекания 1300°C 24 ч: а – $(1-x)\text{ZrSiO}_4-x\text{ZrO}_2$; б – $(1-x)\text{ZrSiO}_4-x\text{HfO}_2$ (номинальные композиции $0,8\text{ZrSiO}_4-0,2\text{HfO}_2$ и $0,2\text{ZrSiO}_4-0,8\text{HfO}_2$) и HfO_2

Пионерские исследования в области синтеза, структуры и свойств соединений гиперкоординированного германия

Д. В. Лёзов, А. А. Золотарёв, Т. А. Кочина

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

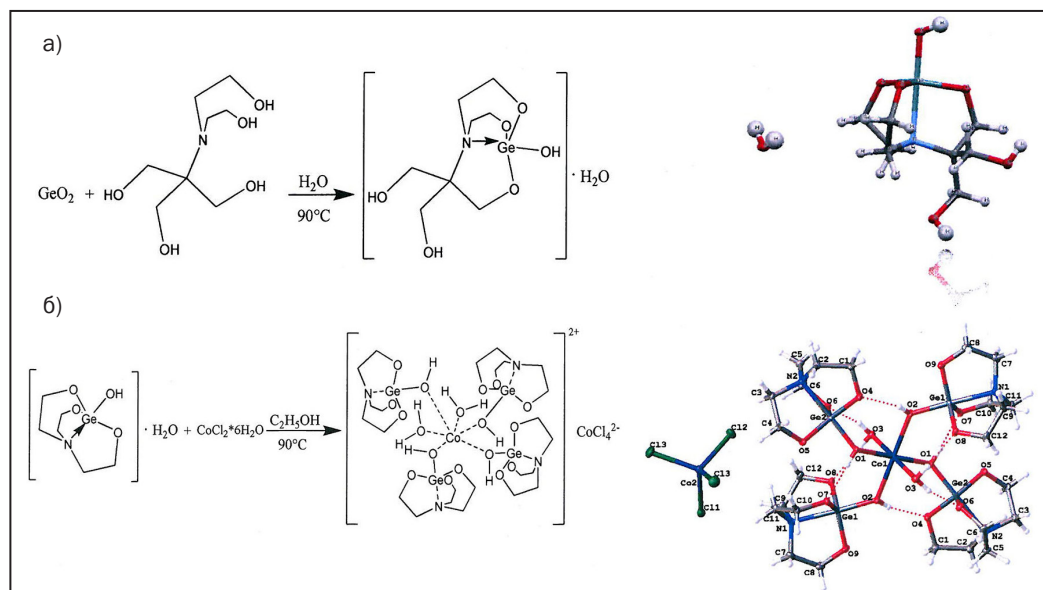
Открытие в 1960-х гг. специфической биологической активности германийорганических соединений инициировало широкие исследования в этой области. Наиболее перспективными из них являются соединения гипервалентного германия – герматраны (внутрикомплексные трициклические германиевые эфиры триэтаноламина) с общей формулой $X\text{Ge}(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{N}$ и имеющие донорно-акцепторную связь $\text{N} \rightarrow \text{Ge}$. В ряду герматранов 1-герматранол является наиболее широко изученным соединением, обладающим разнообразным спектром биологической активности. Его синтез основан на одностадийной реакции трис(2-гидроксиэтил)амин с диоксидом германия в водной среде без использования органических растворителей.

В настоящей работе с использованием данного подхода были синтезированы новые потенциально биологически активные аналоги герматранола. Для синтеза новых соединений были выбраны следующие прекурсоры: трис(гидро-

ксиметил)аминометан (TRIS), бис(2-гидроксиэтил)аминотрис(гидроксиэтил)метан (BIS-TRIS), *N*-бензилэтаноламин (BEA), *N*-(2-гидроксиэтил)этилендиамин (HEED), *N,N,N'*-тетракис-(2-гидроксиэтил)этилендиамин (THEED), *N,N,N'*-тетракис(2-гидроксипропил)этилендиамин (THPED), бис(2-гидроксиэтил)глицин (BICINE), *N*-(трис(гидроксиэтил)метил)глицин (TRICINE), *NN*-бис(2-гидроксиэтил)-2-аминоэтансульфоновая кислота (BES).

Синтезированы и изучены методом рентгеноструктурного анализа монокристаллы ранее неизвестных потенциально биологически активных герматранов: комплекс GeO_2 с BIS-TRIS (рис. а) и комплекс 1-герматранола с $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (рис. б).

Особый интерес вызывает структура комплекса 1-герматранола с $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, содержащая четыре молекулы 1-герматранола, которые выступают в роли лигандов, координирующих атом кобальта и формирующих каркасную структуру.



Комплексы:
а – GeO_2 с BIS-TRIS;
б – 1-герматранола
с $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Универсальный алюмосиликатный сорбент для извлечения белков и токсинов различной молекулярной массы

О. Ю. Голубева, Ю. А. Аликина, Е. Ю. Бразовская

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

Сотрудниками лаборатории химии силикатных сорбентов Филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС проведены исследования новых медицинских алюмосиликатных сорбентов на основе синтетических монтмориллонитов с губчатой структурой.

Монтмориллониты были синтезированы в условиях направленного гидротермального синтеза с использованием природоподобных технологий. В результате получены соединения, обладающие заданным комплексом свойств: определенным фазовым и химическим составом, пористо-текстурными характеристиками, размерами частиц, морфологией и биологической активностью.

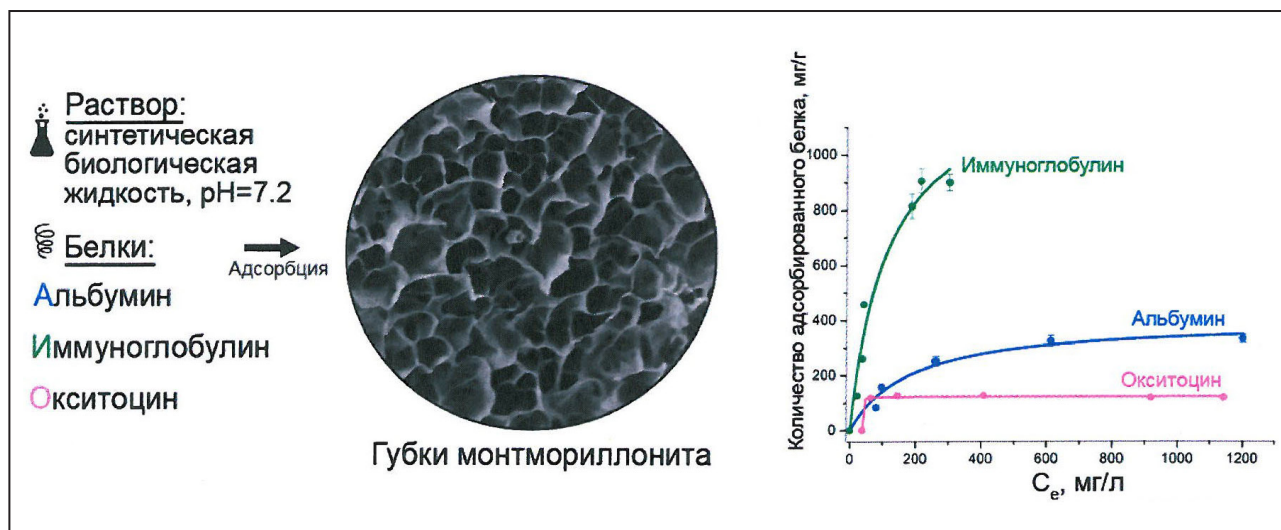
Исследование было направлено на решение проблемы разработки селективных сорбентов для избирательной адсорбции токсичных веществ белкового происхождения, накапливающихся в организме при онкологических, иммунных, инфекционных и других заболеваниях, в частности при сепсисе (рис.).

Сепсис является одной из лидирующих причин смертности в медицинских учреждениях: 30–60 % случаев заболевания заканчиваются смертельным исходом. На настоящий момент ни один из представленных на рынке гемосорбентов не отвечает полностью всем требованиям, предъявляемым к таким материалам, а именно: сорбент должен обладать высокой сорбционной емкостью по отношению к токсинам и метаболитам, гемосовместимостью, селективностью и выдерживать определенные методы стерилизации без потери основных свойств, обладать относительно низкой стоимостью.

В лаборатории химии силикатных сорбентов были разработаны подходы к получению целой линейки пористых алюмосиликатов с различной морфологией – каркасных алюмосиликатов

(цеолитов различных структур), слоистых силикатов различного химического состава, а также алюмосиликатов со сферической, нанотрубчатой и наногубчатой морфологиями. Проведенные исследования сорбционной способности полученных образцов по отношению к органическим красителям, ионам тяжелых металлов и ряду лекарственных препаратов показали значительный потенциал синтетических алюмосиликатов для их использования в качестве гемосорбентов, в т. ч. селективных.

С целью разработки новых эффективных медицинских сорбентов изучена сорбционная способность синтетического монтмориллонита различного состава по отношению к модельным белковым молекулам: окситоцину, альбумину и иммуноглобулину в синтетической биологической жидкости (рН = 7,2). Белки и пептиды различной молекулярной массы и степени ионогенности выступали в качестве моделей токсичных веществ различной природы. Установлено, что сорбционная емкость синтетического монтмориллонита по отношению к белкам может быть в 2–4 раза выше, чем у природных глин, достигая 180, 315 и 900 мг/г по окситоцину, альбумину и иммуноглобулину соответственно. Обнаружено существование конкурентной адсорбции между белками и компонентами плазмы крови. Установлена зависимость адсорбционной способности образцов по отношению к белкам различной молекулярной массы от химического состава монтмориллонита и степени изоморфного замещения магния алюминием в октаэдрических слоях. Показана возможность разработки сорбентов и хроматографических систем для экстракции белков из сложных смесей на основе синтетических комбинированных монтмориллонитов. Установлено, что синтетические



Схематическое изображение основных результатов работы: (слева направо) приведены условия проведения экспериментов, наногубчатая структура монтмори́ллонитового сорбента и изотермы адсорбции модельных белковых молекул

монтмори́ллониты не обладают токсичностью, в частности гемолитической активностью (способностью разрушать клетки крови) и цитотоксичностью.

Разработка может быть использована для решения широкого круга задач медицины и анали-

тической химии, например для создания хроматографических систем для экстракции белков из сложных смесей, энтеросорбентов, раневых и ожоговых покрытий, в перспективе – отечественных гемосорбентов.

Комплекс исследований синхронных генераторов новой конструкции с поперечным магнитным потоком

В. Н. Антипов, А. Д. Грозов, А. В. Иванова

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

В качестве перспективной исследована новая патентно-защищенная конструкция электрических машин с поперечным магнитным потоком с односторонним расположением статоров (патент РФ № 2818077), в которой достигаются уменьшение осевого габаритного размера практически вдвое, а также экономия активных материалов. По плотности вращающего момента эта конструкция превосходит показатели машины с продольным потоком в 1,23–1,7 раза.

Численными методами выполнено исследование параметров синхронного ветрогенератора 800 кВт, 690 В, 150 мин⁻¹ с поперечным магнитным потоком, предназначенного для арктического региона. Базовый вариант генератора выбран при широком изменении входных переменных. Для оптимизации использована методология поверхности отклика. Выполнен поиск оптимального соотношения трех геометрических размеров (длины магнита, высоты магнита и длины сердечника статора) для получения наибольшего значения коэффициента полезного действия, минимального значения массы обмотки и магнитопровода. В результате возможно повышение КПД с начального значения 92,7 % до наибольшего 94,4 % либо снижение массы материалов на 7–9 %.

Для синхронного генератора с поперечным потоком и охлаждением путем конвекции и теплоизлучения (способ охлаждения IC041) разработана методика теплового расчета, подтвержденная трехмерным моделированием теплового поля (рис. 1). Предложена и исследована новая

система жидкостного охлаждения (рис. 2) крупного синхронного генератора с поперечным потоком и получен патент РФ № 2834343.

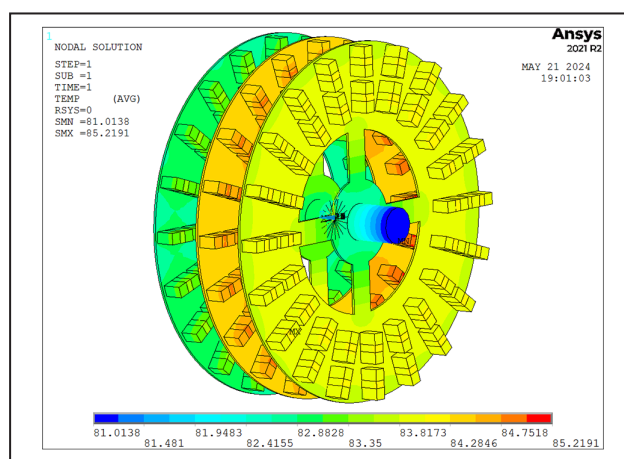


Рис. 1. Распределение теплового поля в трехмерной модели ротора трехфазного генератора

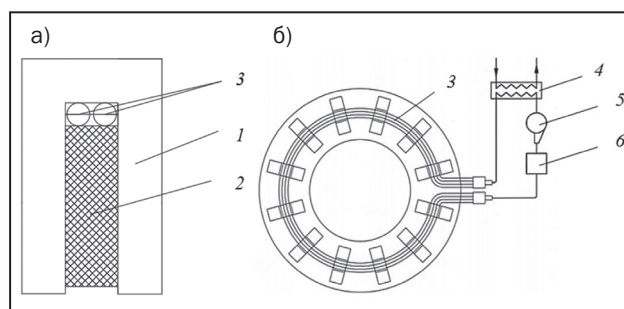


Рис. 2. Размещение охлаждающих каналов в необмотанном статоре на дне пазов кольцевой обмотки (а) и по ее периметру (б): 1 – обмотка; 2 – зубец статора; 3 – охлаждающие каналы; 4 – теплообменник; 5 – фильтр; 6 – насос

1. Антипов В. Н., Грозов А. Д., Иванова А. В. // Электричество. 2024. № 3. С. 59–67.
2. Антипов В. Н., Грозов А. Д., Иванова А. В. // Вестник КазГЭУ. 2024. № 2. С. 84–93.
3. Антипов В. Н., Грозов А. Д., Иванова А. В. // Электричество. 2024. № 10. С. 76–83.
4. Антипов В. Н., Грозов А. Д., Иванова А. В. // Сб. матер. XXII Междунар. научно-практич. конф. «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (МНПК-2024). Орел, 2024. С. 44–50.

Фотолюминофоры на основе пористых стекол, соактивированных Cu^{2+} и Y^{3+} : синтез и спектральные свойства

М. А. Гирсова, Г. Ф. Головина, И. Н. Анфимова, Л. Н. Куриленко, Т. В. Антропова

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

Разработана методика, и на основе матриц из высококремнеземных нанопористых стекол (НПС), соактивированных ионами Cu^{2+} и Y^{3+} , синтезированы новые композиционные материалы (КМ) – твердотельные фотолюминофоры (ФЛ) в форме пластин толщиной $\leq 1,5$ мм (рис. 1). Актуальность и практическая значимость работы обусловлены тем, что синтезированные КМ обладают люминесценцией в широком UV–VIS–NIR-спектральном диапазоне (рис. 2) в зависимости от состава, тепловой предыстории и длины волны возбуждения (200–900 нм).

В связи с этим новые ФЛ перспективны для фотонных применений (фотокатализаторы, свето-

диоды, полупроводниковые диоды ($p\text{-YCuO}/n\text{-Si}$), солнечные элементы, оптоэлектронные устройства и др.). Оптимизации функциональных свойств полученных ФЛ способствуют наличие термостабильной НПС-матрицы и формирование люминесцентной компоненты в условиях ограниченной геометрии. Установлено, что с увеличением концентрации иттрия в синтезированных композитах, термообработанных при 870 °С, интенсивность ультрафиолетовой и инфракрасной фотолюминесценции увеличивается.

Работа выполнена в рамках госзадания (госрегистрация № 1021050501068-5-1.4.3 и 1023032900385-8-1.4.3 (тематика 3)).

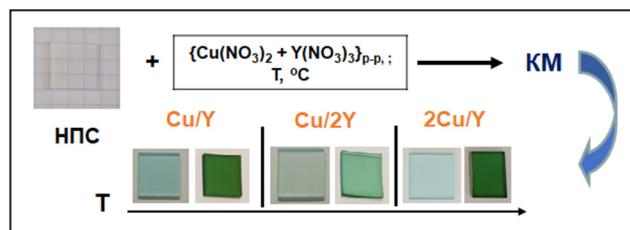


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая методику получения разработанных композиционных материалов и внешний вид образцов в зависимости от их состава и температуры тепловой обработки в интервале 50–870 °С

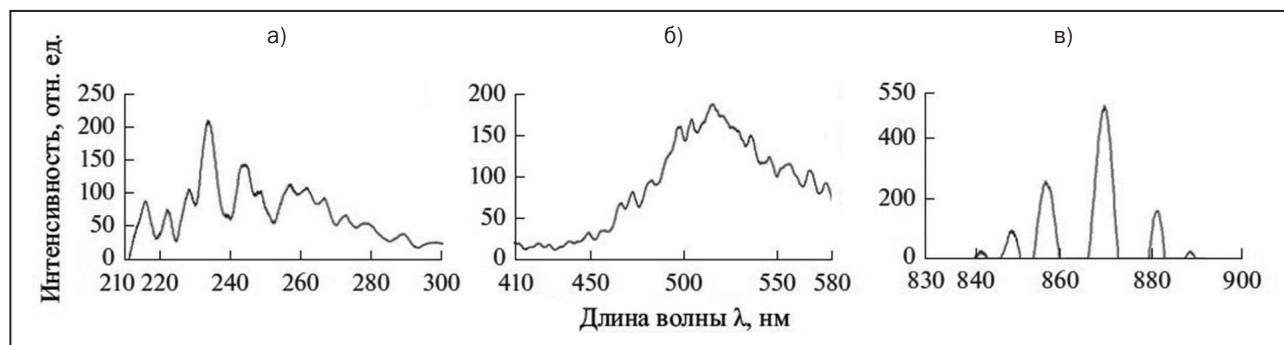


Рис. 2. Типичные спектры люминесценции синтезированных композиционных материалов в зависимости от их состава: а – Cu/Y ; б – 2Cu/Y ; в – $\text{Cu}/2\text{Y}$ (на примере $\lambda_{\text{возб}} = 200$ нм, композиционный материал Cu/Y , термообработка при 870 °С)

1. Girsova M.A., Golovina G.F., Anfimova I.N. et al. // Glass Phys. Chem. 2024. V. 50. No. 4. P. 347–362.
2. Гирсова М. А., Головина Г. Ф., Куриленко Л. Н. и др. // Тез. Всеросс. конф. с междунар. уч. «VIII Российский день редких земель». Нижний Новгород: ННГУ – ИМХ РАН, 2024. С. P93.
3. Гирсова М. А., Головина Г. Ф., Куриленко Л. Н. и др. // Сб. тез. докл. III Междунар. симп. «Химия для биологии, медицины, экологии и сельского хозяйства». СПб.: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2024. С. 48–49.

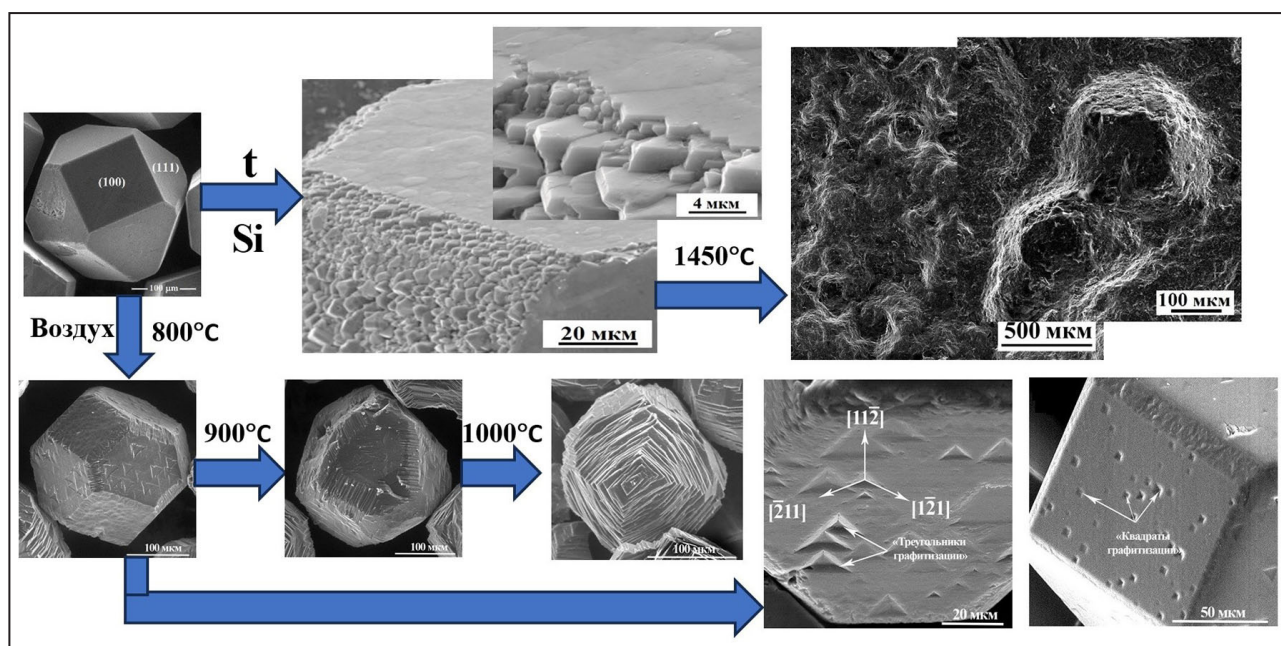
Реакционно-диффузионный синтез материалов с регулярной периодической микроструктурой

В. Я. Шевченко, С. Н. Перевислов

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

Показано, что в неорганических системах взаимодействия гетерогенетических химических компонентов (например, углерод (алмаз) и карбид кремния) могут идти при определенных условиях в соответствии с реакционно-диффузионным механизмом Тьюринга, что позволяет получать материалы с регулярной трижды периодической структурой. Разработан уникальный материал – новая композиционная керамика «алмаз – карбид кремния», названная «Идеал»,

ненамного уступающая монокристаллическому алмазу и значительно превышающая по механическим характеристикам стандартные броневые материалы на основе корунда, карбида кремния и карбида бора. Керамика «Идеал» не имеет аналогов в мире. Изучена графитизация алмазных частиц на воздухе и в вакууме до высоких температур, что позволяет регулировать реакционно-диффузионный процесс при пропитке жидким кремнием заготовки из алмазных частиц (рис.).



Графитизация алмазных частиц и рост частиц карбида кремния в результате синтеза по реакционно-диффузионному механизму Тьюринга на поверхности алмазной частицы

Испарение оксикарбидной керамики на основе МАХ-фаз, содержащих гафний

В. Л. Столярова¹, В. А. Ворожцов¹, С. И. Лопатин¹, А. Л. Шилов¹, И. Е. Арлашкин²

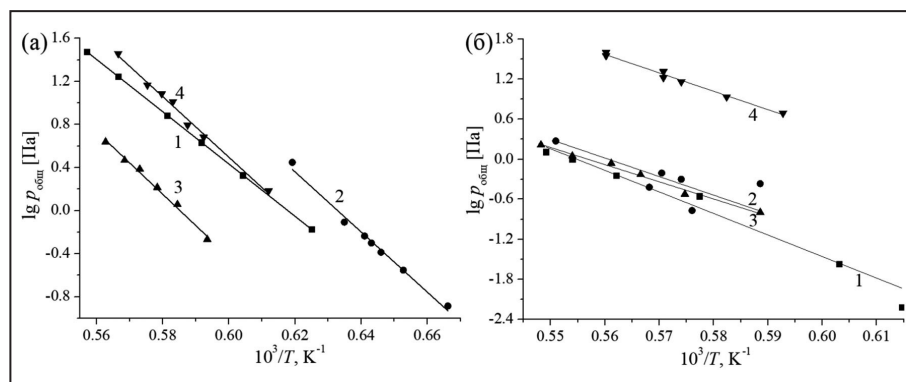
¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Впервые масс-спектрометрическим эффузионным методом Кнудсена изучены процессы испарения карбидных материалов состава Ti_2AlC , Ti_3AlC_2 , Zr_2AlC , Zr_3AlC_2 , Ti_2SiC и Ti_3SiC_2 , содержащих МАХ-фазы, а также соответствующих оксикарбидных систем с добавлением HfO_2 до температуры 2 200 К. Установлено, что основной молекулярной формой пара над системами, содержащими МАХ-фазы Ti_2AlC , Ti_3AlC_2 , Zr_2AlC и Zr_3AlC_2 , начиная с температуры 1 500 К, является атомарный алюминий. Переход в пар карбидных систем, содержащих кремний, наблюдался при температурах, превышающих 1 900 К, с образованием газообразных Si , Si_2 , SiC_2 и Si_2C . Определены температурные зависимости парциальных давлений молекулярных форм пара в температурных интервалах 1 500–1 700 К над системами, содержащими Ti_2AlC , Ti_3AlC_2 , Zr_2AlC , Zr_3AlC_2 , и 1 900–2 050 К над карбидными системами, содержащими кремний. В результате показано, что общее давление молекулярных форм пара Si , Si_2 , SiC_2 , Si_2C повышается в следующем ряду над карбидными образцами, содержащими кремний: $Ti_2SiC < Ti_3SiC_2 < SiC$. Над карбидными системами на основе МАХ-фаз,

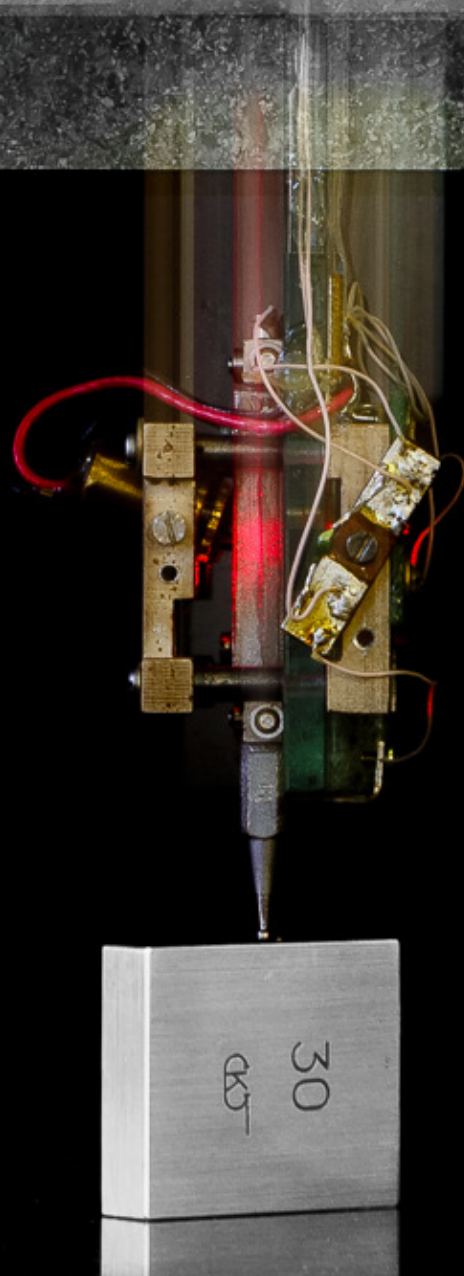
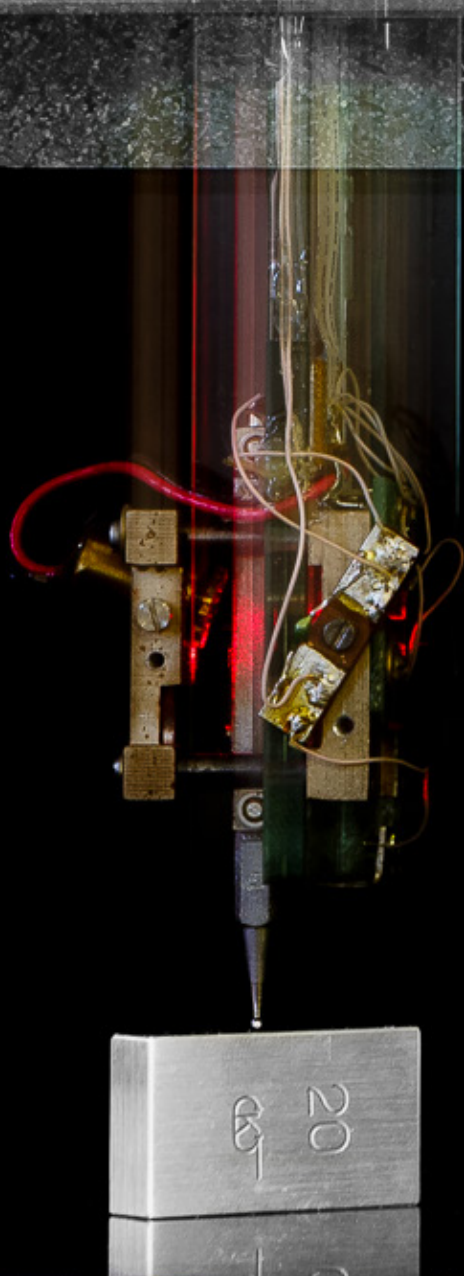
содержащих алюминий, парциальное давление пара атомарного алюминия повышается в следующем ряду: $Zr_2AlC < Zr_3AlC_2 < Ti_2AlC < Ti_3AlC_2$.

Установлено также, что введение оксида гафния в изученные карбиды приводит к появлению в паре кислородсодержащих молекулярных форм Al_2O и SiO и уменьшению общего давления пара над оксикарбидными системами. Определены температурные зависимости парциальных давлений молекулярных форм пара Al и Al_2O над образцами оксикарбидных систем, содержащих алюминий, с добавлением 10, 50 и 80 мол. % HfO_2 в температурном интервале 1 500–1 840 К (рис.), а также молекулярных форм пара SiC_2 и Si_2C над образцами оксикарбидных систем $Ti_{n+1}SiC_n-HfO_2$ ($n = 1$ или 2) с добавлением 10, 50 и 80 мол. % HfO_2 в температурном интервале 1 900–2 140 К. Показано, что наиболее труднотлетучими являются образцы оксикарбидной системы $Ti_2SiC-HfO_2$, а среди оксикарбидных систем, содержащих алюминий, – образцы системы $Zr_2AlC-HfO_2$ при содержании оксида гафния до 10 мол. % и системы $Ti_2AlC-HfO_2$ при большем содержании HfO_2 (см. рис.).



Общее давление пара как сумма парциальных давлений Al и Al_2O над образцами, содержащими (мол. %):

- а – $Ti_2AlC : HfO_2 = 90 : 10$ (■, 1);
- $Ti_3AlC_2 : HfO_2 = 90 : 10$ (●, 2);
- $Zr_2AlC : HfO_2 = 90 : 10$ (▲, 3);
- $Zr_3AlC_2 : HfO_2 = 90 : 10$ (▼, 4);
- б – $Ti_2AlC : HfO_2 = 50 : 50$ (■, 1);
- $Ti_3AlC_2 : HfO_2 = 50 : 50$ (●, 2);
- $Zr_2AlC : HfO_2 = 50 : 50$ (▲, 3);
- $Zr_3AlC_2 : HfO_2 = 50 : 50$ (▼, 4)



Прикладные исследования и разработки

- 130** Сополифлуорены с дицианостильбеновыми и дицианофенантроновыми фрагментами как перспективные материалы для создания фотодиодов
- 131** Особенности изотопного распределения урана на границе полярной и неполярной сред
- 132** Нановолокнистые материалы на основе фотосшиваемого альгината натрия для тканевой инженерии и регенеративной медицины
- 134** Флуоресцентный гидрогель с углеродными квантовыми точками для обнаружения ионов Fe^{3+}
- 135** Применение макулатуры, грибов и бактерий для стабилизации почвы
- 136** Мембранно-сепарационный материал на основе поливинилиденфторида
- 137** Утилизация сухозаряженных аккумуляторов методом парового риформинга
- 138** Атмосферостойкие органосиликатные покрытия для тропиков и Крайнего Севера
- 140** Технология экологически чистого проникновения в подледниковое озеро Восток
- 142** Идентификация наноструктур в центрах эмиссии на катоде многопроволочной пропорциональной камеры из эксперимента LHCb
- 143** Тестирование ASIC-опций для считывающей электроники трубочных трековых детекторов
- 144** Гидрофобные антиобледенительные и противообрастающие органосиликатные покрытия
- 145** Легкий огне- и термостойкий материал для теплоизоляции

Сополифлуорены с дицианостильбеновыми и дицианофенантреновыми фрагментами как перспективные материалы для создания фотодиодов

А. А. Якиманский¹, Д. А. Лыпенко², А. Е. Александров², А. В. Дмитриев²,
И. Е. Колесников³, Т. Г. Чулкова¹, А. В. Якиманский¹, А. Р. Тамеев²

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН

³ Санкт-Петербургский государственный университет

Сополифлуорены представляют большой интерес из-за их способности образовывать тонкие пленки с настраиваемыми оптическими и электрическими свойствами. В данной работе были синтезированы сополимеры полифлуорена с электроноакцепторными дицианостильбеновыми и дицианофенантреновыми фрагментами (рис. 1). Их тонкие пленки были охарактеризованы с помощью электронной спектроскопии, циклической вольтамперометрии, электрических и фотоэлектрических измерений. Была измерена подвижность носителей заряда в сополимерах, при этом акцепторные компоненты обеспечивают сбалансированную подвижность электронов и дырок порядка $10^{-6} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Фотодетекторы на основе гетероперехода «сополимер – N,N'-ди(2-этилгексил)-3,4,9,10-периленидикарбонксимид (PTCDI)» (рис. 2) показали полосу фотоответа, расширенную в зеленую область из-за по-

глощения PTCDI, и повышенный фототок в синей УФ-полосе поглощения сополимера, что связано с поглощением фотолюминесцентного излучения сополимеров в слое PTCDI.

Представленный подход к улучшению характеристик фотодетектора на основе полимера является перспективным в органической оптоэлектронике. Таким образом, нами улучшены характеристики фотодетектора на основе сополифлуорена благодаря формированию подходящего гетероперехода «сополимер – PTCDI», который обеспечивает синергию сбалансированного транспорта носителей заряда в полимерном фотопроводящем слое и повышенной концентрации носителей заряда в фотопроводящем слое PTCDI при освещении в диапазонах поглощения обоих материалов.

Работа поддержана грантом РНФ № 23-43-00060.

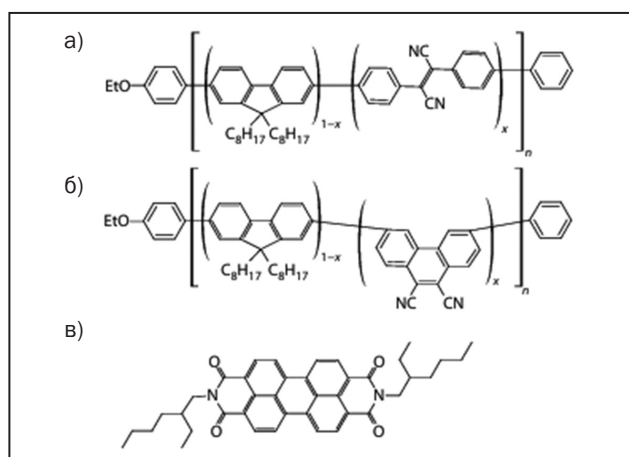


Рис. 1. Структуры сополифлуоренов с дицианостильбеновыми (а) и дицианофенантреновыми (б) фрагментами, а также PTCDI (в)

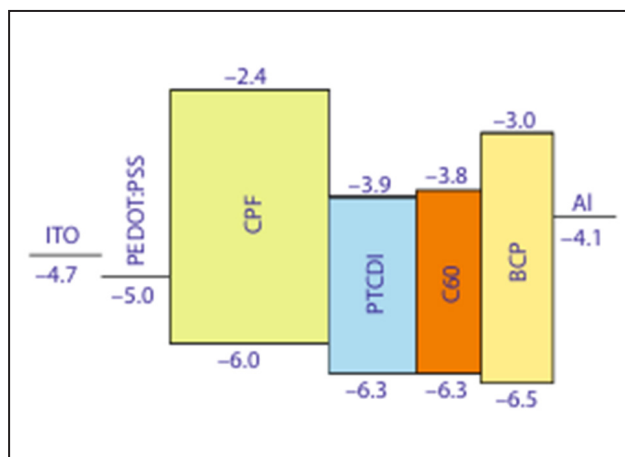


Рис. 2. Структура фотодиода

Особенности изотопного распределения урана на границе полярной и неполярной сред

Д. А. Румянцева, В. Г. Зиновьев, И. А. Митропольский

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Для экстракции урана используются органические соединения, в первую очередь трибутилфосфат (ТБФ). Исследован процесс адсорбции комплексов $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{ТБФ}$ в гетерогенной системе на вертикальной границе раздела полярного раствора азотной кислоты и поверхности неполярного полипропилена. Концентрация урана определялась методом рентгенофлуоресцентного анализа по интенсивности рентгеновских переходов L -серии. Для изучения изотопного состава использовался γ -спектрометрический метод регистрации γ -излучения продуктов распада изотопов урана. В результате на вертикальной границе раздела сред наблюдалось аномальное изотопное распределение урана (рис. 1). Если в исходном растворе содержание ^{234}U составляло $0,0016 \pm 0,0003$ ат. %, ^{235}U – $0,471 \pm 0,007$ ат. %, ^{238}U – $99,5 \pm 0,3$ ат. %, то на границе концентрация ^{234}U увеличилась до $0,045 \pm 0,003$ ат. %, ^{235}U – до $1,55 \pm 0,03$ ат. %, а содержание ^{238}U

уменьшилось до $98,4 \pm 1,9$ ат. %. На этом явлении основан новый способ химического обогащения урана.

Скорость адсорбции на границе «твердая фаза – жидкость» зависит от скорости диффузии реагирующих веществ и скорости химической реакции на границе раздела. Если лимитирующей стадией адсорбции является диффузия, то процесс описывается уравнением псевдопервого порядка Ерофеева – Колмогорова. Экспериментально измеренные и рассчитанные по этой модели кинетические кривые адсорбции изотопов урана на границе «твердая фаза – жидкость» у поверхности раствора ($0 < h < 10$ мм) приведены на рис. 2. Скорость накопления адсорбата (изотопов урана и продуктов их распада) равна производной по времени от концентрации. В результате получено, что подвижность молекул $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{ТБФ}$ с легкими изотопами урана выше.

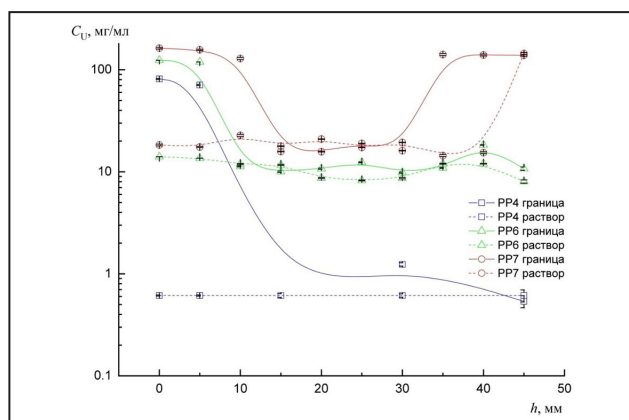


Рис. 1. Распределение по глубине раствора h концентрации урана C_U в гетерогенной системе $(\text{C}_3\text{H}_6)_n$ – ТБФ – HNO_3 для разных растворов. Сплошные линии – для границы раздела фаз вдоль стенки стакана; пунктир – для однородной фазы в центре стакана

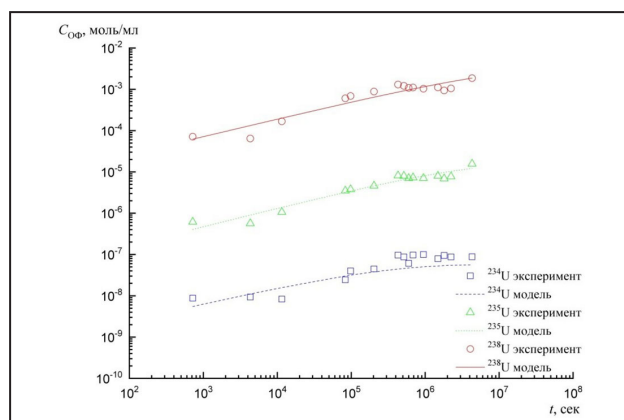


Рис. 2. Изменение со временем концентрации адсорбата с изотопами урана в органической фазе $C_{\text{ОФ}}$ на границе «твердая фаза – жидкость» у поверхности раствора

1. Rumyantseva D.A., Zinovyev V.G., Mitropolsky I.A. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2024. V. 88. No. 11. P. 1806–1811.
2. Rumyantseva D.A., Zinovyev V.G., Mitropolsky I.A. // Earth Sci. Hum. Constr. 2024. V. 4. P. 153–158.

Нановолокнистые материалы на основе фотосшиваемого альгината натрия для тканевой инженерии и регенеративной медицины

Д. Н. Пошина¹, Н. Соколова¹, С. Ноно-Тагне², Х. Ахмади-Нохадани², И. В. Гофман¹,
А. И. Мишанин³, А. С. Головкин³, Ю. А. Скорик¹, И. Оцука²

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Университет Гренобль-Альпы, Франция

³ Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова
Минздрава России

Материалы, полученные методом электроформования, представляют собой сеть тонких волокон субмикронного диаметра. Они обеспечивают благоприятную среду для роста и пролиферации клеток при регенерации за счет того, что их структура и/или состав имитирует естественный межклеточный матрикс. Природные полисахариды, такие как альгинат натрия, стимулируют рост клеток и являются компонентами скаффолдов различной структуры. При использовании альгината натрия в составе скаффолдов необходимо перевести его в нерастворимое состояние с использованием различных сшивающих агентов.

В данной работе альгинат натрия модифицировали метакрильными группами, способными к фотосшиванию под действием УФ-излучения в присутствии фотоинициатора (рис. 1). Модификация подтверждена методами ЯМР- и ИК-спектроскопии. Для получения волокон из метакрилизованного альгината натрия были оптимизированы два процесса: капиллярного и бескапиллярного электроформования. Подобраны оптимальные составы формовочных растворов (содержание альгината натрия, полиэтиленоксида, фотоинициатора), их свойства (вязкость, поверхностное натяжение и электропроводность) и параметры формования (напряжение, расстояние между формирующим и приемным электродами, скорость подачи раствора) для получения волокон толщиной около 150 нм. Бескапиллярный процесс позволяет вести формование в более широком диапазоне указанных свойств за счет значительно большего напряжения формования (60–70 кВ против 20–30 кВ в капиллярном процессе). При одинаковой толщине во-

локна для двух процессов средний размер пор значительно различался (0,54 и 0,37 мкм² для капиллярного и бескапиллярного процесса соответственно), что свидетельствует о различиях в укладке волокон в материале (рис. 2). Степень замещения (метакрирования) 0,3–0,5 оказалась достаточной для получения нерастворимого скаффолда, стабильного в физиологических средах. При этом сшивка не оказала сильного воздействия на прочность материала. Полученный нановолокнистый материал показал хорошую цитосовместимость с мезенхимальными стволовыми клетками (МСК). Поскольку МСК являются мультипотентными и способны дифференцироваться практически в любые специализированные клетки тканей, то их реакция свидетельствует о потенциальной совместимости с различными видами тканей.

Данная работа – одно из немногих исследований, посвященных получению волокон альгината натрия с последующей сшивкой с применением УФ-облучения. Работа будет полезной для разработки волокнистых скаффолдов на основе природных полисахаридов. Модификация фотосшиваемыми группами является относительно простым и доступным методом, позволяющим контролировать физико-химические свойства скаффолда, адгезию клеток к материалу, их закрепление и миграцию, а также рост клеток за счет создания наиболее благоприятных условий. При получении скаффолда с набором необходимых физико-химических и биологических свойств его можно будет использовать в клинической практике для целей тканевой инженерии и регенеративной медицины.

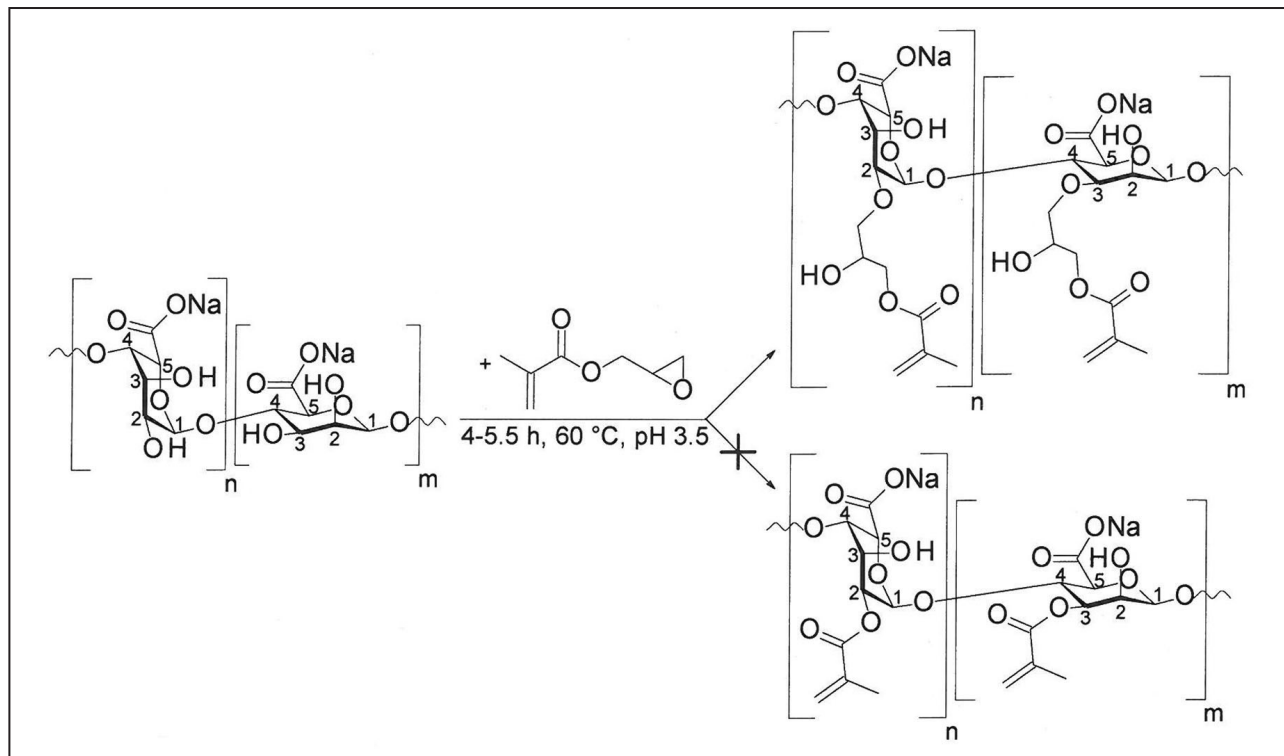


Рис. 1. Схема синтеза метакрилизованного альгината натрия

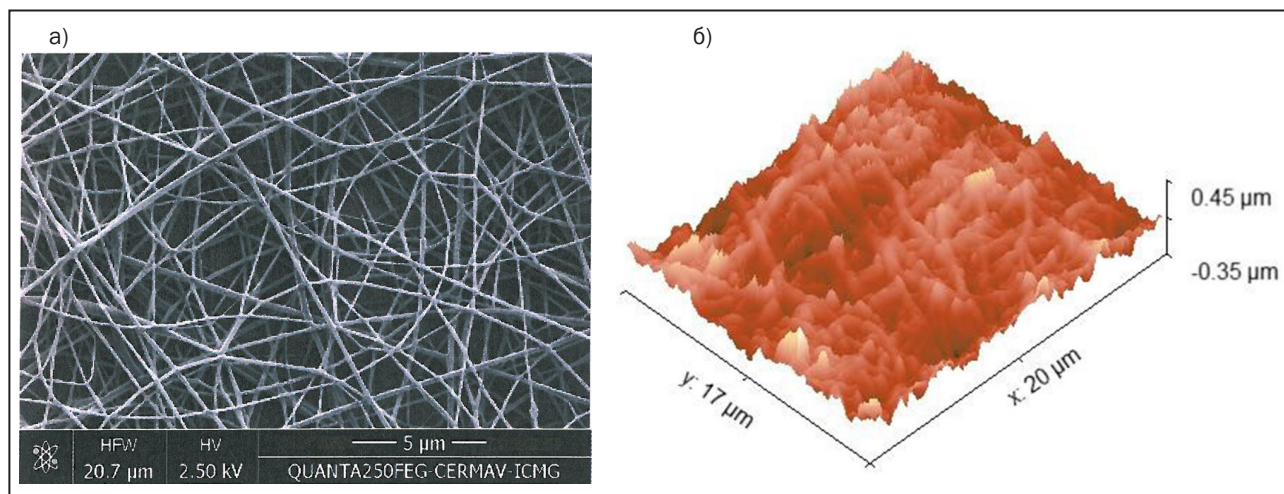


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия (а), атомно-силовая микроскопия (б) для скаффолда на основе метакрилизованного альгината натрия

Флуоресцентный гидрогель с углеродными квантовыми точками для обнаружения ионов Fe^{3+}

А. М. Бородина¹, С. В. Бронников¹, С. В. Костромин¹, Д. В. Панькин²,
А. В. Поволоцкий³, Е. В. Ушакова⁴

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Ресурсный центр «Оптические и лазерные методы исследования вещества»
Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета

³ Институт химии Санкт-Петербургского государственного университета

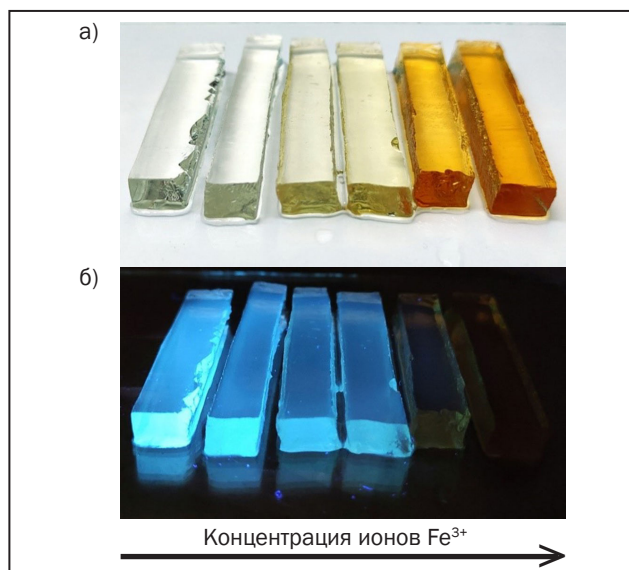
⁴ Национальный исследовательский университет информационных технологий,
механики и оптики

Для применения в области экологического зондирования получены и исследованы полимерные композиты: сшитые гидрогели на основе акриламида, содержащие 0,1 масс. % углеродных квантовых точек (УКТ), демонстрирующие интенсивную фотолюминесценцию (ФЛ) при облучении УФ-светом. Образцы были охарактеризованы с помощью сканирующей электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, ФЛ-спектроскопии, коррелированного по времени счета одиночных фотонов и УФ-видимой спектроскопии.

При помещении в водный раствор FeCl_3 образцы приобретали желто-коричневую окраску, интенсивность которой увеличивалась с возрас-

танием концентрации ионов Fe^{3+} , что свидетельствует о сорбции ионов Fe^{3+} (рис. а). После сорбции ионов Fe^{3+} интенсивность ФЛ образцов уменьшается с возрастанием концентрации ионов Fe^{3+} вплоть до полного тушения ФЛ (рис. б), обусловленного образованием нефлуоресцирующих комплексов УКТ с ионами Fe^{3+} . Вычислен предел обнаружения ионов Fe^{3+} в водных растворах, равный 0,124 мкмоля. Он оказался существенно ниже предельно допустимой концентрации для ионов Fe^{3+} (5,36 мкмоля).

Преимущества детектирования ионов Fe^{3+} в водных средах методом ФЛ-спектроскопии с использованием разработанных хемосенсоров – простота измерений, высокая чувствительность и быстрое получение результатов (до 10 мин).



Фотографии образцов сшитых гидрогелей с углеродными квантовыми точками после выдержки в водных растворах с различной концентрацией Fe^{3+} (от 0 до 6 нмолей) при дневном (а) и ультрафиолетовом (б) освещении

Применение макулатуры, грибов и бактерий для стабилизации почвы

Д. А. Головкина¹, Е. В. Журишкина¹, А. Т. Саитова², М. В. Безручко²,
И. М. Лапина¹, А. А. Кульминская¹

¹ Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт эпидемиологии и микробиологии им. Пастера

Одной из многообещающих «зеленых» технологий, которая объединяет различные научные дисциплины, является микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция (MICP). Этот процесс основывается на способности микроорганизмов вызывать образование карбоната кальция в результате своей метаболической активности. Биогенный карбонат кальция прекрасно совместим с разнообразными материалами, что делает MICP привлекательным решением для множества инженерных и экологических задач. Эта технология представляет собой экологически безопасную альтернативу традиционным методам химической цементации, которые обычно включают добавление в грунт бентонита, силикатов или акриламида. Биоцементация позволяет укрепить и стабилизировать почву, увеличивая содержание твердой фазы, уменьшая размер пор и улучшая сцепление между частицами. Хотя в процессах MICP в основном рассматривали бактериальную биоминерализацию, грибы также играют важную роль в биогеохимических циклах и все чаще признаются за их потенциал в улучшении почвы.

Для удовлетворения растущих запросов строительства необходимо добиться определенных показателей механических характеристик грунта. Прочностные характеристики обработанных MICP грунтов также можно улучшить путем включения армирующих добавок. Известны работы, в которых в бактериально обработанный песок вносили бамбуковые волокна, шерстяное волокно или джут. В предыдущем исследовании мы продемонстрировали, что внесение в почву

измельченной макулатуры приводит к значительному повышению ее прочностных характеристик, а также позволяет предложить новый путь утилизации органических отходов.

В нашей работе мы продемонстрировали потенциал использования уреолитических бактерий *Bacillus licheniformis* DSMZ 8782 и дрожжеподобного гриба *Scytalidium candidum* ЗС для стабилизации почвы как по отдельности, так и в сочетании. Результаты эксперимента показали, что оптимальное количество добавляемой макулатуры составило 2 % как для образцов почвы, обработанных бактериальной суспензией *B. licheniformis*, так и для образцов почвы, в которых участвовали местные биоминерализующие микроорганизмы. При такой концентрации макулатура не препятствовала процессу биоминерализации, а прочность образцов повышалась за счет армирования волокнами макулатуры. Кроме того, мы отметили, что обработка образцов только грибами привела к увеличению прочности почвы почти в девять раз по сравнению с контрольными необработанными образцами. Дополнительно было обнаружено, что добавление мицелиального гриба *Sc. candidum* к образцам почвы привело к увеличению доли бактериальных штаммов, способных к биоминерализации, особенно из рода *Lysinibacillus*.

Таким образом, введение *Sc. candidum* в процесс MICP дало многообещающие результаты с точки зрения повышения прочности почвы, что позволяет предположить, что он может стать ценным дополнением к процессу обработки и заслуживает более детального изучения.

Мембранно-сепарационный материал на основе поливинилиденфторида

Г. К. Ельяшевич¹, И. С. Курындин¹, Д. И. Герасимов¹, В. В. Пакальнис²

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

² Аккумуляторная компания «Ригель»

Разработан способ получения нового пористого мембранно-сепарационного материала, в основе которого лежит экструзия расплава поливинилиденфторида (ПВДФ). Способ относится к «зеленым» технологиям, поскольку формирование пор осуществляется на воздухе при ориентационных и тепловых воздействиях на пленку без использования опасных сред или добавок.

Актуальность работы определяется необходимостью устойчивого развития технологий получения тонких микропористых полимерных мембран, обладающих высокой химической стойкостью к жидким электролитам, в частности используемых в химических источниках тока в качестве сепараторов, разделяющих пространство катода и анода. Принцип действия основан на том, что максимальный протекающий ток можно ограничить за счет сопротивления сепаратора в электролите, что предотвращает перегрев и повышает безопасность работы аккумуляторов.

Полученные пористые пленки ПВДФ устойчивы к воздействию кислот и щелочей и характеризуются развитой сетью сквозных каналов, обеспечивающих протекание жидкости. Достигнутое значение общей пористости составляет 33 %, размеры пор находятся в диапазоне 10–60 нм. Найдены основные условия получения пористых пленок, и установлено их влияние на сопротивление пористых образцов в электролите,

что в результате позволяет производить сепараторы с требуемой (заданной) проницаемостью для электролита.

Пористые пленки ПВДФ прошли успешную апробацию в качестве сепараторов для литиевых источников тока (рис.) в аккумуляторной компании «Ригель» (Санкт-Петербург). Были проведены испытания аккумуляторов в режиме зарядно-разрядных циклов, установлено, что по эксплуатационным характеристикам мембранно-сепарационный материал на основе ПВДФ не уступает промышленным сепараторам Celgard 2400 (США) и перспективен для внедрения в производство в рамках импортозамещения. Разработанный метод получения мембранно-сепарационного материала может быть использован для организации производства по выпуску пористых пленок в непрерывном технологическом режиме.



Пористая пленка поливинилиденфторида, используемая в качестве сепаратора для литиевых источников тока

Утилизация сухозаряженных аккумуляторов методом парового риформинга

А. В. Башаричев¹, И. С. Окунев², В. Я. Сиротюк¹, В. А. Голиков³

¹ Научный центр комплексной безопасности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

³ ООО «Топливная экологическая компания»

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ совместно с ООО «Топливная экологическая компания» (Санкт-Петербург) разрабатывается методика переработки электронного лома и сухозаряженных аккумуляторов (АКБ) методом парового риформинга с получением вторичных продуктов (никеля, кадмия, молибдена, марганца и т. д.). Метод позволяет перерабатывать отходы 2-го класса опасности (в соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов) с извлечением цветных металлов без образования вторичных химических загрязнений.

Проблема переработки и утилизации АКБ носит общемировой характер. В России функционируют всего несколько предприятий, занимающихся утилизацией АКБ, с общим объемом переработки не более 1 500 т/год, что составляет всего третью часть от необходимого объема утилизации данного вида отходов.

Для отработки методики утилизации аккумуляторов был применен метод парового риформинга, отличительными особенностями которого являются использование микроволновой энергии для получения перегретого водяного пара атмосферного давления в пределах 500–900 °С,

создание в реакторе зон сушки, карбонизации и конверсии с однородным по сечению распределением температуры. При указанных интервалах температур обработки отходов процесс может рассматриваться как технология пиролиза в восстановительной среде водяного перегретого пара. Ранее промышленные установки, модифицированные по данной схеме, на территории России не использовались.

После серий испытаний по утилизации АКБ проведенный анализ зольных остатков показал фактически первоначальное содержание металлов, хлора, серы и других элементов в золе в виде солей или окислов. Как показали исследования, все металлы остаются в зольном остатке, происходит полная деструкция элементов с освобождением и частичным восстановлением чистого металла из солей и оксидов. Уноса солей металла с отработанным паром фактически не наблюдается. Данная технология не ведет к образованию вторичных токсичных отходов и может существенно снизить себестоимость переработки сухозаряженных АКБ со значительным увеличением доли вторичного сырья в технологической цепочке того или иного производства.

Атмосферостойкие органосиликатные покрытия для тропиков и Крайнего Севера

Л. Н. Красильникова¹, Я. А. Хамидулин¹, В. И. Вошиков¹, Е. Д. Васильева²,
А. К. Кычкин², Чи Ван Нгуен³, А. М. Николаев¹, Ю. Е. Горшкова^{4, 5}, О. А. Шилова^{1, 6}

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН

³ Приморское отделение Совместного российско-вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра, Вьетнам

⁴ Объединенный институт ядерных исследований

⁵ Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет

⁶ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

В настоящее время для изготовления различных элементов конструкций успешно используются композиты на основе стекловолокна и эпоксидной смолы. Подобные конструкции востребованы для эксплуатации в экстремальных условиях как Крайнего Севера, так и тропиков, которые оказывают разрушительное воздействие на материал, способствуя деградации его свойств. При этом важная характеристика материалов – их водостойкость. Одним из способов защиты является использование органосиликатных покрытий, получаемых на основе кремнийорганических лаков и высокодисперсных гидросиликатов.

В ходе работы получена органосиликатная композиция, из которой на поверхности композитного материала (стеклопластика) сформировано органосиликатное покрытие с улучшенной водостойкостью и низким водопоглощением. Полученный эффект достигнут за счет модификации органосиликатной композиции на основе кремнийорганического лака КО-921 полисилоксаном линейной структуры – полидиметилсилоксаном (ПДМС) и диановой эпоксидной смолой (рис. 1.). На основании анализа физико-технических свойств, показателей смачиваемости и водопоглощения выбраны оптимальные

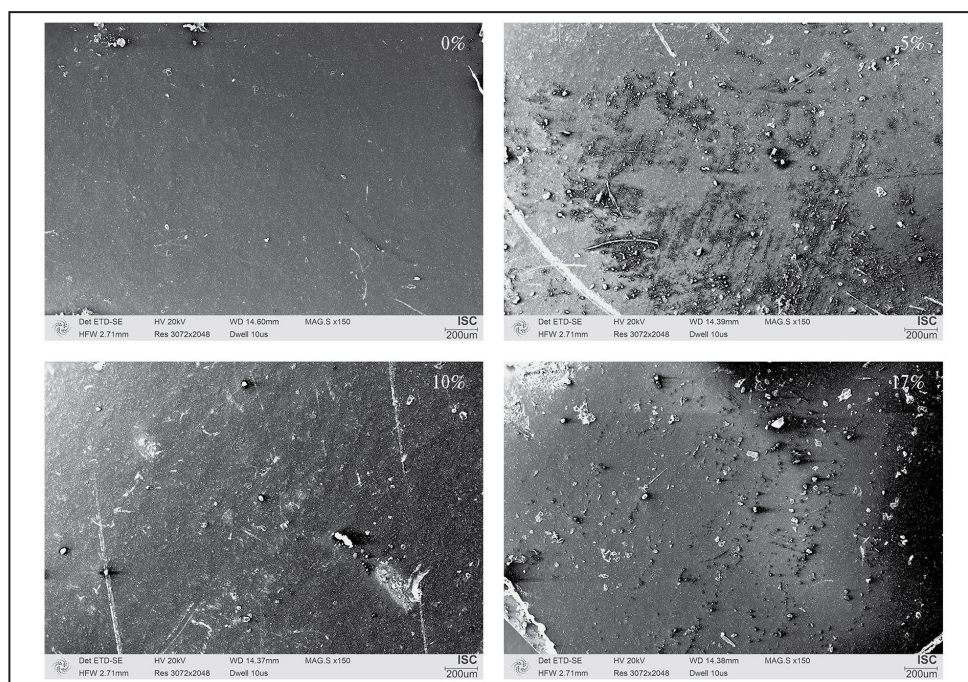


Рис. 1. СЭМ-изображения органосиликатных покрытий на основе кремнийорганического лака КО-921, модифицированных различным количеством полидиметилсилоксана

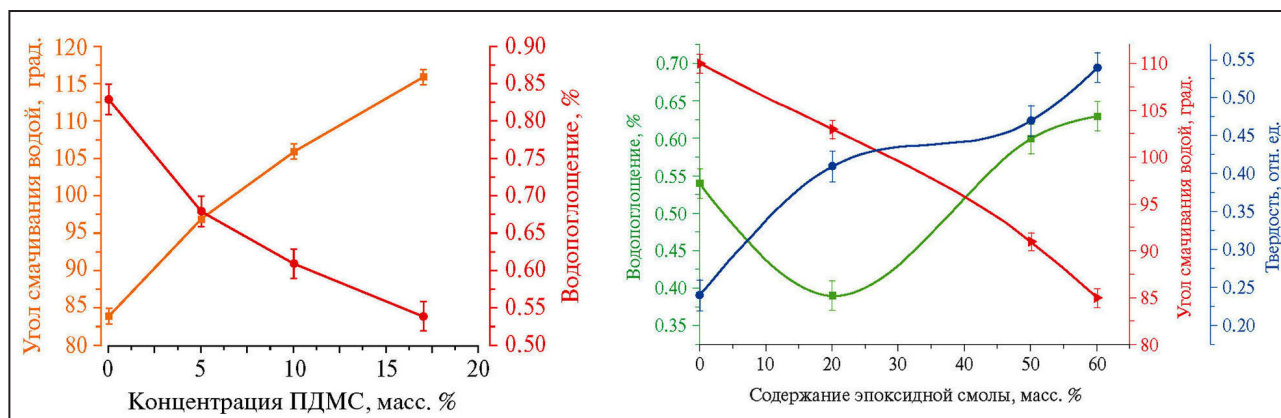


Рис. 2. Зависимости степени гидрофильности/гидрофобности, водопоглощения и твердости органосиликатных покрытий от концентрации модифицирующих добавок – полидиметилсилоксана (слева) и диановой эпоксидной смолы (справа)

концентрации модифицирующих добавок – 17 масс. % ПДМС и 20 масс. % эпоксидной смолы. В ходе работы получена органосиликатная композиция, из которой на поверхности композитного материала (стеклопластика) сформировано атмосферостойкое органосиликатное покрытие с низким водопоглощением (рис. 2).

По совокупности лабораторных и натурных испытаний, проведенных в Якутии и во Вьетнаме, установлено, что разработанное органосиликатное покрытие обладает атмосферостойкостью как в условиях очень холодного, так и тро-

пического саванного и субэкваториального климата. Оно перспективно для защиты конструкций из композитных материалов от деградации в прибрежных зонах, в районах с тропическим климатом, отличающихся повышенной влажностью, большим уровнем солнечной радиации, а также в районах Крайнего Севера с экстремально низкими температурами в качестве антиобледенительного покрытия благодаря своим антиадгезионным свойствам за счет гидрофобного поверхностного слоя.

Технология экологически чистого проникновения в подледниковое озеро Восток

А. А. Захаров

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Озеро Восток находится в Антарктиде, имеет длину 275 км, ширину 50 км и сверху закрыто ледником. В месте расположения полярной станции «Восток» водный слой равен 680 м, а толщина ледника достигает 3 758 м. Подледниковое озеро представляет большой научный интерес, поскольку внутри него может быть размещен нейтринный детектор нового поколения большого объема для регистрации высокоэнергетических астрофизических нейтрино в условиях крайне низкого фона космических и атмосферных частиц. Озеро, изолированное от биоты Земли на протяжении многих миллионов лет, представляет также научный интерес как место для поиска микроорганизмов, обладающих уникальными способностями адаптации к экстремальным условиям существования. ДНК реликтовых микроорганизмов может использоваться в качестве генетического материала для создания уникальных лекарственных препаратов. Однако проведение научных исследований внутри озера связано с большими трудностями технического и экологического характера.

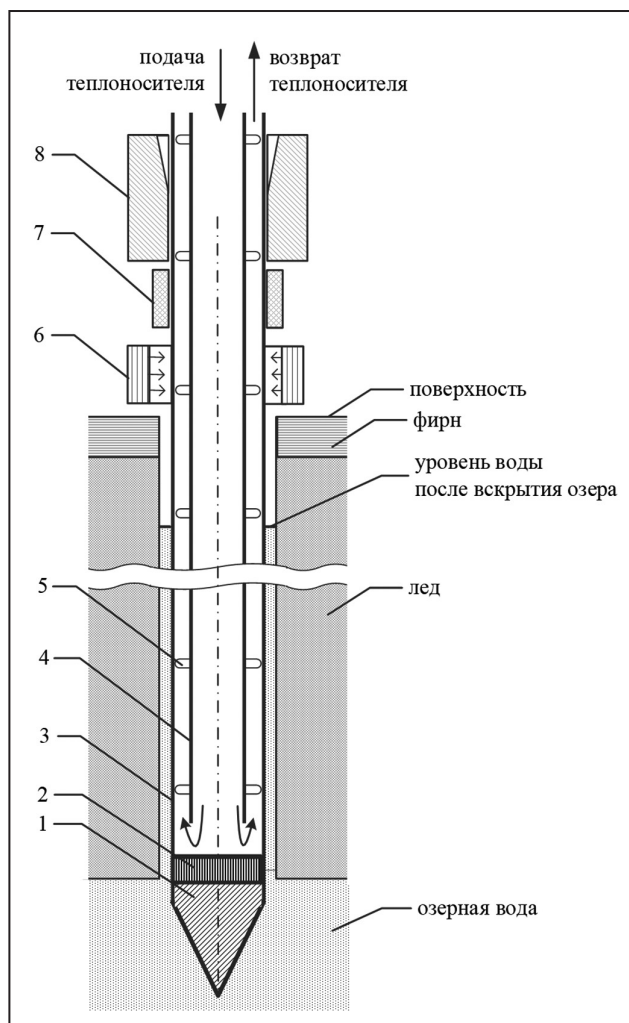
Существующие в настоящее время технологии глубокого бурения льда не обеспечивают экологически чистое проникновение в подледниковое озеро. Примером является пробуренная к озеру скважина, которая не может быть использована по причине сильного загрязнения в процессе бурения. Для решения этой задачи разработана новая технология скоростного экологически чистого бурения льда и вскрытия подледникового озера с помощью комбинированного теплового бурового снаряда. Эта технология применима также для изучения других подледниковых озер в Антарктиде.

Буровой снаряд состоит из тепловой буровой коронки с электрическим нагревательным

элементом и герметичного гибкого трубопровода «труба в трубе» (рис.). Цилиндрическая часть тепловой буровой коронки с конусообразной нижней частью формирует зазор для отвода воды, образовавшейся при плавлении льда. Внутри трубопровода циркулирует нагретый теплоноситель для поддержания образовавшейся в скважине талой воды в жидком состоянии в условиях окружающего льда с низкой температурой. Таким образом, в отличие от других способов бурения льда буровая жидкость находится в герметичном трубопроводе и не контактирует со стенками скважины. Функцию заливочной жидкости, удерживающей стенки скважины от смыкания под воздействием давления ледника в условиях глубокого бурения, выполняет вода.

Результаты теплового расчета продемонстрировали возможность бурения скважины глубиной 3 758 м и диаметром 0,15 м к подледниковому озеру Восток за 72 ч. Для этого потребуется мощность тепловой буровой коронки, равная 96 кВт, и теплоноситель с расходом 6,8 кг/с и температурой 95 °С, который будет возвращаться с температурой 25,3 °С. Тепловой поток, поступающий от теплоносителя, равен 900 кВт. Гидравлическое сопротивление гибкого трубопровода составит примерно 8,57 МПа без учета местных сопротивлений и сопротивления нагревателя на поверхности. Для бурения скважины потребуется 7,5 м³ топлива без учета потерь тепла на поверхности. В качестве теплоносителя рассматривалась силиконовая незамерзающая жидкость ПМС-2.

С целью проведения исследований в озере к стыковочному узлу гибкого трубопровода вместе тепловой буровой коронки могут присоединяться научные приборы или пробоотборники. Циркулирующий в гибком трубопроводе нагре-



Принципиальная схема комбинированного теплового бурового снаряда для экологически чистого бурения и вскрытия подледникового озера: 1 – тепловая буровая коронка с электрическим нагревательным элементом; 2 – стыковочный узел; 3 – наружный гибкий трубопровод; 4 – внутренний гибкий трубопровод; 5 – центрирующие упоры; 6 – ультрафиолетовый излучатель; 7 – устройство для очистки внешней поверхности бурового снаряда; 8 – направляющее устройство

тый теплоноситель будет поддерживать воду в скважине в жидком состоянии, обеспечивая любые по длительности работы в озере.

На зимний период буровой снаряд может оставаться внутри скважины без циркуляции теплоносителя и прогрева буровой коронки. Для проведения научных работ в следующем летнем сезоне достаточно возобновить циркуля-

цию горячего теплоносителя без необходимости повторного бурения скважины. Это существенно сократит время и расход топлива при подготовке к проведению работ внутри озера. Для длительного использования вся скважина может заполняться гидрофобной незамерзающей и экологически чистой силиконовой жидкостью.

1. Захаров А. А. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 3077. Гатчина, 2024. 45 с.

2. Захаров А. А. // Вестник МАХ. 2024. № 4. С. 19–24.

3. Способ бурения и вскрытия подледниковых озер: пат. РФ на изобретение № 2825375 / Захаров А. А.; опубл. 26.08.2024.

Идентификация наноструктур в центрах эмиссии на катоде многопроволочной пропорциональной камеры из эксперимента LHCb

Г. Е. Гаврилов¹, А. А. Дзюба¹, О. Е. Маев¹, М. В. Суясова²

¹ Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

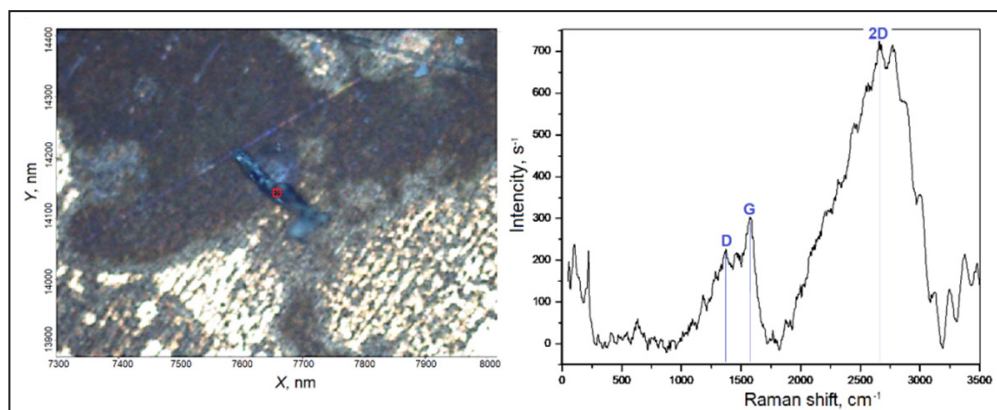
² Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Крупнейшая в мире мюонная система LHCb – самая облучаемая среди подобных детекторов, состоит из 4944 плоскостей многопроволочных пропорциональных камер (MWPC). Запланированная длительность работы – до 30 лет. Ежегодно из-за спонтанных скачков тока десятки плоскостей MWPC отключаются аварийно от высоковольтного питания. Возросший ток детектора, в десятки раз превышающий ток облучения в эксперименте, сохраняется и после остановки Большого адронного коллайдера (БАК), что позволяет отнести это явление к эффекту Мальтера. Особенность эффекта – точно локализованная токовая эмиссия на катоде. Целью комплексного исследования образцов катодов MWPC стало установление природы появления эмиссии при работе детектора в условиях БАК и идентификация образующихся при этом структур.

Возможность исследования MWPC из мюонной системы появилась только тогда, когда для исследования был взят модуль, проработавший восемь лет в LHCb. Модуль был демонтирован из мюонного детектора из-за не поддающихся тренировке, спонтанных токов, возникавших в одной из плоскостей MWPC.

В результате комплексного исследования на катоде MWPC обнаружены точечные углеродные структуры, инициирующие возникновение самоподдерживающихся токов. Локализация на поверхности образцов точечных (островковых) углеродных наноструктур, приводящих к эмиссии электронов в электрическом поле у катода детектора ($E_{\text{cath}} \sim 5000 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$), была выполнена методами атомно-силовой микроскопии. Корреляция морфологических и электрофизических характеристик на поверхности изучалась при фиксированном положении образца с использованием одного кантилевера.

Окончательная идентификация природы эмиссионных центров была выполнена методом рамановской спектроскопии (рис.). Три полосы рамановских сдвигов: D (Diamond, 1355 см^{-1}) – алмазоподобный углерод, G (Graphite, 1581 см^{-1}) – графит и 2D-обертон полосы G – уверенно являются сигнатурой многослойной графеноподобной структуры. В электрическом поле детектора и внешнего облучения подобная структура представляет собой источник эмиссии электронов.



Микрофотография поверхности при увеличении $\times 500$ (слева; красная точка (1,1 мкм) – пятно лазерного пучка); рамановский спектр, полученный в пятне и обработанный полиномом 5-го порядка с помощью программного пакета Omnic (справа)

Тестирование ASIC-опций для считывающей электроники трубчатых трековых детекторов

С. А. Буланова, А. В. Зеленов, В. Т. Ким, Е. В. Кузнецова, В. П. Малеев, Д. Е. Соснов

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

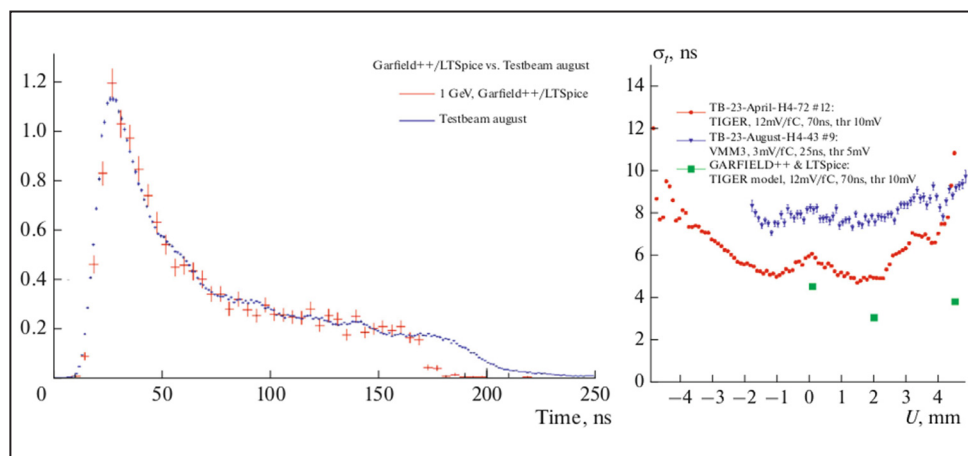
Тонкостенные дрейфовые трубки (straw-трубки) широко используются в действующих экспериментах. Малое количество вещества и малый вклад многократного рассеяния, а также возможность создания детектора большой площади при относительно небольшой стоимости являются определяющими факторами при выборе straw-трекера для детекторов будущих экспериментов, таких как SPD NICA (ОИЯИ), SHiP (ЦЕРН) и Near-Detector Complex эксперимента DUNE.

Выбор считывающей электроники для straw-трекеров определяется физической программой эксперимента. В некоторых случаях дополнительно к основному измерению координат трека необходимо определить тип заряженной частицы низкой энергии.

Изучение возможности использования TIGER ASIC в качестве считывающей электроники straw-трубок проводилось группами НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина), ОИЯИ (Дубна) и ИЯФ МЭ (Алматы) на мюонном тестовом пучке ускорителя SPS в ЦЕРН с трубками диаметром 10 мм, диаметром анода 30 мкм и газовой смесью 70 % Ar + 30 % CO₂. Выбранное рабочее

напряжение 1750 В соответствовало газовому усилению порядка 45 000. Временное разрешение straw-трубок было получено как результат измерений на пучке и моделирования. Моделирование сигнала straw-трубки было выполнено с помощью пакета GARFIELD++ с последующим моделированием отклика аналоговой части TIGER в пакете LTSpice. Сравнение результатов измерения и моделирования распределения времени дрейфа первичных электронов и временного разрешения как функции положения мюонного трека приведены на рисунке. Полученное разрешение достаточно для использования TIGER для координатных измерений straw-трекера.

К сожалению, из-за оптимизации TIGER для работы с GEM-детекторами система считывания, основанная на TIGER, не может быть использована для идентификации частиц дополнительно к координатным измерениям. В настоящее время Университетом Турина разрабатывается следующее поколение ASIC с учетом полученных нашими группами результатов, более адаптированное для straw-трекеров с дополнительной опцией идентификации типа заряженных частиц.



Сравнение полученного распределения времени дрейфа первичных электронов с результатами моделирования в пакетах GARFIELD++ и LTSpice со считывающей электроникой на основе TIGER (слева); сравнение временного разрешения, полученного с использованием TIGER и VMM3, с результатами моделирования в GARFIELD++ и LTSpice (справа)

Гидрофобные антиобледенительные и противообрастающие органосиликатные покрытия

Л. Н. Красильникова¹, Я. А. Хамидулин¹, В. И. Вошиков¹, Е. Д. Васильева², А. К. Кычкин²,
Чи Ван Нгуен³, А. М. Николаев¹, О. А. Шилова¹

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН

³ Приморское отделение Совместного российско-вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра, Вьетнам

Разработка новых эффективных функциональных защитных покрытий объектов техники и инфраструктуры, находящихся на открытом воздухе, в настоящее время является актуальной задачей. Органо-неорганические композиционные покрытия как холодного, так и горячего отверждения востребованы для нужд судостроения, атомной и оборонной промышленности.

В 2024 году в Филиале НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС были разработаны новые органосиликатные антиобледенительные покрытия с гидрофобной поверхностью, а также противообрастающие покрытия для защиты от биообрастания плавсредств и объектов портовой инфраструктуры.

Разработанные нами гидрофобные антиобледенительные покрытия прошли испытания в условиях Арктики и Крайнего Севера (пос. Тикси и г. Якутск), а противообрастающие покрытия – на климатических станциях Белого моря (губа Чупа) и Южно-Китайского моря (залив Дам Бай).

К технологическим преимуществам новых покрытий относятся простота нанесения, широкая цветовая гамма, снижение прочности сцепления льда с защищаемой поверхностью в 7–10 раз, сохранение защитных (антикоррозионных) свойств в условиях умеренно-холодного и холодного климата на стали 10 лет, на алюминии 20 лет, сохранение антиобледенительных свойств в течение 5–7 лет. Отвержденные покрытия не оказывают вредного воздействия на организм человека и окружающую среду, экологически безопасны. Покрытия относятся к материалам, не распространяющим пламя по поверхности.

Для развития настоящего направления в Филиале НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС планируется организация опытно-промышленного участка (оборудование для размолла и перемешивания, реакторы, контрольно-измерительное оборудование, испытательные стенды, климатические камеры).

1. Красильникова Л. Н., Хамидулин Я. А., Вошиков В. И. и др. // Коллоид. журн. 2024. Т. 86. № 5. С. 595–607.

2. Шилова О. А., ..., Вошиков В. И. и др. // Сб. тезисов докл. XXII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии в 7 томах. М.: ООО «Адмирал Принт», 2024. Т. 2. С. 156.

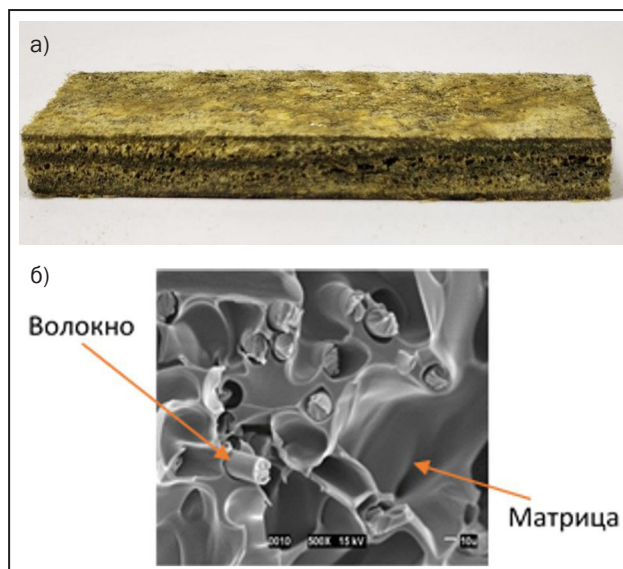
Легкий огне- и термостойкий материал для теплоизоляции

В. М. Светличный, К. С. Полотнянщиков, Г. В. Ваганов, А. Г. Иванов, Е. М. Иванькова,
Е. Н. Попова, Л. А. Мягова, В. Е. Юдин

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС

Получение прочных, легких, термостойких материалов является одной из наиболее актуальных задач развития современной техники, в т. ч. и при разработке новых конструкционных материалов. В настоящей работе предпринята попытка получения еще более легких, по сравнению с традиционными угле- и стеклопластиковыми, полимерных композитов на основе полиимидного войлока и термопластичного полиимидного связующего. Плотность таких материалов может быть 0,1–0,5 г/см³, однако введение волокон в структуру пористой полиимидной матрицы увеличивает прочность и модуль упругости композитов примерно в 100–1000 раз по сравнению с ненаполненными полиимидами. Прочность на изгиб $\approx$ 150 МПа, модуль упругости на сжатие $\approx$ 400 МПа.

С использованием форполимера на основе этилового эфира диангидрида 4,4'-дифенилосида тетракарбоновой кислоты и 4,4'-диаминодифенилметана, а также углеродсодержащего полиимидного войлока на основе волокна «Ари-мид-Т» композит был получен следующим образом: на первой стадии был получен препрег путем нанесения порошка форполимера на поверхность войлока методом электростатического диспергирования. Затем войлок с осажденным порошком прокатывали в каландрах при температуре 140 °С для смачивания и пропитки расплавом полимера по всему объему препрега. Полученные препреги разрезали на заготовки, которые укладывались в форму нагретого до температуры 220 °С прессы, и выдерживали в прессе при этой температуре в течение 2 ч. В итоге был сформирован композит с содержанием волокна $\approx$ 20 масс. % и плотностью $\approx$ 0,1 г/см³, что



Пенокомпозит: внешний вид (а); СЭМ-изображение внутренней структуры (б)

показано на рисунке. Важным преимуществом предлагаемой разработки является достаточно технологичный способ получения композитного материала по традиционной схеме пропитки (препрег) и прямого прессования, который применяется для получения угле-, органо- и стеклопластиков.

Полиимидные пористые композиты имеют исключительно высокую термостойкость (500 °С), термостойкость (280 °С), не поддерживают горение, а продукты термолитизации являются нетоксичными. Такие материалы могут применяться в авиации, автомобилестроении, строительстве в качестве термо- и огнестойкого теплоизоляционного покрытия, а также в судостроении.

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-13-20001.



Физика ядерных реакторов и ускорителей

- 148 Изготовление и поставка макетов и первого серийного эксплуатационного комплекта ТВС ПИК-2 в обеспечение эксплуатации реактора ПИК
- 149 Анализ геометрических характеристик твэлов типа ПИК-2 для корректировки расчетных моделей по итогам приемочных испытаний
- 151 Анализ неопределенностей основных нейтронно-физических характеристик реактора ПИК с ТВС ПИК-2
- 153 Оперативная графическая обработка данных химического контроля водных теплоносителей реактора ПИК
- 155 Анализ эффективности измерения радиометра WILMA
- 156 Разработка технологического процесса и создание установки по изготовлению тяжелой воды методом однотемпературного изотопного обмена в системе «вода – водород»
- 158 Повышение радиационной стойкости микроконтроллеров к воздействию высокоэнергетичных протонов с помощью радиационно-термической обработки

Изготовление и поставка макетов и первого серийного эксплуатационного комплекта ТВС ПИК-2 в обеспечение эксплуатации реактора ПИК

А. С. Захаров¹, А. Е. Киржаев², Ю. А. Орлов², М. В. Румянцев², С. Р. Фридман¹

¹ Отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Управление эксплуатации комплекса ядерных установок
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Коллективами организаций: АО «НИКИЭТ» (головная конструкторская организация), НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (эксплуатирующая организация), АО «Машиностроительный завод» (завод – изготовитель ТВС ПИК-2) – в соответствии с Дорожной картой разработки, постановки на производство и изготовления ТВС ПИК-2, имитаторов и вытеснителей тепловыделяющих сборок (ТВС) для исследовательского реактора ПИК выполнялись работы по разработке рабочей конструкторской документации и изготовлению макетов ТВС ПИК-2 (рис.), конструкция которых была доработана в соответствии с Решением № 24ЭД УЭКЯУ – 41.00 Ре «О доработках ТВС ПИК-2» на основании полученного опыта эксплуатации имитаторов ТВС ПИК-2», осуществлена их доставка в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

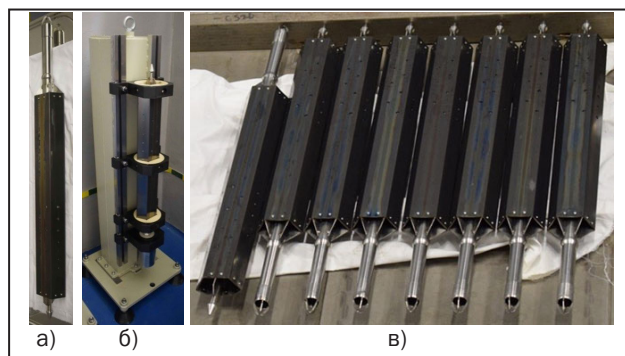
В АО «Машиностроительный завод» изготовлен первый серийный комплект ТВС ПИК-2 для реактора ПИК, включающий три модификации: 185.05.000 (квадратная без полости для ОС), 185.05.000-01 (квадратная с полостью для ОС), 185.05.000-02 (шестигранная), а также 15 твэлов трех модификаций с различной загрузкой: 185.01.050-03, 185.01.050-04, 185.01.050-05 – и 20 стержней выгорающего поглотителя (СВП) двух модификаций: 185.06.000 и 185.08.000, также отличающихся загрузкой сердечника.

При изготовлении одиночных изделий проводились измерения фактических масс, фактических геометрических параметров по выступам и впадинам, измерение длин участков с сердечником, изучение металлографических шлифов. Определены распределение плотности урана и коэффициенты неравномерности топлива

по высоте твэлов. Заводом предоставлены сертификаты на крупку UO_2 и наполнители СВП на партию, состав и масса шихты для каждой модификации твэлов и партии крупки UO_2 , изотопный состав топлива и массовая доля ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U в топливном сердечнике твэлов, масса диоксида урана, меди и бронзы в топливном сердечнике твэлов, параметры сердечника СВП (масса порошка выгорающего поглотителя, масса гадолиния на различных участках сердечника, масса гадолиния общая, тип и загрузка инертного наполнителя на длине 60 мм, сертификаты на трубные заготовки оболочки из стали ЭИ847).

Полученные данные по измерению одиночных изделий и изделий в составе ТВС планируется использовать для проведения верификации программ для ЭВМ и при анализе неопределенностей нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора ПИК.

В 2024 г. первый серийный комплект ТВС ПИК-2 и одиночные изделия изготовлены и поставлены на реакторный комплекс ПИК.



Внешний вид штатных тепловыделяющих сборок (а, б) и их макетов (в)

Анализ геометрических характеристик твэлов типа ПИК-2 для корректировки расчетных моделей по итогам приемочных испытаний

А. С. Захаров¹, А. С. Полтавский², С. Р. Фридман¹

¹ Отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Управление ядерной и радиационной безопасности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Рассмотрены и проанализированы схемы расчета периметра и площади поперечного сечения твэла с целью оптимизации расчетных моделей.

В реакторе ПИК используются ТВС ПИК-1 и ПИК-2, разработанные на основе твэлов реактора СМ разной модификации. Расчетные модели должны учитывать изменения профиля и состава твэлов за время их производства. Геометрия твэла меняется за счет изменения радиусов скруглений крестообразной оболочки, что позволяет существенно менять площадь поперечного сечения твэла $S_{ТВЭ}$ и периметр $P_{ТВЭ}$, а также внутренний объем для загрузки топливной композиции.

Эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{эф}$ в максимальной степени чувствителен к отклонениям доли воды в активной зоне, которая определяется средним значением $S_{ТВЭ}$. В проектных нейтронно-физических расчетах использовалась упрощенная эквивалентная модель крестообразного твэла с лопастями (ребрами) постоянной толщины. Вершины лопастей полностью закруглены одним радиусом скругления лопастей, радиусы скругления во впадинах увеличены для приведения $S_{ТВЭ}$ в соответствие с номинальным значением $S_{ТВЭ}$ ранее изготавливаемых модификаций твэлов реактора СМ. Для нейтронно-физических расчетов приоритетным является соответствие $S_{ТВЭ}$ его фактическому значению в загружаемой активной зоне.

Исходная модель твэла не дает полного соответствия значений $S_{ТВЭ}$, $P_{ТВЭ}$ и средних контролируемых размеров при производстве: диаметра и размера по впадинам оболочки твэла. Модель не позволяет проверить по контролируемым параметрам соответствующие технологические изменения $S_{ТВЭ}$ и эффекты реактивности. В свою

очередь, только два оперативно контролируемых размера не дают полной информации об изменении формы твэла и значении $S_{ТВЭ}$ – требуются исследования на шлифах.

В более реалистичных расчетных моделях крестообразного твэла с лопастями переменной толщины его параметры жестко связаны с контролируемыми размерами и позволяют построить зависимость $S_{ТВЭ}$ от контролируемых размеров в предположении отсутствия других изменений. Расчеты $S_{ТВЭ}$ в новых моделях по выполненным измерениям в ходе приемочных испытаний показали, что выявленные отклонения диаметра в среднем компенсируются увеличением размера по впадине. Проектное значение $S_{ТВЭ}$ практически не изменяется, однако учет возможного изменения формы твэла вдали от точек измерения создает неопределенность с возможным уменьшением $S_{ТВЭ}$, обусловленным отклонениями радиусов скругления и толщины твэлов в пределах ранее существовавших допусков для твэлов ПИК-1. При этом минимальный объем топливного сердечника остается достаточным для размещения проектной топливной загрузки с учетом наблюдаемого статистического разброса $S_{ТВЭ}$ отдельных твэлов.

Массы конструкционных материалов и толщина твэльной оболочки в пределах активной зоны оценены по результатам взвешивания твэлов при комплектации тепловыделяющих сборок (ТВС). При расчете изменения формы твэла величина его периметра приводится к постоянному значению за счет изменения малых и больших радиусов скругления, что исключает возможность необоснованного изменения массы конструкционных материалов и $S_{ТВЭ}$. Исследования позволили сократить неопределенность $S_{ТВЭ}$ и запаса реактивности.

По результатам анализа предложена корректировка расчетной модели с прямыми лопастями для приведения основных параметров твэлов в соответствие с фактическими данными. Оценка суммарной реактивности, вызванная потенциально возможным уменьшением $S_{ТВЭ}$ и противоположным эффектом изменения содержания конструкционных материалов, на основе коэффициентов чувствительности $K_{эфф}$ показывает, что

полная загрузка 18 ТВС может быть обеспечена дополнительными мерами в программе энергопуска. Целесообразно измерить $S_{ТВЭ}$ отдельных твэлов и стержней с выгорающим поглотителем, поставленных совместно со вторым комплектом ТВС в 2024 г., методами вытеснения воды или гидростатического взвешивания. Таким же образом можно измерить среднее значение $S_{ТВЭ}$ в составе целой ТВС.

1. Захаров А. С., Полтавский А. С., Фридман С. Р. Анализ геометрических характеристик твэлов типа ПИК-2 для корректировки расчетных моделей по итогам приемочных испытаний: техн. справка № 24 ЭД.УЭКЯУ-205.00 ТС НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, 2024. 32 с.
2. Захаров А. С., Онегин М. С. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакт. конст. 2024. Вып. 2. С. 101–113.

Анализ неопределенностей основных нейтронно-физических характеристик реактора ПИК с ТВС ПИК-2

М. С. Онегин¹, А. С. Захаров²

¹ Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Основная расчетная неопределенность коэффициента размножения нейтронов и другие параметры исследовательского реактора на тепловых нейтронах при расчетах по прецизионным Monte-Carlo программам типа MCNP, SERPENT-2, KENO-VI из пакета SCALE, MCU и т. д. определяются погрешностями используемых в расчетах библиотек ядерных данных, а также неопределенностями состава топлива и конструкционных материалов ядерных реакторов и геометрических размеров топливных и прочих элементов активной зоны. В работе исследовались расчетные погрешности, вызванные ядерными данными, для расчета реактора ПИК с новыми топливными элементами ПИК-2. Были выполнены расчеты неопределенностей эффективного коэффициента размножения нейтронов и эффективной доли запаздывающих нейтронов.

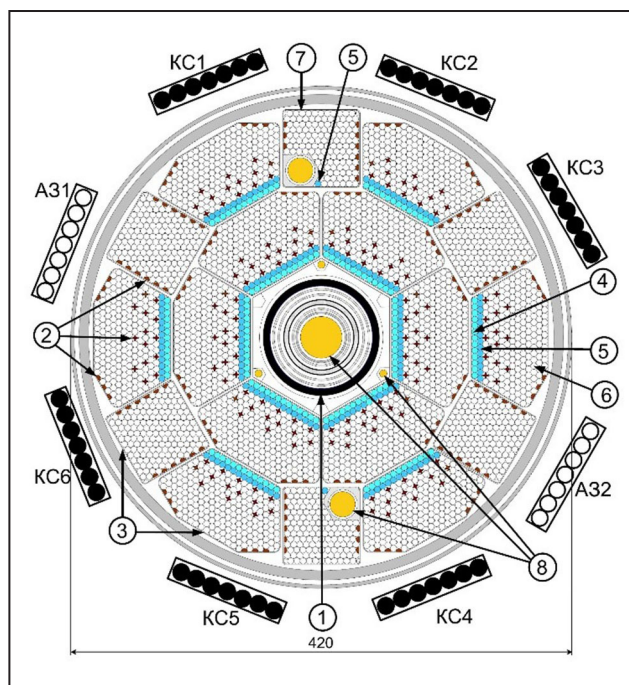
Было показано, что переход от библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-6.8 на более новую ENDF/B-7.0 приводит к уменьшению эффективной доли запаздывающих нейтронов приблизительно на 3,5 %: с 0,76 до 0,735 %. На наш взгляд, новое значение эффективной доли запаздывающих нейтронов более обоснованно и его следует использовать при сравнении экспериментально измеренных значений эффектов реактивности с расчетами. При этом, как показало исследование, расчетная доля запаздывающих нейтронов слабо зависит как от конфигурации активной зоны, так и от положения органов регулирования реактора.

В работе исследовалось влияние неопределенностей ядерных данных библиотеки ENDF/B-7.1 на расчетный эффективный коэффициент размножения нейтронов реактора. Для этого в рамках пакета SCALE была разработана модель реактора ПИК с ТВС ПИК-2. Основные элементы

активной зоны реактора с использованием новых тепловыделяющих сборок представлены на рисунке. Расчет суммарной неопределенности коэффициента размножения реактора предваряется расчетом коэффициентов чувствительности по отношению ко всем изотопам, входящим в состав реактора, причем для каждого изотопа рассчитывается вектор чувствительности в зависимости от реакции нейтрона с данным изотопом и энергетической группы взаимодействующего нейтрона. Расчет коэффициентов чувствительности выполнялся по теории возмущений с использованием метода CLUTCH. Далее этот вектор чувствительности свертывается с матрицей ковариации экспериментальных ошибок ядерных данных с получением дисперсии расчетного коэффициента размножения, вызванной неопределенностями всего массива ядерных данных, используемого в расчетах.

Суммарная неопределенность оцененных ядерных данных библиотеки приводит к неопределенности, равной 0,71 %. Основной вклад в данную неопределенность вносит неопределенность ядерных данных для изотопа ^{235}U – формы спектра нейтронов деления, полной множественности нейтронов деления, сечения реакции (n, γ) и т. д. Значительное влияние на расчетный коэффициент размножения оказывают также ядерные данные для изотопов меди, а также других конструкционных элементов ТВЭЛов (^{56}Fe), входящих в состав активной зоны.

В работе получена формула, позволяющая оценивать влияние отклонений состава и геометрии ТВЭЛов в ТВС ПИК-2 на эффективный коэффициент размножения нейтронов реактора. Расчетные коэффициенты чувствительности позволяют оценивать влияние содержания гадолиния в стержнях выгорающего поглотителя, а также



Активная зона реактора ПИК на основе ТВС ПИК-2:

- 1 – поглощающие шторки из гафния;
- 2 – стержни выгорающего поглотителя крестообразного и полуцилиндрического профилей на основе $Gd_2O_3 + ZrO_2$;
- 3 – циркониевые чехлы тепловыделяющих сборок;
- 4 – твэлы с топливной загрузкой 0,38 номинала;
- 5 – твэлы с топливной загрузкой 0,69 номинала;
- 6 – твэлы с увеличенным номинальным содержанием топлива;
- 7 – тепловыделяющие сборки с образцами-свидетелями применяемых конструкционных материалов;
- 8 – облучаемые образцы

разбавления воды в отражателе на эффективный коэффициент размножения нейтронов.

Прямые сравнительные расчеты эффективного коэффициента размножения нейтронов для реактора ПИК с использованием библиотек ENDF/B-7.0 и РОСФОНД-2010 дают разность

эффективных коэффициентов размножения для двух библиотек 0,35 %. Это не превышает суммарную расчетную неопределенность коэффициента размножения, вычисленную для библиотеки ENDF/B-7.1, 0,71 %.

Оперативная графическая обработка данных химического контроля водных теплоносителей реактора ПИК

Т. В. Воронина, Е. С. Виноградова, С. Н. Кузнецова

Управление эксплуатации комплекса ядерных установок
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Важным условием обеспечения водно-химического режима ядерной установки является достоверный и оперативный химический контроль (ХК) теплоносителей, в т. ч. теплоносителей вспомогательных систем: основного промконтра (ОПК), аварийного промконтра (АПК), автономного промконтра (АвтоПК), системы железобетонной защиты реактора (ЖВЗ) и бассейна выдержки кассет (БВК). В условиях ввода в эксплуатацию исследовательского реактора ПИК при регулярном выполнении многочисленных технологических операций состояние теплоносителей нестабильно. С целью выявления тенденций в изменении качества теплоносителей в лаборатории производственного химического режима НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ с 2023 г. в тестовом режиме организована оперативная графическая обработка результатов химического анализа.

Такая обработка данных ХК позволила выявлять и исключать ошибки отбора и анализа проб благодаря отслеживанию изменения качества теплоносителей во времени, а в случае стабильного ухудшения химических показателей – своевременно информировать об этом оперативный персонал реактора ПИК. Дополнительным результатом работы стало обнаружение корреляций между контролируемыми химическими показателями.

На основании результатов ХК практически для всех легководных систем реактора ПИК установлена корреляция между концентрацией железа и прозрачностью (рис. 1):

- если $C_{Fe} < 20$ мкг/дм³, то ПР = 100 % с погрешностью 1 %;
 - если $C_{Fe} \geq 20$ мкг/дм³, то ПР = $100 - 0,093 \cdot (C_{Fe} - 20)$ %,
- где ПР – прозрачность, %; C_{Fe} – концентрация железа, мкг/дм³.

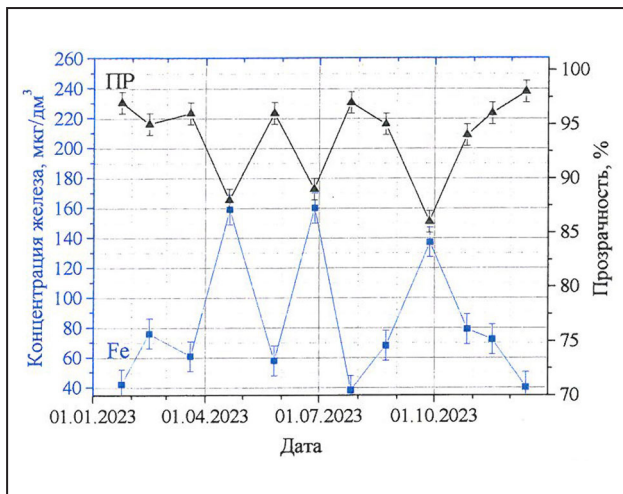


Рис. 1. Корреляция между железом и прозрачностью в теплоносителе основного промконтра

Также по результатам ХК теплоносителей за 2023–2024 гг. установлено влияние солей жесткости и анионов на величину удельной электропроводности. Для теплоносителей АПК, ОПК и АвтоПК значение удельной электропроводности определяется общей жесткостью (рис. 2). Экспериментально полученная зависимость электропроводности от общей жесткости может быть описана уравнением

$$\chi = 0,09 \cdot \text{ОЖ} + 1,4,$$

где χ – удельная электрическая проводимость, мкСм/см; ОЖ – общая жесткость теплоносителя, мкг-экв/дм³. Для теплоносителей контуров БВК и ЖВЗ на величину удельной электропроводности влияют ионные компоненты теплоносителя.

Проведенное исследование позволило:

- организовать экспресс-контроль чистоты теплоносителей по двум показателям качества: удельной электропроводности и прозрачности, которые позволяют сделать предварительное за-

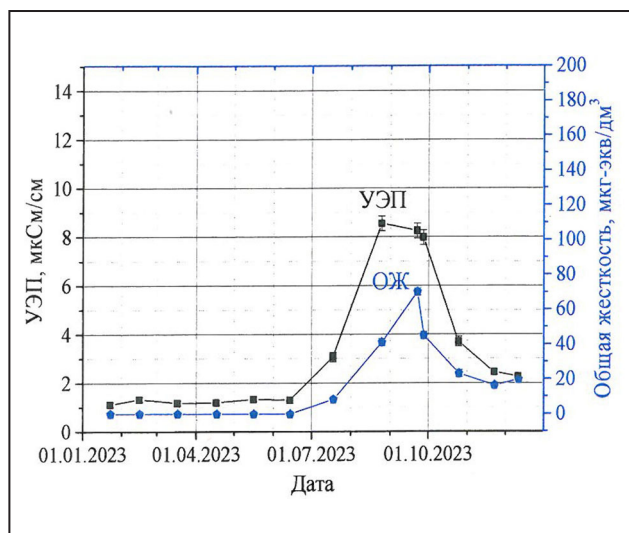


Рис. 2. Корреляция между удельной электрической проводимостью и общей жесткостью теплоносителя в теплоносителе аварийного промконтура

ключение о значениях зависимых от них показателей, для определения которых требуется длительное время;

- оперативно информировать персонал реактора о негативных тенденциях изменения качества теплоносителей, что обеспечивает своевременные и обоснованные решения о замене или очистке воды;

- показать, что в зависимости от чистоты теплоносителя наибольший вклад в величину удельной электропроводимости вносят:

- 1) концентрация анионов – для контуров с удельной электропроводимостью менее 3 мкСм/см,

- 2) соли жесткости – для контуров с удельной электропроводимостью более 3 мкСм/см.

Анализ эффективности измерения радиометра WILMA

Т. В. Воронина, П. А. Григорьев, А. А. Каверзина

Управление эксплуатации комплекса ядерных установок
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

На реакторе ПИК в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ предусмотрен непрерывный дистанционный мониторинг теплоносителя контура тяжеловодного отражателя (ТВО). Одним из контролируемых показателей является объемная активность трития. Онлайн-измерение проводится с помощью проточного радиометра WILMA и проточной твердосцинтилляционной кюветы. Прибор оснащен кюветами двух типов: твердосцинтилляционной (объем 200 и 400 мкл) и жидкосцинтилляционной.

За время эксплуатации (с 2017 г.) радиометра твердосцинтилляционная кювета объемом 400 мкл вышла из строя. С 2021 г. используется кювета объемом 200 мкл. Для этой кюветы (200 мкл) выполнили анализ градуировочных зависимостей с 2019 по 2024 год и установили, что

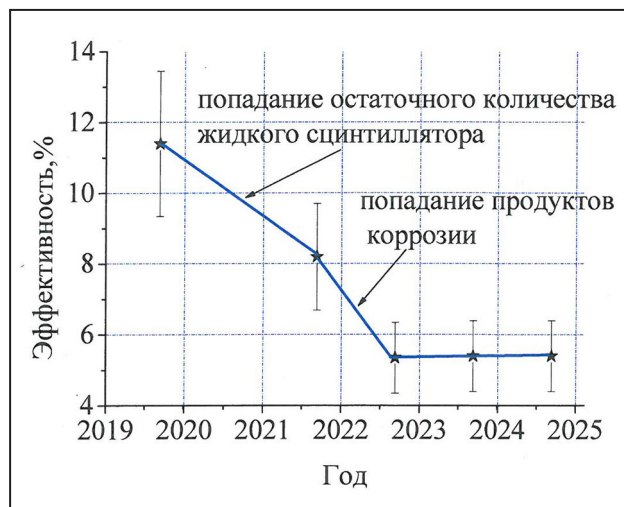
- при хранении (2019–2021) эффективность измерений снизилась с 11,4 до 8,2 % (в 1,4 раза),

- за время эксплуатации (2021–2023) эффективность измерений снизилась с 8,2 до 5,4 % (в 1,5 раза).

Причинами снижения эффективности измерения объемной активности трития на проточной твердосцинтилляционной кювете радиометра WILMA являются слипание и загрязнение его частиц. Однако начиная с 2022 г. эффективность измерений на радиометре с проточной кюветой объемом 200 мкл не изменяется и составляет не менее 5 %.

Минимально определяемая объемная активность трития на проточном радиометре WILMA (кювета объемом 200 мкл) составляет $2,1 \cdot 10^6$ Бк/дм³, а объемная активность трития в теплоносителе ТВО в настоящее время довольно высокая (более 10^7 Бк/дм³), что позволяет выполнять контроль данного показателя при такой эффективности счета (рис.).

В дальнейшем при снижении эффективности твердосцинтилляционной кюветы для контроля придется использовать жидкосцинтилляционную кювету, но нужно учитывать, что при работе с жидким сцинтиллятором объем пробы с тяжелой водой переходит в жидкие радиоактивные отходы.



Изменение эффективности измерений на радиометре WILMA от времени

Разработка технологического процесса и создание установки по изготовлению тяжелой воды методом однотемпературного изотопного обмена в системе «вода – водород»

И. А. Алексеев¹, А. А. Брык¹, Т. В. Васянина¹, Т. И. Вавилова¹, Р. Г. Вербин¹,
Д. Л. Голомзин¹, А. Ф. Ким¹, Д. А. Кузьмин¹, А. Ю. Лебедев¹, А. Э. Леонов¹, А. К. Литвинов¹,
П. С. Мезь¹, Ю. П. Романов¹, Т. М. Смирнов¹, С. В. Трифонов¹, О. А. Федорченко¹,
А. Г. Фирсов², И. В. Шушков¹

¹ Отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Инжиниринговый центр «Нейтронные технологии» НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Тяжелая вода, дейтерий и его соединения нашли широкое применение в различных областях науки и промышленности. Основной областью их потребления являются ядерные технологии, но сфера применения расширяется, распространяется на оптику, микроэлектронику, фармацевтику, и в будущем потребность будет неуклонно расти.

Однако в России сегодня отсутствует промышленное получение дейтерированной воды из природного сырья. В связи с этим Минпромторгом РФ поставлена задача разработать современные энергоэффективные технологии получения тяжелой воды высокого качества из природного сырья.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ по договору с НИЦ «Курчатовский институт» № 718-800-2/2024 (по теме «Дейтерий») в рамках решения этой задачи создана установка мини-ЭВИО, предназначенная для отработки технологии получения тяжелой воды из тяжеловодного концентрата с атомной долей дейтерия от 1,50 до 10 % и получения газообразного дейтерия. Установка, технологическая схема которой показана на рисунке, основана на процессах изотопного обмена в системе «вода – водород» на гидрофобном катализаторе и электролиза воды. Основными частями установки являются колонна каталитического изотопного обмена на КИО4 внутренним диаметром 51 мм и высотой 6,0 м и электролизная установка с твердополимерным электролитом ТПЭ с производительностью по водороду до 0,67 м³/ч.

В состав установки также входят емкостное и теплообменное оборудование, система под-

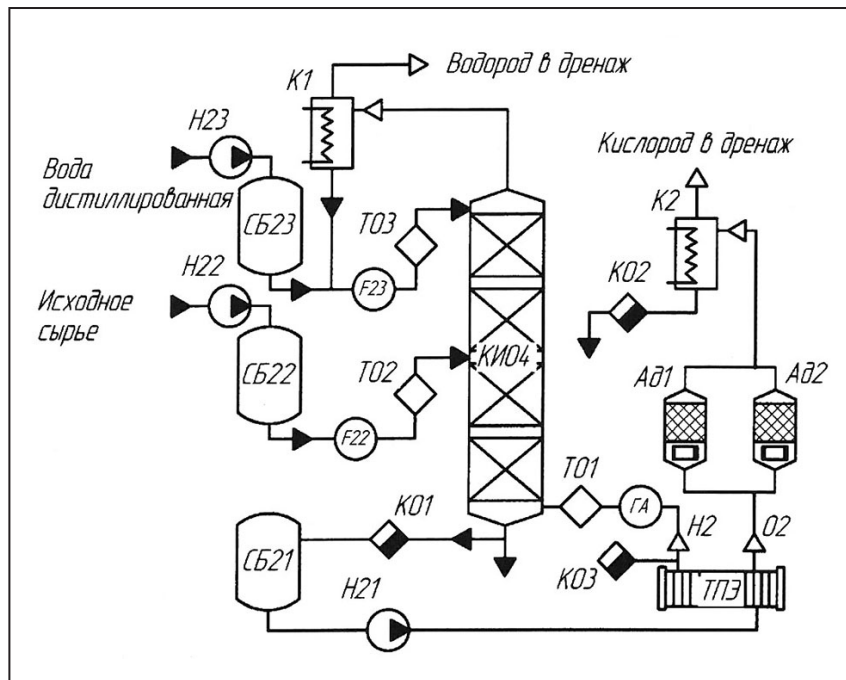
держания заданной температуры в колонне и теплообменниках (греющий контур), адсорберы для осушки кислорода, система подачи газообразного азота для продувок, контрольно-измерительные приборы и автоматика (КИП и А), компьютерная система сбора и хранения информации.

При создании установки был внедрен ряд новых идей по аппаратурному оформлению технологического процесса, его автоматизации, сбора и хранения информации, использованы новые модификации приборов КИП и А. В кратчайшие сроки были приобретены аппараты, приборы и материалы. Выполнен монтаж установки.

Установка мини-ЭВИО запущена для демонстрационной эксплуатации, в процессе которой была получена тяжелая вода с концентрацией дейтерия 99,9 % из сырья с содержанием дейтерия 1,56 %. Подготовлена и передана заказчику конструкторская и эксплуатационная документация. В декабре 2024 г. состоялась приемка работы комиссией Минпромторга России, которая отметила высокий уровень ее выполнения.

В дальнейшем планируется использовать установку для отработки технологии разделения изотопов водорода и получения исходных данных для проектирования узла конечного концентрирования тяжелой воды на производстве тяжелой воды из природного сырья, а также получения кондиционной тяжелой воды и дейтерия с пониженным содержанием трития.

Авторы выражают признательность коллегам из Курчатовского комплекса химических исследований и ИП Селиваненко.



Принципиальная технологическая схема установки мини-ЭВИО:
 КИО4 – колонна каталитического изотопного обмена;
 ТПЭ – электролизная установка с твердополимерным электролитом;
 СБ21–СБ23 – емкости для продукта (тяжелой воды), сырья и дистиллированной воды;
 Н21–Н23 – насосы;
 Т01–Т03 – теплообменники;
 F22–F23 – расходомеры;
 К01–К03 – конденсатоотводчики;
 АѰ1–АѰ2 – адсорберы;
 К1–К2 – конденсаторы

Повышение радиационной стойкости микроконтроллеров к воздействию высокоэнергетичных протонов с помощью радиационно-термической обработки

Е. М. Иванов¹, Д. А. Амерканов¹, А. А. Мещеряков², А. С. Дренин²,
Р. Ю. Сирбаев², Д. С. Селин², П. Б. Лагов^{2, 3, 4}, Ю. С. Павлов³, Т. В. Кулевой⁵,
В. С. Столбунов⁵, Е. П. Романтеева⁴, К. К. Петров⁴

¹ Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² АО «Российские космические системы»

³ Институт физической химии и электрохимии РАН

⁴ Национальный исследовательский технологический университет МИСиС

⁵ НИЦ «Курчатовский институт»

Исследовано влияние радиационно-термической обработки (РТО) на радиационную стойкость кремниевого микроконтроллера, изготовленного по технологическому процессу на основе КМОП-структур с топологической нормой 0,18 мкм. Показано, что после проведения РТО, включающей облучение электронами с энергией 6 МэВ дозой до 1 000 кГр и последующий термический отжиг при температуре 190 °С в течение 2 ч, комплекс электрических параметров микроконтроллера сохраняется в рамках технических условий. Экспериментально установлено, что после РТО происходит повышение стойкости микроконтроллера к тиристорному эффекту при воздействии высокоэнергетичных протонов (ВЭП) с энергией 22 и 1 000 МэВ, что выражается в уменьшении сечения тиристорного эффекта в 6–10 раз и амплитуды тока ионизационного отклика в 3,5 раза (рис.).

Микроконтроллеры, изготовленные по обычной технологии и с использованием РТО, были впаяны в два идентичных телеметрических прибора, содержащих схему защиты по току с автоматической перезагрузкой питания для парирования тиристорного эффекта и предотвращения катастрофического отказа. Микроконтроллеры в составе приборов подвергались облучению протонами 1 000 МэВ на ядерно-физической установке «Синхроциклотрон СЦ-1000». Облучение производилось «напролет». Сечение тиристорного эффекта определялось как отношение числа зарегистрированных эффектов к суммарному флюенсу протонов ($\sigma = N_{\text{ТЭ}} / \Phi_{\Sigma}$).

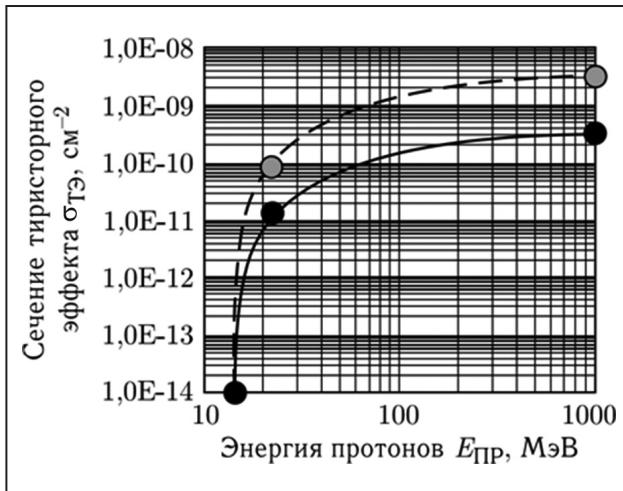
В результате установлено, что применение РТО позволяет снизить сечение тиристорного эффекта в микроконтроллерах при воздействии протонов с энергией 1 000 МэВ в 9,7 раза.

Уменьшение сечения тиристорного эффекта в КМОП-микроконтроллере связано с уменьшением $h_{21Б}$ паразитных транзисторов, образующих тиристорную структуру. Для включения тиристорной структуры необходимо выполнение условия для суммарного дифференциального коэффициента передачи тока транзистора

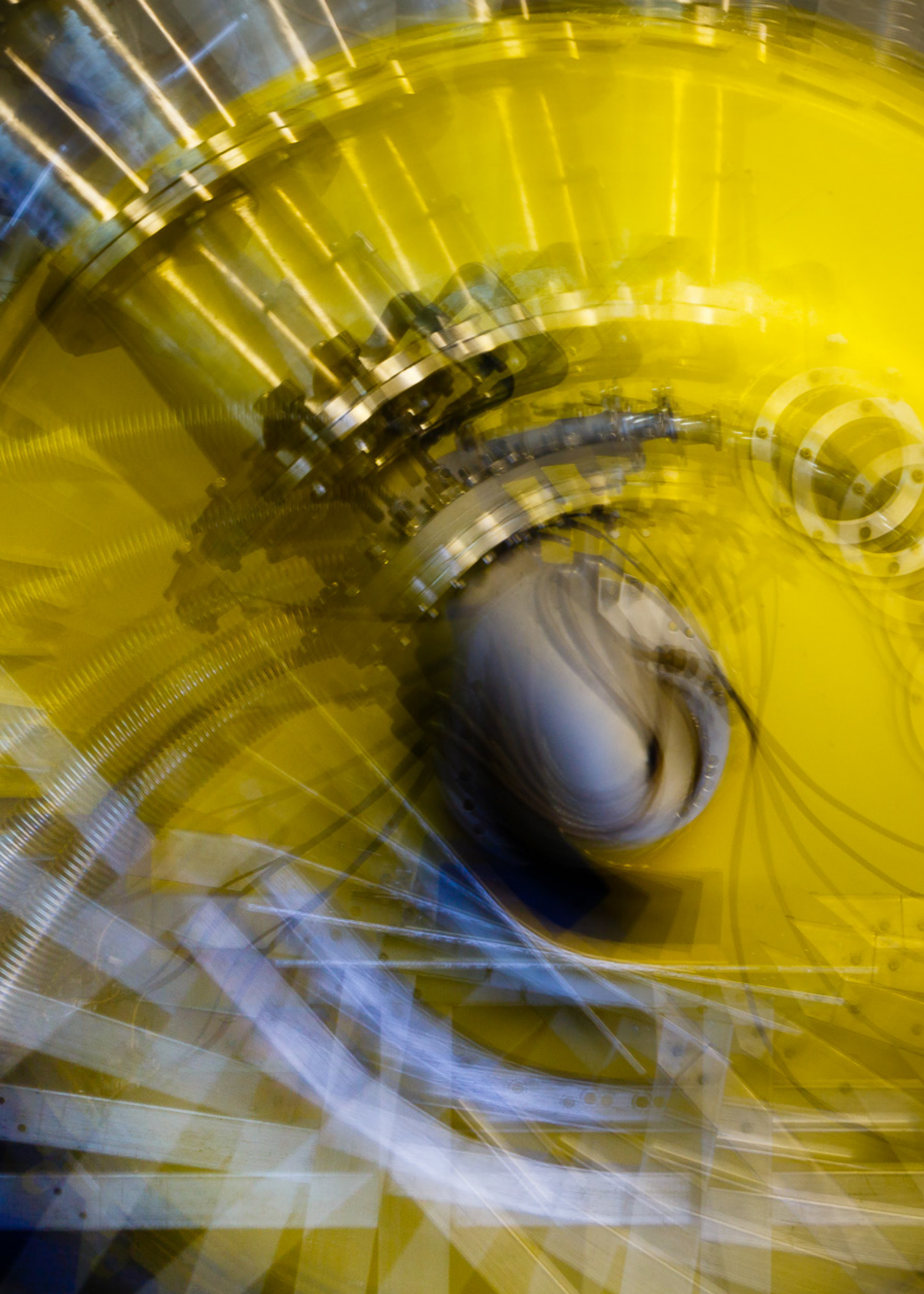
$$h_{21Б} = h_{21Б1} + h_{21Б2} > 1,$$

где $h_{21Б1}$ и $h_{21Б2}$ – коэффициенты передачи тока паразитных транзисторов, формирующих тиристорную структуру.

Следовательно, снижение диффузионной длины и времени жизни в базовых областях паразитных транзисторов требует более высокого уровня инжекции для включения тиристорной структуры в кристалле микроконтроллера в результате локального радиационного воздействия ВЭП. Поскольку при воздействии ВЭП передача энергии в результате ядерных реакций и торможения вторичных частиц происходит с разной передачей энергии и генерацией/инжекцией различных количеств неравновесных носителей заряда, то, соответственно, часть взаимодействий, которые сопровождаются меньшим количеством выделения энергий, не приводит к включению тиристорной структуры, и сечение тиристорного эффекта снижается, что и наблюдается экспериментально.



Зависимость сечения тиристорного эффекта от энергии высокоэнергетических протонов (штриховая линия – исходные образцы; сплошная линия – образцы после радиационно-термической обработки)



Базовые установки

- 162 Синхроциклотрон НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
- 164 Разработка проекта универсальной ловушки для хранения ультрахолодных нейтронов
- 165 Детекторы нейтронов с конвертером B_4C
- 166 Первые нейтронные измерения на рефлектометрах TNP и NERO-2
- 167 Моделирование оптических параметров сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторов с органическим световодом
- 168 Прототип позиционно-чувствительного сцинтилляционного детектора нейтронов на основе SiMP и ZnS/Li^6
- 169 Исследования прототипа позиционно-чувствительного детектора нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей
- 170 Изготовление нейтронных станций для реакторного комплекса ПИК

Синхроциклотрон НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Д. А. Амерканов, С. А. Артамонов, Е. М. Иванов

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Одной из базовых экспериментальных установок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ является синхроциклотрон СЦ-1000, запущенный в ноябре 1967 г. Распоряжением правительства России № 2125-р от 30.12.2009 он объявлен уникальной установкой РФ. Синхроциклотрон ускоряет протоны до энергии 1 000 МэВ с током внутреннего пучка 3 мкА и с током выведенного пучка 1 мкА. С 2015 г. реализована возможность получения с помощью замедлителя протонных пучков переменной энергии с шагом 100 МэВ, начиная от 100 МэВ и до 900 МэВ. Кроме того, на синхроциклотроне реализована возможность получения пучков частиц второго и третьего поколений: π - и μ -мезонных пучков обоих знаков, а также пучка нейтронов.

Уникальность ускорителя НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ определяют не только указанные параметры и возможности самого синхроциклотрона (энергия, интенсивность, временная структура пучка), но и созданные за годы его функционирования вновь разработанные экспериментальные установки и комплексы:

- мюонный канал и μ SR-установка,
- π 1-мезонный канал высоких энергий,
- π 2-мезонный канал низких энергий,
- масс-сепараторный комплекс ИРИС,
- нейтронный времяпролетный спектрометр ГНЕЙС,
- магнитный анализатор пролетный,
- комплекс радиационных испытаний электронной компонентной базы на радиационную стойкость в протонных и нейтронных пучках,
- замедлитель протонного пучка.

В настоящий момент время работы ускорителя лимитируется техническим состоянием систем, количеством сменных групп службы управления (пульт).

На рисунке 1 показана динамика работы синхроциклотрона в 2024 г. К сожалению, в мае – июне ускоритель преследовали вакуумные течи, что потребовало интенсивной работы персонала по их устранению и в ноябре – декабре. На рисунке 2 показано распределение времени работы различных групп исследователей РФ на синхроциклотроне в 2024 г.

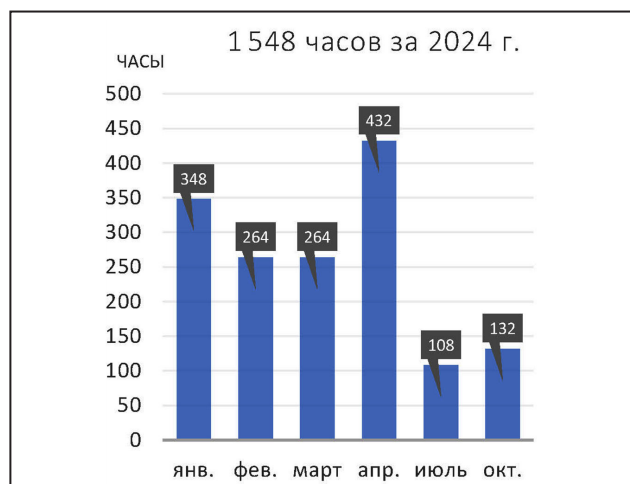


Рис. 1. Динамика работы синхроциклотрона СЦ-1000 в 2024 г.

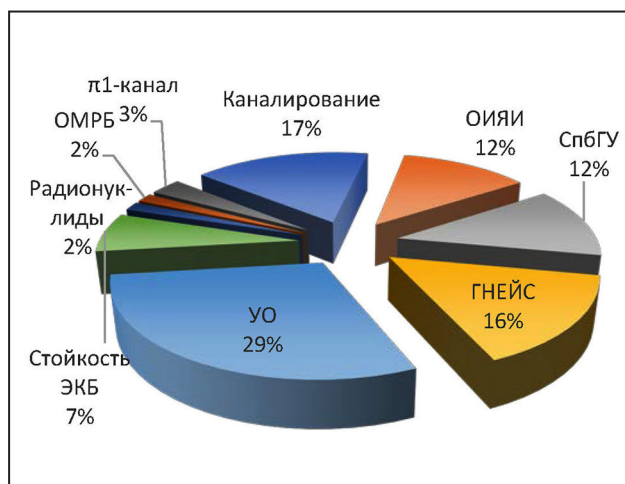


Рис. 2. Распределение времени работы СЦ-1000 по различным направлениям исследований в 2024 г.

Следует отметить возрастающую востребованность пучков протонов с энергией 100–1 000 МэВ среди исследователей РФ, что привело к расширению географии пользователей услугами синхроциклотрона СЦ-1000. Так, помимо традиционных исследователей – ОФВЭ – протонными пучками синхроциклотрона в 2024 г. воспользовались ОМРБ, ОПР, Санкт-Петербургский государственный университет, Объединенный институт ядерных исследований, АО «НИИ КП», ООО «НПЦ «Гранат» и др. В 2024 г. заключено и выполнено силами ускорительного отдела договоров на ~ 11,8 млн руб.

Кроме того, ускорительным отделом совместно с сотрудниками лаборатории физики и техники ускорителей опубликованы шесть работ раз-

личной значимости. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. В рамках LVI Зимней школы ПИЯФ была организована и проведена секция ядерной медицины и физики ускорителей, где сотрудниками отдела и приглашенными лекторами прочитано 25 лекций. Продолжается разработка теоретических методов, алгоритмов и программ для исследования динамических процессов в изохронном циклотроне Ц-80.

Для дальнейшей эксплуатации остро встает вопрос модернизации систем СЦ-1000, т. к. синхроциклотрон остается востребованным научным инструментом с уникальными протонным пучком, пучками вторичных частиц и установками.

1. Амерканов Д. А., Артамонов С. А., ..., Иванов Е. М. и др. // Матер. научн.-техн. семина. «Дозиметрия и радиационное материаловедение», 2024. С. 5–9.
2. Shaginyan V.R., ..., Artamonov S.A. // Crystals. 2024. V. 14. Iss. 9. P. 826.
3. Программа моделирования динамики заряженной частицы в магнитном и электрическом полях изохронного циклотрона: свид. о гос. рег. прогн. для ЭВМ № 2024689946 / Артамонов С. А.; дата гос. рег. 11.12.2024.

Разработка проекта универсальной ловушки для хранения ультрахолодных нейтронов

А. П. Серебров, А. К. Фомин, Г. Н. Ключников, А. О. Коптюхов, А. Н. Мурашкин

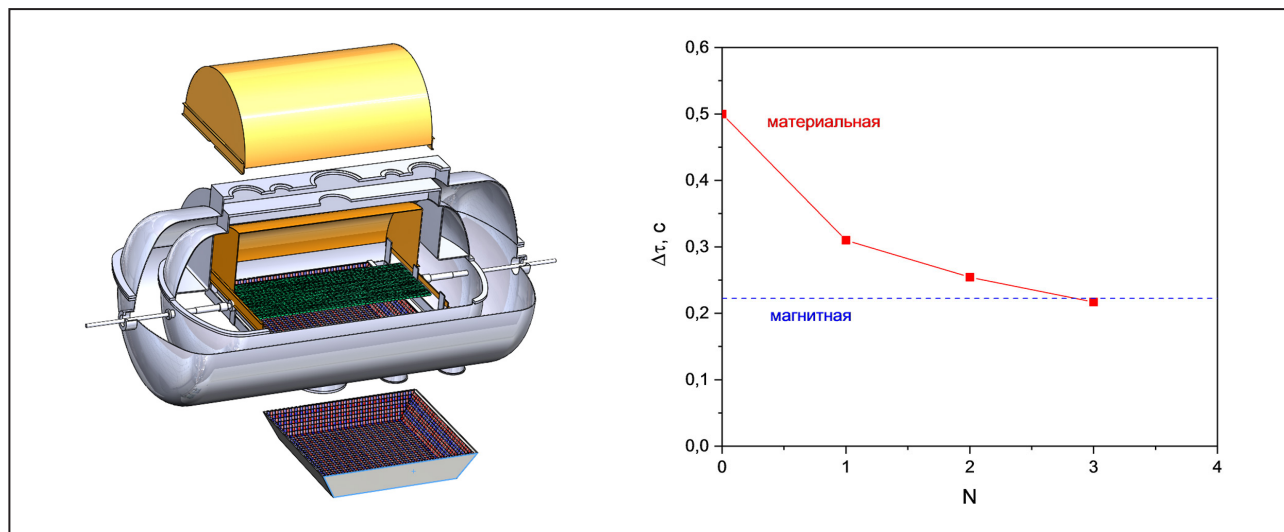
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Проект предполагает, что в одной установке на одной оси размещаются две ловушки: материальная и магнитная. Вращая систему ловушек вокруг оси, можно осуществлять гравитационный захват ультрахолодных нейтронов (УХН) либо в материальную, либо в магнитную ловушку. Таким образом, на одной установке можно сравнить материальное и магнитное хранение УХН в одинаковых условиях (рис.). Важно также отметить, что эти два метода измерения различаются методически: в материальной ловушке время жизни нейтрона получается в результате экстраполяции, а в магнитной ловушке оно измеряется прямым образом. Такая схема измерений позволит избавиться от ряда систематических

погрешностей измерений с различными ловушками и предлагается впервые.

Гравитационный захват УХН в магнитную ловушку, предложенный в проекте, является принципиально новым подходом, который ранее никогда не реализовывался. Рассмотрены возможные систематические эффекты, обусловленные деполяризацией нейтронов и турбинным эффектом в магнитной ловушке. Определена чувствительность эксперимента на строящемся источнике УХН на реакторе ПИК. Разработаны проект установки и план ее размещения в главном реакторном зале.

Исследование выполнено при поддержке РНФ, грант № 23-22-00169.



Дизайн установки с универсальной ловушкой ультрахолодных нейтронов (слева). Сверху и снизу дополнительно показаны материальная и магнитная ловушки, вынесенные за пределы установки. Относительная точность измерения времени жизни нейтрона с применением материальной ловушки в зависимости от количества вставок (справа). Пунктирной линией показана точность измерения с магнитной ловушкой при аналогичных условиях

1. Fomin A.K., Serebrov A.P. // Instrum. Exp. Tech. 2024. V. 67. No. 2. P. 210–218.
2. Serebrov A.P., Fomin A.K., Klyushnikov G.N. et al. // J. Surf. Investig.: X-Ray, Synchr. Neutron. Tech. 2024. V. 18. No. 4. P. 913–919.

Детекторы нейтронов с конвертером B_4C

Д. С. Ильин

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

С 2000-х гг. на фоне ^3He -кризиса начали бурно развиваться гибридные технологии газоразрядных детекторов с тонкопленочными конвертерами нейтронов, в т. ч. из карбида бора. Мощным стимулом стало кардинальное повышение требований к производительности детекторов для новых импульсных источников нейтронов ESS (Швеция), ISIS (Великобритания), J-PARC (Япония), где ^3He -детекторы зачастую становятся малоэффективными. Результатом усилий ведущих научных центров стало новое детекторное направление, которое находит применение также в области радиационного контроля и мониторинга.

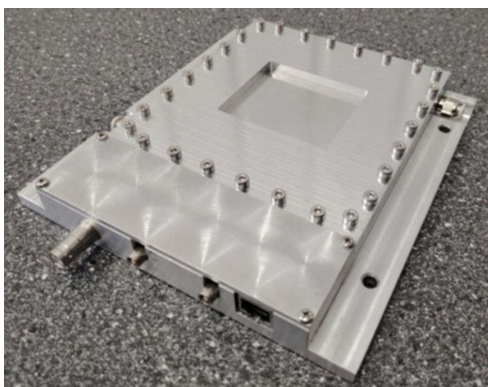
Особенностью применения тонкопленочного конвертера B_4C является независимость эффективности регистрации от состава газовой смеси и ее давления. Детекторы работают при продуве газовой смеси, имеют высокую радиационную стойкость и быстродействие, нетребовательны к вакуумной чистоте материалов, требования по герметичности становятся второстепенными.

Ввиду перспективности B_4C -технологии в отделе детекторов излучений Отделения физики высоких энергий проводятся поисковые работы по изучению гибридных детекторов для дальнейшего применения на высокопоточном реакторе ПИК. Был разработан и изготовлен монитор трансмиссионного типа для спин-эхо-спектрометра SEM с входным окном 60×60 мм (рис. а).

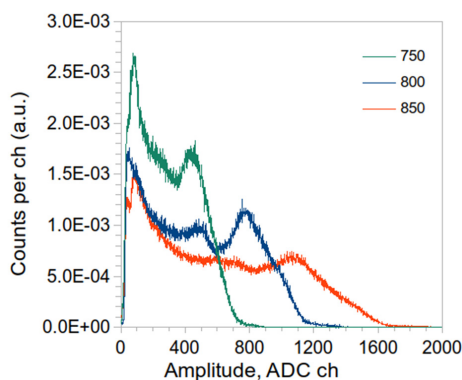
Монитор прошел испытания в лабораторных условиях на источнике ^{252}Cf . Вид получаемых спектров, показанный на рис. б, – «типичный» и обусловлен регистрацией в многопроволочной пропорциональной камере продуктов реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, выходящих из слоя B_4C : α (1,47 МэВ) и ^7Li (0,84 МэВ) – 94 % событий, α (1,78 МэВ) и ^7Li (1,01 МэВ) – 6 %.

Мощный первичный заряд ионизации ~ 5 –6 фКл позволяет работать при газовом усилении < 20 , что обеспечивает монитору очень низкую чувствительность к γ -излучению, требуемую для эксплуатации на пучке нейтронов.

а)



б)



Фотография монитора (а); амплитудные спектры от источника ^{252}Cf (нормировка на число событий), измеренные мотором SEM при напряжениях на аноде HV_a : 750, 800 и 850 В (б). Газ – 90 % Ar + CO_2

Терентьев К. Ю., Ильин Д. С., Пшеничный К. А., Тарнавич В. В. Монитор тепловых нейтронов с конвертером B_4C для спин-эхо-спектрометра SEM: станд. докл. // Молодежн. школа по физике конденсированного состояния (Школа ФКС – 2025). Рошино, 2025.

Первые нейтронные измерения на рефлектометрах ТНР и NERO-2

М. В. Дьячков¹, В. А. Матвеев¹, В. Г. Сыромятников², В. В. Тарнавич², В. А. Ульянов¹

¹ Инжиниринговый центр «Нейтронные технологии» НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В работе кратко описаны основные узлы нейтронных рефлектометров ТНР и NERO-2, установленных в зале горизонтальных экспериментальных каналов реактора ПИК (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ) в рамках программы по вводу в эксплуатацию первых пяти станций приборной базы реактора (ПБ РК ПИК). Нейтронные рефлектометры ТНР и NERO-2 предназначены для проведения исследований магнитных и немагнитных многослойных наноструктур, включая аттестацию нейтронно-оптических элементов для нейтронных станций ПБ РК ПИК. На ТНР реализована возможность работы в режимах (модах) измерений с «белым» неполяризованным/поляризованным пучком и с монохроматическим неполяризованным/поляризованным пучком (длины волн нейтронов от 0,09 до 0,5 нм). NERO-2 – рефлектометр высокого разрешения с фиксированной длиной волны и возможностью

работы как с неполяризованным, так и с поляризованным монохроматическим пучком.

В работе обсуждены результаты первых нейтронных измерений, проведенных на этих рефлектометрах при запуске реактора ПИК на мегаваттной мощности. На рефлектометре ТНР проведено измерение образца нейтронного суперзеркала Ni/Ti ($m = 2,5$). Экспериментально определенный параметр суперзеркала $m = 2,56$ был близок к его расчетному значению при напылении $m = 2,5$ (рис. 1). На рефлектометре NERO-2 были определены параметры периодической многослойной структуры (рис. 2). Совпадение параметров наноструктуры, определенных с использованием рефлектометрии нейтронов и рентгеновского излучения, свидетельствует о достоверности результатов и правильной работе нового нейтронного рефлектометра NERO-2.

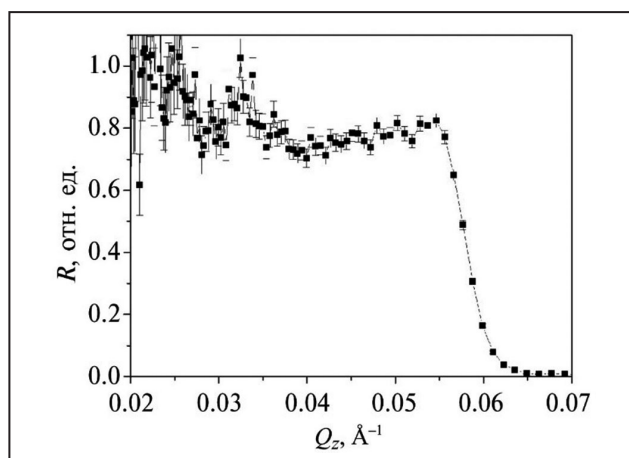


Рис. 1. Кривая зависимости коэффициента отражения R от нормальной компоненты переданного импульса Q_z для образца суперзеркала Ni/Ti ($m = 2,5$)

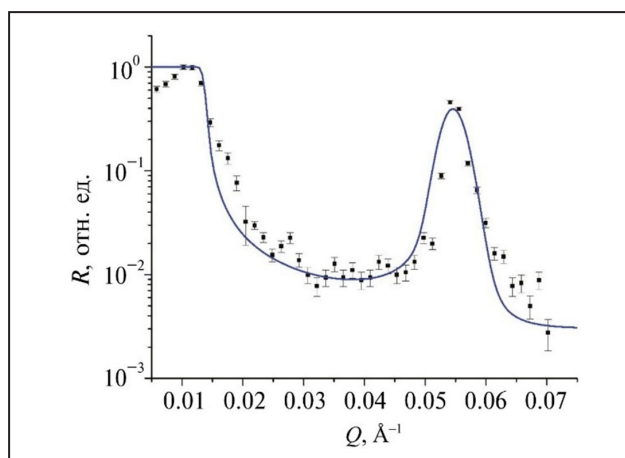


Рис. 2. Кривая зависимости коэффициента отражения нейтронов R от величины переданного импульса q , полученная для периодической структуры NiMo (60 Å)–Ti (60 Å) 60 пар слоев

Моделирование оптических параметров сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторов с органическим световодом

Д. Н. Трунов¹, В. Н. Марин¹, Е. В. Алтынбаев¹, Т. И. Глушкова¹, Р. А. Садыков²

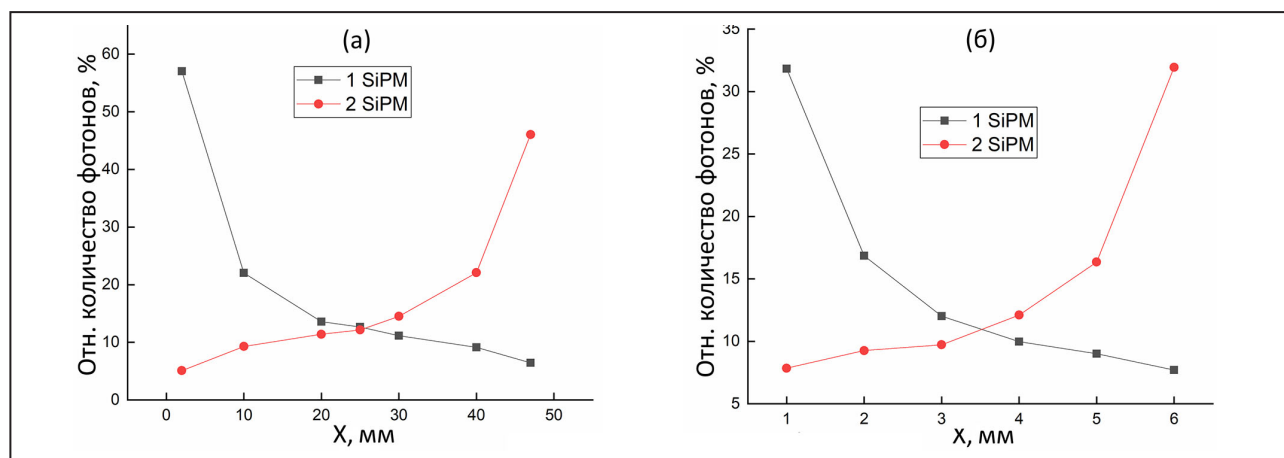
¹ Инжиниринговый центр «Нейтронные технологии» НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Институт ядерных исследований РАН

Описан новый метод определения координаты в позиционно-чувствительных детекторах с органическим световодом и кремниевыми фотомножителями. Этот метод отличается от использовавшихся ранее смещающих спектр волокон или матрицы из светочувствительных элементов. Он основан на поглощении фотонов в объеме световода и уменьшении количества фотонов. В зависимости от длины пробега меняется количество фотонов, падающих на поверхность кремниевого фотомножителя. Проведено моделирование оптических параметров одномерного позиционно-чувствительного детектора и показано влияние покрытия световода на количество света. Также проведено моделирование двумерного позиционно-чувствительного детектора двух видов, определены оптические параметры и соотношения интенсивностей излучения различных концов световода (рис.). Описана методика

получения карт соотношений интенсивностей и особенности их использования для определения координаты. Обозначены основные особенности изготовления детекторов данного типа и их влияние на разрешение итогового детектора.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что данный метод определения координаты можно реализовать в детекторах нейтронов. В качестве покрытия детектора рекомендуется использовать диффузионный отражатель, т. к. его использование позволяет значительно увеличить сбор света. При проектировании детекторов одним из важных параметров является расстояние между кремниевыми фотомножителями: чем оно меньше, тем больше света и тем большее соотношение интенсивностей позволяет получить лучшее разрешение. Разработанный метод позволяет изготавливать дешевые позиционно-чувствительные детекторы на основе сцинтиллятора.



Процентное соотношение зарегистрированных фотонов от общего количества фотонов: первая модель (а); вторая модель (б)

1. Трунов Д. Н., Марин В. Н., ..., Алтынбаев Е. В. // Междунар. научн.-исслед. журн. 2024. Вып. 11 (149).

DOI: 10.60797/IRJ.2024.149.130

2. Трунов Д. Н. Сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе кремниевых фотомножителей и органического световода: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИЯИ РАН, 2024. 135 с.

Прототип позиционно-чувствительного сцинтилляционного детектора нейтронов на основе SiMP и ZnS/Li⁶

Д. Н. Трунов¹, В. Н. Марин¹, Е. В. Алтынбаев¹, Т. И. Глушкова¹, Р. А. Садыков², С. Н. Аксенов²

¹ Инжиниринговый центр «Нейтронные технологии» НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Институт ядерных исследований РАН

Описан новый метод определения координаты в позиционно-чувствительных детекторах. Также представлен прототип нового позиционно-чувствительного сцинтилляционного детектора нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей и органического стекла.

В качестве метода определения области регистрации частиц использован метод разделения и ослабления фотонов в объеме световода (рис. 1). Проведено оптическое моделирование распространения фотонов в сцинтилляционном детекторе, а также моделирование и сравнение числа фотонов для различных типов отражающих поверхностей (диффузных или зеркальных).

По результатам моделирования диффузный отражатель показывает более высокий коэффициент разделения фотонов, что может быть использовано для улучшения параметров определения разрешения. Кроме того, диффузный отражатель показывает большее количество фотонов, падающих на кремниевые фотоумножители.

На основе модели спроектирован прототип сцинтилляционного детектора с одним слоем

сцинтиллятора и двумя кремниевыми фотоумножителями по краям. В качестве сцинтиллятора используется слой ZnS(Ag)/⁶Li с эффективностью 42 % и размером 5 × 50 мм. В качестве световода используется оргстекло с пропусканием 92 %. Поверхность световода обернута лентой из фторопласта-4, которая служит диффузным отражателем. Габариты готового детектора составляют 5 × 5 × 60 мм.

Испытания детектора (рис. 2) демонстрируют возможность получения координат с помощью двух кремниевых фотоумножителей. Оценка разрешения полученного детектора ≈ 6,25 мм.

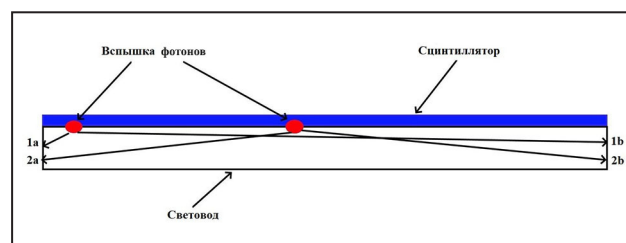


Рис. 1. Принципиальная схема определения координат: 1 – вспышка фотонов; 2 – сцинтиллятор; 3 – световод

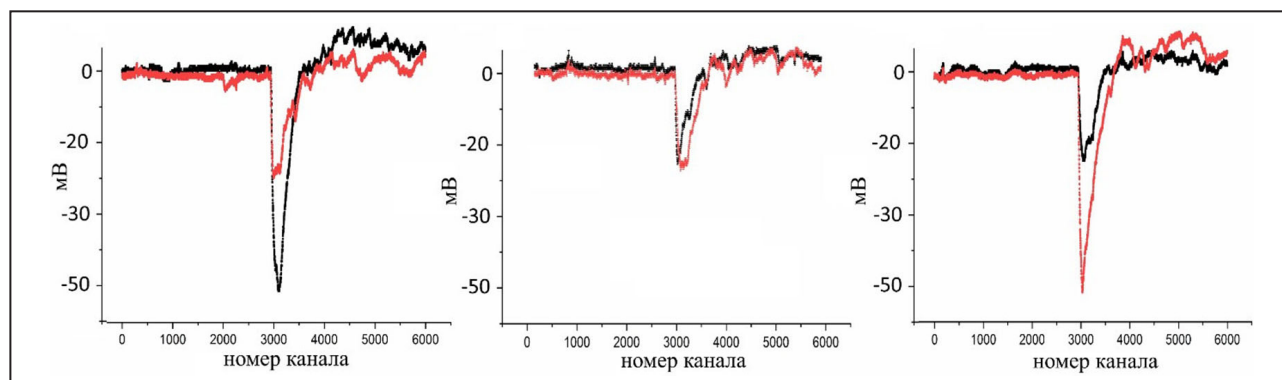


Рис. 2. Амплитуда сигналов в зависимости от расположения источника фотонов

Исследования прототипа позиционно-чувствительного детектора нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей

Д. Н. Трунов¹, В. Н. Марин¹, Е. В. Алтынбаев¹, Т. И. Глушкова¹, Р. А. Садыков²

¹ Инжиниринговый центр «Нейтронные технологии» НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Институт ядерных исследований РАН

Разработан недорогой детектор нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей и одного слоя сцинтиллятора ZnS(Ag)/⁶LiF. Для определения координаты детектор использует всего четыре кремниевых фотоумножителя (рис. 1). В качестве световода применен прозрачный органический световод на основе полиметилакрилата.

Метод определения координаты основан на анализе затухания фотонов в объеме пластикового световода. Описана структура данного типа детекторов. Проведено моделирование оптических параметров позиционно-чувствитель-

ных детекторов подобного типа и получена зависимость соотношения амплитуды противоположных кремниевых фотоумножителей (рис. 2). Определены параметры пространственного разрешения для детекторов двух размеров: 50 и 100 мм.

Полученные параметры разрешения составляют 10 и 7 мм соответственно. Предложены методы повышения разрешения подобного типа детекторов и их возможное использование для регистрации других видов излучения.

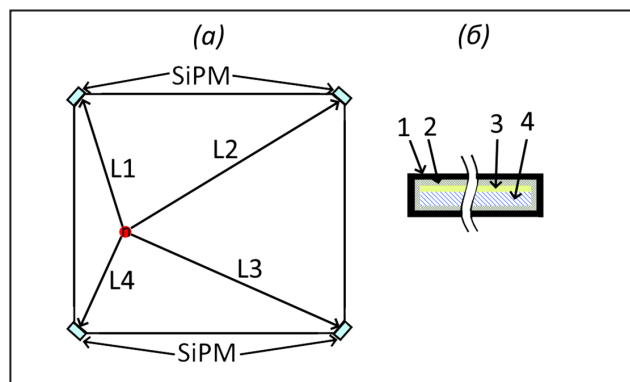


Рис. 1. Принцип метода ослабления фотонов (а): L1–L4 – длина пути, проходимая фотонами. Разрез детектора (б): 1 – внешнее защитное покрытие; 2 – диффузный отражатель; 3 – сцинтиллятор; 4 – световод

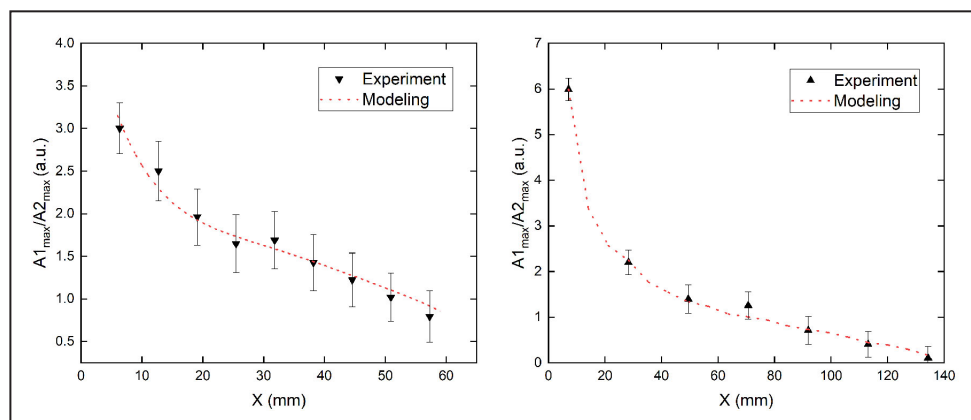


Рис. 2. Сравнение экспериментальных спектров и модельных с двух противоположных кремниевых фотоумножителей

Изготовление нейтронных станций для реакторного комплекса ПИК

Л. А. Азарова¹, Е. В. Алтынбаев², М. С. Онегин³, В. В. Тарнавич¹

¹ Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

² Инжиниринговый центр «Нейтронные технологии» НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

³ Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

На реакторном комплексе ПИК продолжается активная фаза строительства станций для нейтронных исследований в рамках реализации проекта «Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК». В декабре 2024 г. завершена предварительная сборка 11 из них. В их число вошли следующие приборы:

- приборный комплекс «Нейтрино»,
- два порошковых дифрактометра – суперпозиционный многосекционный D1 и многодетекторный D3,
- установка нейтронно-активационного анализа INAA,
- установка спин-эхо ультрамалоуглового рассеяния нейтронов SESANS,

– четырехкружный дифрактометр тепловых нейтронов DC1,

– два трехосных спектрометра нейтронов – тепловых IN1 и холодных IN2,

– масс-сепараторный лазерно-ядерный комплекс ИРИНА,

– установка измерения ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом DEDM,

– установка исследования множественности осколков деления FISCO.

На рисунке представлены фотографии некоторых станций после предварительной сборки.

В ходе создания станций в рамках импортозамещения изготовлены все их отдельные узлы: столы линейных перемещений, поворотные столы,



Нейтронные станции после предварительной сборки. Верхний ряд (слева направо): приборный комплекс «Нейтрино»; установка спин-эхо ультрамалоуглового рассеяния нейтронов SESANS; четырехкружный дифрактометр DC1. Нижний ряд (слева направо): трехосный спектрометр холодных нейтронов IN2; установка исследования множественности осколков деления FISCO; порошковый многодетекторный дифрактометр тепловых нейтронов D3

гониометры, поворотные модули, воздушные подушки.

Для четырехкружного дифрактометра DC1 изготовлен гониометр Эйлера. Разработаны и изготовлены фокусирующие устройства для монохроматоров и анализаторов станций IN1, IN2, D3, DC1. При непосредственном участии сотрудников Института совместно с подрядчиком

разработан и изготовлен испытательный стенд для отладки прикладного программного обеспечения станций и проведения испытаний их элементов и узлов в составе линейных контроллеров с набором драйверов шаговых двигателей и модулей ввода/вывода, а также управляющего компьютера. Проведены опытно-конструкторские работы по подбору состава для наливных полов.

1. Azarova L.A. Spin-Echo and Small-Angle Neutron Scattering Instruments at the PIK Reactor // Sino-Russia Meeting on Frontiers of Neutron Scattering (SRNS-2024). Ekaterinburg, 2024.
2. Altynbaev E.V. Development of Neutron Instrument Components by NRC "Kurchatov Institute" – PNPI // Sino-Russia Meeting on Frontiers of Neutron Scattering (SRNS-2024). Ekaterinburg, 2024.
3. Onegin M.S. Advanced Cold Neutron Sources at the Reactor PIK: Status and Development Prospects // Sino-Russia Meeting on Frontiers of Neutron Scattering (SRNS-2024). Ekaterinburg, 2024.
4. Tarnavich V.V. Construction of the Neutron Facility for Condensed Matter Physics on the PIK Reactor: Current State // Sino-Russia Meeting on Frontiers of Neutron Scattering (SRNS-2024). Ekaterinburg, 2024.



Научно-организационная деятельность

- 174 Количественные показатели научной и образовательной деятельности
- 184 Награды. Премии
- 190 Научные мероприятия
- 196 Дайджест новостей науки

Количественные показатели научной и образовательной деятельности

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ выполнены все мероприятия, а также достигнуты все целевые индикаторы и показатели, запланированные на 2024 г., в т. ч. за счет субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на 2024 г. и плановый период 2025 и 2026 гг.

Сотрудники Института в 2024 г. были авторами и соавторами (с учетом Филиалов Института) 1 209 статей, из них 858 публикаций проиндексированы в базе данных Web of Science («Сеть науки») и ассоциированы с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, что составляет 70,1 % от общего количества опубликованных статей.

Динамика числа публикаций, ассоциированных с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, за 5 лет

Год	Общее число публикаций / публикации, индексируемые в базе данных Web of Science
2020	674/473
2021	650/446
2022	604/383
2023	763/559
2024	1 209/858

Сотрудниками Института были сделаны более 600 докладов на более чем 150 международных и российских конференциях.

Динамика участия в научных мероприятиях за 5 лет

Год	Количество фактов участия в выставочной деятельности, конференциях, на форумах и т. д.
2020	387
2021	417
2022	472
2023	506
2024	609

Число полученных в 2024 г. международных и российских патентов, правообладателем которых является НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, по виду охраняемых документов

Объекты патентного права по виду охраняемых документов			
Патент на изобретение	Патент на полезную модель	Свидетельство на программу для ЭВМ	Всего
11	1	14	26

Динамика числа охраняемых документов, правообладателем которых является НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, за 5 лет

Вид правоохранительного документа	2020	2021	2022	2023	2024
Патент на изобретение	5	7	3	9	11
Патент на полезную модель	8	1	3	–	1
Свидетельство на программу для ЭВМ	13	19	16	14	14
Всего	26	27	22	23	26

В 2024 г. научные исследования сотрудников Института были поддержаны грантами РФ (51), также имела поддержка Министерства науки и высшего образования РФ в форме субсидии на реализацию отдельных мероприятий Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг., утвержденной Правительством Российской Федерации от 16.03.2020 № 287 в рамках национального проекта «Наука и университеты», а также субсидии на осуществление государственной поддержки создания и развития центра геномных исследований мирового уровня «Курчатовский геномный центр». Имелись 3 гранта Санкт-Петербургского научного фонда.

В 2024 г. в рамках выполнения Программы деятельности НИЦ «Курчатовский институт» на 2023–2027 гг. сотрудники Института защитили 19 кандидатских и 3 докторских диссертации.

Общая численность аспирантов на 31 декабря 2024 г. составляла 62 человека.

Сведения о лицензии на осуществление образовательной деятельности

Организация	Регистрационный номер лицензии на осуществление образовательной деятельности	Государственная аккредитация	Направления подготовки / научных специальностей
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ	Λ035-00115-47/00097282 (распоряжение о переоформлении лицензии от 28.02.2022 № 572-06)	№ 3414 от 06.07.2020 (ФГОС)	Направления подготовки: • 03.06.01 «Физика и астрономия», • 06.06.01 «Биологические науки»; научные специальности: • 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц», «Физика высоких энергий», • 1.3.3 «Теоретическая физика», • 1.3.8 «Физика конденсированного состояния», • 1.5.2 «Биофизика», • 1.5.4 «Биохимия», • 1.5.7 «Генетика», • 3.3.3 «Патологическая физиология»
Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС	№ Λ035-00115-78/00096324 20.04.2012 (ФГТ)	–	Научная специальность: • 1.4.7 «Высокомолекулярные соединения»
Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС	№ Λ035-00115-77/00620021 от 07.04.2022 (бессрочная)	№ 3620 от 09.07.2021 (срок действия до 09.07.2027)	Направления подготовки: • 04.06.01 «Химические науки», • 18.06.01 «Химическая технология»; научные специальности: • 1.4.4 «Физическая химия», • 2.6.14 «Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов»
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ	Λ035-00115-47/00097282 (приказ о внесении изменений в реестр лицензий от 22.08.2024 № 1723)	A007-00115-47/01423262 (ФГОС) (приказ от 22.08.2024 № 1723 (реорганизация))	Направления подготовки: • 03.06.01 «Физика и астрономия», • 06.06.01 «Биологические науки»; научные специальности: • 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц», «Физика высоких энергий», • 1.3.3 «Теоретическая физика», • 1.3.8 «Физика конденсированного состояния», • 1.5.2 «Биофизика», • 1.5.4 «Биохимия», • 1.5.7 «Генетика»
Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС			Направление подготовки: • 04.06.01 «Химические науки»; научная специальность: • 1.4.7 «Высокомолекулярные соединения»
Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС			Направления подготовки: • 04.06.01 «Химические науки», • 18.06.01 «Химическая технология»; научные специальности: • 1.4.4 «Физическая химия», • 2.6.14 «Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов»

В 2024 г. Институт участвовал в открытом конкурсе Министерства науки и высшего образования РФ по распределению контрольных цифр приема (КЦП) граждан на обучение по программам аспирантуры за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета на 2025/26 учебный год. Были получены КЦП по группам научных специальностей:

- 1.5. «Биологические науки» – 3 места;
- 1.4. «Химические науки» – 9 мест;
- 2.6. «Химические технологии, науки о материалах, металлургия» – 3 места.

В 2024 г. доля молодых ученых (исследователей без ученой степени, кандидатов наук до 35 лет и докторов наук до 40 лет) в общем количестве сотрудников, занятых в исследованиях и разработках, в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ составила 33 %.

В подразделениях НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2024 г. выполняли учебно-исследовательские и научные работы, проходили практику, готовили выпускные квалификационные работы бакалавров и специалистов, а также магистерские диссертации 397 студентов вузов Санкт-Петербурга (Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) и т. д.) и других городов Российской Федерации.

Динамика численности студентов профильных вузов, проходивших практику в Институте в рамках выполнения Программы деятельности НИЦ «Курчатовский институт», за 5 лет

Год	Количество студентов
2020	154
2021	175
2022	244
2023	239
2024	397

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, стремясь популяризировать науку и заинтересовать молодежь в получении профильного естественно-научного образования, развивает различные направления и подходы к организации образовательной, научно-просветительской и профориентационной деятельности путем привлечения талантливых детей и молодежи к научно-исследовательской деятельности посредством активизации творческой, познавательной и научно-исследовательской активности.

Организация данной деятельности проводится в рамках сотрудничества Института с региональными и местными органами муниципального управления, с образовательными организациями и детскими центрами на основе заключенных соглашений о сотрудничестве. Институт заключены следующие соглашения.

1. Договор от 28.12.2018 «О сотрудничестве и совместной деятельности» между администрацией Гатчинского муниципального района Ленинградской области и НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

2. Соглашения о сотрудничестве с 42 образовательными организациями среднего и дополнительного образования Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Из них в 2024 г. заключены 3 соглашения (МБОУ «Гатчинская СОШ № 12 «Центр образования», СПб ГБОУ «Лицей № 280 им. М. Ю. Лермонтова», ГБОУ СОШ № 77 с углубленным изучением химии Петроградского района Санкт-Петербурга).

3. Договоры и соглашения с организациями высшего образования, культуры, некоммерческими организациями (СПбГУ, МБУ «Централизованная библиотечная система г. Гатчины», Общероссийская общественно-государственная просветительская организация «Российское общество «Знание»,

ГБОУ «Центр опережающей профессиональной подготовки Санкт-Петербурга» – договор о сетевой форме реализации образовательных программ заключен в 2024 г.).

В рамках довузовской профориентации, взаимодействия с образовательными организациями и детскими центрами в 2024 г. реализовывались следующие проекты и программы Института.

1. Проект «Курчатовские классы».
2. Научно-просветительский проект для детей (5–18 лет) и молодежи.
3. Межрегиональный проект «ПИЯФ и центры образования естественно-научной направленности «Точка роста» для школ – участников национального приоритетного проекта «Образование».
4. Проект «Молодые таланты» – программа «Школьная экологическая инициатива».
5. Профориентационный проект для школьников Гатчинского муниципального района и Санкт-Петербурга.

В рамках реализации проекта «Курчатовский класс» Институт сотрудничает с 15 школами, в которых открыты профильные курчатовские классы. Среди них:

- ГБОУ гимназия № 171 Центрального района Санкт-Петербурга,
- ГБОУ лицей № 179 Калининского района Санкт-Петербурга,
- ГБОУ СОШ № 703 Московского района Санкт-Петербурга,
- ГБОУ лицей № 226 Фрунзенского района Санкт-Петербурга,
- ГБОУ лицей № 395 Красносельского района Санкт-Петербурга,
- ГБОУ лицей № 419 Петродворцового района Санкт-Петербурга,
- ГБОУ гимназия № 426 Петродворцового района Санкт-Петербурга им. Героя Советского Союза Г. Д. Костылева,
- СПб ГБОУ «Лицей № 280 им. М. Ю. Лермонтова»,
- ГБОУ гимназия № 631 Приморского района Санкт-Петербурга,
- ГБОУ лицей № 281 Адмиралтейского района Санкт-Петербурга,
- ГБОУ СОШ № 225 Адмиралтейского района Санкт-Петербурга,
- ГБОУ гимназия № 406 Пушкинского района Санкт-Петербурга,
- МБОУ «Гатчинская СОШ № 9 с углубленным изучением отдельных предметов»,
- МБОУ «Гатчинская СОШ № 2»,
- МБОУ «Гатчинская гимназия им. К. Д. Ушинского».

В 2024 г. Институтом были реализованы:

- серии лекций научных сотрудников Института по физике, химии, биологии для школ – участников проекта (12 лекций по различным направлениям для более 500 обучающихся 7–11-х классов);
- практикумы и мастер-классы, проводимые научными сотрудниками на базе лабораторий Института (14 экскурсий с практикумами и мастер-классами для 350 человек) и школ – участников проекта (3 практикума для 68 человек);
- участие сотрудников Института в тематических предметных неделях школ, семинарах и конференциях школ – участников проекта (предметные недели в 3 школах с проведением лекций и мастер-классов, участие в 3 научно-практических конференциях школ, 1 семинаре, 2 конкурсах научных проектов);
- участие в тематической образовательной смене «Коды Курчатова» для школ Санкт-Петербурга (март 2024 г., программа «Генетические и природоподобные технологии», 100 человек);
- организация и проведение первой в Ленинградской области тематической образовательной смены «Коды Курчатова» для школ Гатчинского района (октябрь 2024 г., программа по физике «Свет частиц», 60 человек);
- организация и проведение регионального этапа (Ленинградская область) Научно-практической конференции школьников в рамках проекта «Курчатовские классы» (апрель 2024 г., 34 участника).

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС традиционно готовит и проводит специальные профориентационные научно-популярные мероприятия в рамках региональных и всероссийских фестивалей. В 2024 г. такие программы, включающие научно-популярные лекции, экскурсии по выставочному залу Филиала Института, интерактивные занятия и творческие мастер-классы, связанные с химией и науками о материалах, проводились в рамках фестивалей: «Наука рядом», «В музей – сегодня, в науку – завтра!», «Год Менделеева» – и Всероссийского научно-популярного фестиваля «Наука О+». Помимо этого профориентационные научно-популярные программы, включающие лекции, экскурсии и мастер-классы, в течение учебного года проводились для организованных групп школьников по запросам учебных заведений Санкт-Петербурга.

В рамках реализации программы профильных смен «Коды Курчатова» Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС 11–12 апреля 2024 г. провел занятия, включающие лекции, экскурсии и практические занятия, для школьников Санкт-Петербурга в рамках реализации городской тематической профильной смены «Коды Курчатова. Новые материалы». Кроме того, сотрудники Филиала были делегированы для проведения тематических смен «Коды Курчатова. Дисперсные системы» для школьников в другие регионы Российской Федерации. *Н. К. Голубева* участвовала в проведении профильной смены во Владивостоке (17–28 июня 2024 г.), *И. Д. Быстревский* и *Д. А. Репин* – в Черкесске (5–28 ноября 2024 г.).

В рамках Научно-просветительского проекта для детей (5–18 лет) и молодежи в научно-образовательном центре (НОЦ) НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, а также на территории Института читаются лекции, проводятся мастер-классы, научные конкурсы и викторины, факультативные занятия по углубленному изучению отдельных тем по физике и биологии для учащихся школ Гатчины и Гатчинского района, в рамках которых ученики знакомятся с достижениями современной науки и техники.

Данные мероприятия, проводимые Институтом в 2024 г., посетили более 1 200 учащихся школ Ленинградской области и Санкт-Петербурга.

Для школ Гатчинского муниципального района проводится годовая серия интеллектуальных игр «Гатчинская лига».

В рамках соглашения о сотрудничестве между СПбГУ и НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ сотрудники Института читают лекции и проводят лабораторные практикумы по учебной образовательной программе «Конвергенция и наукоемкие технологии» для учащихся 10-х и 11-х классов Академической гимназии им. Д. К. Фаддеева СПбГУ.

В период летних каникул на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ проводится научный практикум для старшеклассников. В июне 2024 г. такой научный лагерь был организован для десятиклассников физико-математического класса Гатчинского лицея № 3 им. Героя Советского Союза А. И. Перегудова (20 человек). Смена была посвящена нейтронным исследованиям.

В период осенних – весенних каникул Институт принимает участие в организации научных сессий для участников Всероссийской олимпиады школьников, проводимых Комитетом образования Гатчинского района и районного центра по работе с одаренными детьми «Успех». В 2024 г. Институт проводил в рамках сессии практикумы для участников олимпиады по физике (март 2024 г., 20 человек) и участников олимпиады по биологии (ноябрь 2024 г., 20 человек).

В рамках данного проекта Институтом в 2024 г. были проведены 4 научных конкурса, 2 конференции, 2 выставки, 2 тематических дня: День науки и День открытых дверей НОЦ Института.

Мероприятия в рамках Научно-просветительского проекта для детей (5–18 лет) и молодежи, проведенные НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2024 г.

Наименование мероприятия	Время проведения	Количество участников
Научно-популярная лекция, приуроченная к памятным датам: 80-летию прорыва блокады Ленинграда и 120-летию со дня рождения выдающихся ученых И. В. Курчатова и А. П. Александрова, «Наука на войне: вклад отечественных ученых в Великую Победу» (для учащихся школ Санкт-Петербурга и Гатчинского района Ленинградской области)	Январь	> 400
Конкурс видеопроектов и презентаций «Наука и техника блокадного Ленинграда»	Январь	> 40
Конкурс научных проектов по физике, химии и биологии для 8–11-х классов «PRO-Наука»	Январь – октябрь	48
Научная конференция для учащихся 8–11-х классов, посвященная Дню российской науки	Февраль	> 40
День науки в Научно-образовательном центре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ	Февраль	> 50
Серия интеллектуальных игр «Гатчинская лига» для 10-х классов школ Гатчинского муниципального района	Февраль – май	> 100
Мероприятия ко Дню космонавтики для образовательных организаций Гатчинского муниципального района и Санкт-Петербурга	Апрель	> 100
Научный лагерь для 10-х классов школ Гатчинского муниципального района	Июнь	20
Научные сессии лагеря для одаренных детей Гатчинского муниципального района	Март, ноябрь	40
Неделя открытых дверей в Научно-образовательном центре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (для образовательных организаций Гатчинского муниципального района и Санкт-Петербурга)	Сентябрь	> 100
Конкурс научных видеороликов “Science Talk – 2024”	Октябрь	> 25
Серия лекций и практикумов по физике, химии и биологии по заявкам от образовательных организаций Гатчинского муниципального района и Санкт-Петербурга	В течение года	> 1 000
Лекции для школьников Ленинградской области и Санкт-Петербурга в рамках взаимодействия с филиалом Российского общества «Знание» в Ленинградской области и участие во всероссийском проекте «В гостях у ученого»	В течение года	> 500
Серия научных постов (публикаций) в социальной сети «ВКонтакте»	В течение года	> 1 000
Курс лекций для учащихся 10-х классов и лабораторный практикум по физике и биологии для учащихся 11-х классов Академической гимназии им. Д. К. Фаддеева СПбГУ	В течение года	~ 40
Курс научно-популярных лекций для учащихся 9–11-х классов Гатчины и Гатчинского муниципального района	В течение учебного года	> 300

Мероприятия, проведенные Филиалом НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС в 2024 г.

Наименование мероприятия	Время проведения	Количество участников
Научно-популярный фестиваль «Наука рядом»	22 февраля	8
День профориентации для организованных групп школьников по запросам образовательных организаций Санкт-Петербурга	В течение учебного года	71
VII Межмузейно-вузовский фестиваль «В музей – сегодня, в науку – завтра!»	1 апреля	43
Тематическая профильная смена «Коды Курчатова. Новые материалы» для обучающихся образовательных организаций Санкт-Петербурга	11–12 апреля	71
День открытых дверей в рамках Всероссийского научно-популярного фестиваля «Год Менделеева»	Октябрь	25
День открытых дверей в рамках Всероссийского научно-популярного фестиваля «Наука О+»	Ноябрь	40
Лекторий Музея антропологии и этнографии им. Петра Великого РАН. Лекция <i>Н. Г. Тюрниной</i>	28 октября	40
Большая аудитория (проект Политехнического музея в Центральном выставочном зале «Манеж»). Лекция <i>Н. Г. Тюрниной</i>	8 декабря	25

Институт активно реализует межрегиональный проект **«ПИЯФ и центры образования естественно-научной направленности «Точка роста»** для школ – участников национального приоритетного проекта «Образование».

С 2022 г. Институт выступает в качестве социального партнера в реализации национального проекта «Образование» и постоянно расширяет проведение лекционной, экскурсионной и практической работы с учащимися, обеспечивает научное сопровождение центров «Точка роста», а также тематических смен «Инженерный лагерь». В 2024 г. Институт в рамках проекта взаимодействует с 15 центрами «Точка роста», созданными на базе школ Гатчинского муниципального района.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ ведется уникальный проект **«Молодые таланты» – программа «Школьная экологическая инициатива»**, направленный на экологическое воспитание детей и подростков. В рамках программы проводятся 4 творческих и научно-исследовательских конкурса экологической направленности, в т. ч. конкурс научно-практических и исследовательских проектов в области экологии «Молодой экоисследователь – 2024». В летний период в рамках программы проводится летний лабораторный практикум для обучающихся 8–11-х классов, участников школьных экоклубов Гатчинского района. Итоги реализации проекта подводятся на итоговой конференции «Молодые таланты», в рамках которой проходит и творческое мероприятие «Экошоу». По итогам проведенных конкурсов проекта Институтом печатается сборник «Мир глазами участников программы «Школьная экологическая инициатива». В 2024 г. в мероприятиях проекта: конкурсах, олимпиадах, экологических акциях – приняли участие около 3 000 юных жителей из Санкт-Петербурга, Ленинградской области, Краснодарского края, Республик Карелия и Башкортостан.

Мероприятия в рамках программы «Школьная экологическая инициатива» по проекту «Молодые таланты», проведенные в 2024 г.

Наименование мероприятия	Время проведения	Количество участников
Межрегиональный литературный экологический конкурс	Март	> 2 000
Межрегиональный художественный экологический конкурс	Март	
Участие в международных и всероссийских конкурсах, олимпиадах	Март – сентябрь	
Участие во всероссийских конкурсах детского экологического движения «Зеленая планета»	Февраль – май	
Продолжение проекта «Раздельный сбор мусора» в школах и детских садах Гатчинского муниципального района	Январь – ноябрь	
Проведение занятий экологической тематики в образовательных организациях Гатчинского муниципального района	В течение года	
Конкурс научно-практических и исследовательских проектов в области экологии «Молодой экоисследователь – 2024» на премию им. С. М. Мирошкиной	Январь – апрель	
Конкурс видеороликов на экологическую тему	Сентябрь – ноябрь	
Организация художественных выставок по результатам художественных конкурсов 2024 г.	Апрель – август	
Проведение летнего лабораторного практикума для школьников старших классов «ЭКО-2024»	Июнь	
Издание альбома «Молодые таланты – 2024»	Ноябрь	
Итоговая конференция программы «Школьная экологическая инициатива» по проекту «Молодые таланты – 2024»	Декабрь	
Экологический праздник «Экошоу-2024»	Декабрь	

Профориентационный проект для школьников Гатчинского муниципального района и Санкт-Петербурга НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ включает: организацию и проведение экскурсий по территории и объектам Института (на ускорительный комплекс – СЦ-1000 и Ц-80, реакторный комплекс ПИК, в Отделение молекулярной и радиационной биофизики, другие научные подразделения), участие в профориентационной и просветительской работе со школьниками. Активно ведется профориентационная работа с учащимися школ Санкт-Петербурга и Ленинградской области: проводятся научно-популярные лекции (в т. ч. выездные – на территории школ), экскурсии в структурные подразделения Института, пропагандирующие достижения российской науки и тем самым повышающие интерес к научным профессиям в целом и деятельности Института в частности. Используются VR-продукты для демонстрации, а также интерактивный и физический макеты установок, разработанные сотрудниками Центра по подготовке персонала.

**Мероприятия в рамках профориентационного проекта,
проведенные НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2024 г.**

Наименование мероприятия	Время проведения	Количество участников
Ознакомительные экскурсии в отделения и лаборатории НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ	В течение года	> 700
Профпробы для учащихся 8–11-х классов		> 300
Участие в акции «Неделя без турникетов», проводимой в рамках всероссийского проекта «Работай в России», организованной для школьников Гатчинским филиалом ГКУ «Центр занятости населения Ленинградской области»		> 400

Награды. Премии

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ является активно функционирующим институтом, идущим в ногу с современными научными тенденциями, о чем свидетельствуют многочисленные награды, премии и стипендии его сотрудников.

Активное участие сотрудников Института в конкурсе на соискание **премии имени И. В. Курчатова** стало уже доброй традицией. Особенно приятно, что его организаторы привлекают к участию не только ведущих и молодых ученых и инженеров, но также и студентов. В 2024 г. среди победителей традиционно есть работы и авторские коллективы НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей победила работа лаборантов-исследователей ОМРБ *Сергея Горелова* и *Анатолия Титова* «DSSP и HBOND в GROMACS: утилиты для анализа структур биомакромолекул».

Среди студенческих работ одной из лучших стала работа лаборанта-исследователя ОНР *Полины Хадеевой* «Теоретические исследования химических сдвигов линий рентгеновского эмиссионного спектра иттербия в галогенидах с использованием прецизионных методов».

Динамика получения премии имени И. В. Курчатова сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 5 лет

Номинация конкурса	2020	2021	2022	2023	2024
В области научных исследований	1	–	1	–	–
В области инженерных и технологических разработок	–	–	–	–	–
Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей	2	3	–	1	1
Среди студенческих работ	1	1	1	–	1
Всего	4	4	2	1	2

В 2024 г. 14 сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ получали **именные научные стипендии губернатора Ленинградской области**:

- *А. И. Безрукова*, младший научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики человека (ЛМГЧ) ОМРБ;
- *О. И. Большакова*, старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной генетики (ЛЭГ) ОМРБ;
- *Д. А. Головкина*, младший научный сотрудник лаборатории биотехнологий ОМРБ;
- *А. С. Журавлев*, младший научный сотрудник ЛМГЧ ОМРБ;
- *А. О. Коптюхов*, инженер-технолог 2-й категории отдела нейтронной физики (ОНФ) ОНИ;
- *Р. А. Ниязов*, старший научный сотрудник сектора теории конденсированного состояния (СТКС) ОНФ;
- *А. К. Овсяников*, научный сотрудник отдела исследования конденсированного состояния ОНИ;
- *С. Д. Просняк*, младший научный сотрудник отдела квантовой физики и химии ОНР;
- *Д. А. Румянцева*, лаборант-исследователь ОНФ ОНИ;

- *Е. В. Рябова*, научный сотрудник ЛЭГ ОМРБ;
- *Р. М. Самойлов*, научный сотрудник ОНФ ОНИ;
- *А. В. Сыромятников*, ведущий научный сотрудник СТКС ОТФ;
- *Т. С. Усенко*, старший научный сотрудник ЛМГЧ ОМРБ;
- *А. В. Швецов*, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной биофизики и нейтронных исследований ОМРБ.

Накануне Нового года стали известны имена лауреатов **премий губернатора Ленинградской области** за вклад в развитие науки и техники в Ленинградской области и за лучшую исследовательскую работу.



Премия губернатора первой степени за лучшую научно-исследовательскую работу присуждена младшим научным сотрудникам лаборатории медицинской физики Отдела медицинской радиологии *Лилит Ваганян* и *Федору Паку*. Их работа по разработке уникальной системы цифрового планирования дозовых нагрузок при лечении онкологии признана одной из лучших научно-исследовательских работ по итогам прошлого года.

Общероссийский конгресс муниципальных образований награждает почетным знаком «За заслуги

в развитии местного самоуправления в Российской Федерации» председателя гатчинского общества «Жители блокадного Ленинграда», заместителя руководителя ОПр по науке кандидата физико-математических наук *Константина Николаевича Ермакова*. Он был отмечен за вклад в развитие местного самоуправления в России, совершенствование законодательства о местном самоуправлении, реализацию крупных проектов в сфере местного самоуправления. В 2022 г. Константину Николаевичу была вручена одна из высших наград города Гатчины – почетный знак «Гатчина – город воинской славы», а в 2024 г. он стал почетным гражданином города.



Для молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, демонстрирующих существенные успехи в научных исследованиях, были учреждены **именные стипендии** в знак признания заслуг и в память о выдающихся ученых С. Е. Бреслере, В. Н. Грибове, Г. М. Драбкине, В. М. Лобашеве и А. А. Воробьеве, научная деятельность которых была неразрывно связана с Институтом. Стипендии присуждаются ежегодно по следующим номинациям:

- стипендия имени С. Е. Бреслера за работы в области биологии,
- стипендия имени В. Н. Грибова за работы в области теоретической физики,
- стипендия имени Г. М. Драбкина за работы в области физики конденсированного состояния,
- стипендия имени В. М. Лобашева за работы в области ядерной физики,
- стипендия имени А. А. Воробьева за работы в области физики высоких энергий и физики элементарных частиц.

В 2024 г. 5 молодых сотрудников Института получали данные именные стипендии.

Стипендия имени С. Е. Бреслера за работы в области биологии в этом году присуждена сразу двум молодым ученым: лаборанту-исследователю лаборатории молекул генетики человека ОМРБ *Анастасии Безруковой* за работу «Мишени для терапии болезни Паркинсона на основе изменения транскрипционного профиля генов в клеточной и животных моделях паркинсонизма при дисфункции глюкоцереброзидазы» и младшему научному сотруднику лаборатории биотехнологий и Курчатовского

геномного центра – ПИЯФ Любви Ивановой за работу «Роль внеклеточной ДНК в процессе бактериальной биоминерализации, индуцированной планктонной культурой *B. cereus*».



Стипендия имени В. Н. Грибова за работы в области теоретической физики присуждена лаборанту-исследователю СТКС ОТФ Юлии Барамыгиной за работу «Теоретическое исследование аномального теплового транспорта решеток магнитных скирмионов».

Стипендия имени Г. М. Драбкина за работы в области физики конденсированного состояния присуждена младшему научному сотруднику отдела исследования конденсированного состояния ОНИ Любви Азаровой за работу «Дисперсия магнонов в аморфных ферромагнетиках».

Лауреатом новой **стипендии имени А. А. Воробьева** за работы в области физики высоких энергий и физики элементарных частиц стал лаборант-исследователь лаборатории релятивистской ядерной физики ОФВЭ Назар Бурмасов за работу «Исследование фотон-фотонных и фотон-ядерных взаимодействий в ультрапериферических столкновениях ядер на коллайдере LHC».

Научный сотрудник отдела квантовой физики и химии ОПР Александр Олейниченко стал лауреатом конкурса научных работ молодых ученых, проводимого некоммерческим фондом «Развитие химической физики». Его работа, посвященная созданию новых теоретических моделей и инструментов для высокоточного релятивистского моделирования возбужденных состояний и спектров короткоживущих радиоактивных молекул и материалов на основе *f*-элементов, была удостоена третьей премии. Отметим, что работа А. В. Олейниченко была единственной из прошедших во второй этап конкурса работ, посвященных именно теоретическим аспектам молекулярной спектроскопии. Всего в отборочном этапе конкурса приняли участие несколько сотен молодых ученых со всей России.

Актуальность работы А. В. Олейниченко обусловлена происходящим в последние годы стремительным прогрессом в области спектроскопии короткоживущих радиоактивных молекул, многие из которых являются «природной лабораторией» для исследования свойств тяжелых (в т. ч. весьма экзотических) ядер и поиска проявлений физики за пределами Стандартной модели. Поскольку подобные эксперименты требуют тщательного планирования, невозможного без предварительной информации о спектральных свойствах и электронной структуре изучаемых объектов, особую значимость приобретают именно теоретические методы их исследования, позволяющие с высокой точностью предсказать все требуемые характеристики с помощью компьютерного моделирования. Набор таких теоретических методов и реализующих их компьютерных программ, не имеющих в настоящее время аналогов в мире как по производительности, так и по набору реализованных моделей и методов, как раз и был разработан в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ при самом активном участии Александра Олейниченко. В настоящее время ведется интенсивная работа по приложению созданных новых подходов к моделированию свойств материалов, содержащих атомы *f*-элементов, – лантанидов и актинидов.

27 июня 2024 г. на заседании Ученого совета были подведены итоги **конкурса научных работ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 2024 г.** На конкурс были представлены 24 работы по 8 направлениям: «Теоретическая физика», «Ядерная физика низких энергий», «Биологические исследования», «Физика конденсированного состояния», «Ядерная физика высоких энергий», «Методические исследования», «Прикладные исследования», «Монографии и учебные пособия».

Согласно положению о конкурсе на каждое направление выделяются 3 премии. Наиболее высокий конкурс в 2024 г. оказался в области ядерной физики высоких энергий.



Комиссия присудила **первые премии** следующим работам:

- **в области ядерной физики высоких энергий** – «Сечение фоторождения чармония на ядрах при ультравысоких энергиях» (ALICE Collab., Н. А. Бурмасов, М. Б. Жалов, В. В. Иванов, Е. Л. Крышень, М. В. Малаев, В. Н. Никулин, В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, А. В. Ханзадеев и др.);

- **в области теоретической физики** – «Теоретическое исследование динамики и корреляций в решетках магнитных скирмионов» (Д. Н. Аристов, Ю. В. Барамыгина, А. О. Сорокин, В. Е. Тимофеев);

- **в области биологических исследований** – «Разработка таргетной терапии для болезни Паркинсона, ассоциированной с мутациями в гене GBA1» (А. Э. Копытова, Г. Н. Рычков, А. А. Чеблоков, Ф. М. Ибатуллин, Г. В. Байдакова, М. А. Николаев, А. Д. Изюмченко, Д. А. Богданова, К. А. Сенкевич, И. В. Милюхина, Т. С. Усенко, Е. Ю. Захарова, А. К. Емельянов, С. Н. Пчелина, В. М. Бойцов, А. В. Рыбаков, В. А. Безруких, Г. Н. Салогуб, Е. В. Григорьева, Е. С. Яркова, С. В. Павлова, Д. А. Сорогина, А. А. Малахова, Т. Б. Маланханова, С. П. Медведев, С. М. Закиян, Г. В. Горчакова, Ю. П. Ковальчук, О. А. Беркович);

- **в области прикладных исследований** – «PROTOPLAN: система дозиметрического планирования» (Л. Г. Ваганян, И. В. Василевская, А. А. Васильев, В. Н. Вербенко, Д. Л. Карлин, Н. А. Кузора, Н. И. Мамедова, В. И. Максимов, Ф. А. Пак, А. И. Халиков, С. В. Таммсаар);

- **монографии и учебные пособия** – «Динамическая дифракция и оптика нейтронов в совершенных кристаллах. Новые эффекты и их применение в физических исследованиях» (В. В. Федоров, В. В. Воронин).

Вторые премии:

- **в области ядерной физики низких энергий** – «Необычное поведение изотопической зависимости формы ядер золота, удаленных от дорожки стабильности» (А. Е. Барзах, П. Л. Молканов, С. Д. Просняк, М. Д. Селиверстов, Л. В. Скрипников, Д. В. Федоров и др.);

- **в области ядерной физики высоких энергий** – «Наблюдение событий с рождением четырех t -кварков в эксперименте ATLAS» (ATLAS Collab., С. Г. Барсов, В. Т. Грачев, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, О. Л. Федин, В. А. Щегельский и др.); «Обнаружение доминирующего электромагнитного вклада в первом измерении процессов с быстротными провалами в протон-ядерных соударениях на БАК в CMS-эксперименте» (CMS Collab., А. А. Воробьев, В. Т. Ким, Ю. М. Иванов, С. С. Волков, Г. Е. Гаврилов, В. Л. Головцов, Е. В. Кузнецова, В. А. Мурзин, В. А. Орешкин, И. Б. Смирнов, Д. Е. Соснов, В. В. Сулимов, Л. Н. Уваров и др.);

- **в области теоретической физики** – «Квантовые переходы из сверхтекучих в стекольные фазы в бозе-системах с беспорядком» (А. В. Сыромятников, А. В. Сизанов, Ф. Д. Тимковский);

- **в области физики конденсированного состояния** – «Получение и исследование функциональных материалов на основе наночастиц металлов платиновой группы» (Н. Н. Губанова, В. А. Матвеев, Я. Сазонова, М. Ю. Арсентьев, Е. А. Гребенщикова, А. Г. Иванова, Е. М. Иванькова, Д. Ю. Кириленко, И. Ю. Кручинина, К. Е. Пугачев, О. А. Шилова, В. А. Шутаев, Ю. П. Яковлев); «Надмолекулярная структура взаимопроникающих полимерных сеток на основе бактериальной целлюлозы, содержащей поли-1-винил-1,2,4-триазол с H_3PO_4 или Cu^{2+} ». (Г. П. Копица, Р. Ю. Смыслов, В. О. Веселова, Ю. Е. Горшкова, А. И. Емельянов, С. А. Коржова, А. В. Мигунова, А. С. Поздняков, Г. Ф. Прозорова, А. К. Хрипунов, Н. В. Цвигун, L. Lu, Y. Mao);

- **в области методических исследований** – «Мониторинг космических осадков на станции „Восток“ в Центральной Антарктиде» (В. Ф. Ежов, Ю. О. Четвериков, М. С. Глухов, Е. М. Иванькова, В. Д. Калганов, А. С. Лошаченко, О. В. Якубович); «Система детектирования поэтапного синтеза коротких пептидов» (М. С. Биджиева, О. А. Толичева, П. С. Касацкий, Е. В. Полесскова, А. Л. Коневега, В. И. Марина, А. Г. Терещенков, О. А. Донцова, В. И. Польшаков, В. Э. Сагитова, Н. В. Сумбатын, В. Н. Ташлицкий, А. С. Ферберг, П. В. Сергиев, Т. П. Мавиза, И. А. Остерман, Д. С. Орехов);

- **в области прикладных исследований** – «Исследование возможности применения различных выгорающих поглотителей в активной зоне реактора ПИК для увеличения длительности его кампании» (Н. С. Жихарева, М. С. Онегин).

Третьи премии:

- **в области ядерной физики низких энергий** – «Поиски сигналов нейтрино и антинейтрино, связанных с быстрыми радиовсплесками и гравитационными волнами, в детекторе Borexino» (А. В. Дербин, И. С. Драчнев, И. С. Ломская, В. Н. Муратова, Н. В. Ниязова, Д. А. Семенов, Е. В. Унжаков, А. В. Вишнева, М. Б. Громов, Е. А. Литвинович, Г. А. Лукьянченко, И. Н. Мачулин, Р. Р. Нугманов, Г. И. Райков, М. Д. Скорохватов, О. Ю. Смирнов, А. П. Сотников, А. С. Чепурнов и др.);

- **в области ядерной физики высоких энергий** – «Поиск магнитных монополей и частиц с высоким электрическим зарядом в эксперименте ATLAS» (ATLAS Collab., С. Г. Барсов, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, О. Л. Федин, В. А. Щегельский и др.); «Прецизионное измерение параметров нарушения CP-инвариантности в распадах B_s^0 -мезонов в эксперименте LHCb на БАК» (LHCb Collab., Н. Ф. Бондарь, Н. И. Воропаев, А. А. Дзюба, Д. С. Ильин, П. В. Кравченко, О. Е. Маев, Д. А. Майсузенко, Н. Р. Сагидова, А. Д. Чубыкин, В. В. Чуликов и др.);

- **в области теоретической физики** – «Транспортные свойства сильнокоррелированных металлов» (В. Р. Шагинян, М. В. Зверев, К. Г. Попов, В. А. Ходель, J.W. Clark, G.S. Japaridzhe, E. Kirichenko, A.Z. Msezane, V.A. Stephanovich);

- **в области физики конденсированного состояния** – «Особенности магнетизма в $Dy_{1-x}Ho_xMnO_3$ » (И. А. Зобкало, М. И. Колков, А. Н. Матвеева, А. Г. Пшеничная, К. Ю. Терентьев, Н. С. Павловский, С. В. Семенов, А. Л. Фрейдман, К. А. Шайхутдинов, M. Meven, A. Sazonov, V. Hutanu);

- **в области биологических исследований** – «Радиосенсибилизирующее действие наночастиц оксида железа в декстрановой оболочке на клетки злокачественной глиомы» (Н. Х. Чан, В. А. Рыжов, А. В. Волницкий, Д. А. Амерканов, Ф. А. Пак, А. М. Голубев, А. В. Арутюнян, А. С. Спицына, В. С. Бурдаков, Д. В. Лебедев, А. Л. Коневега, Т. А. Штам, Я. Ю. Марченко); «Экспрессия OGT4 в злокачественных глиомах зависит от клеточного метаболизма» (А. В. Волницкий, К. А. Шабалин, Р. А. Пантина, Е. Ю. Варфоломеева, Р. А. Ковалев, В. С. Бурдаков, С. С. Емельянова, Л. А. Гараева, М. В. Филатов, А. Л. Коневега, Т. А. Штам, М. В. Согоян, А. П. Якимов);

- **в области прикладных исследований** – «Цикл работ по применению метода парового риформинга в целях экологически безопасной переработки и утилизации горючих, токсичных отходов, включая батарейки и сухозаряженные аккумуляторы, а также радиоактивных отходов» (А. В. Башаричев, И. С. Окунев, В. Я. Сиротюк, В. А. Голиков, В. А. Иванов).

Сразу трое молодых работников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ стали победителями **конкурса 2024 г. «Проведение инициативных исследований молодыми учеными» Президентской программы исследовательских проектов.**

Научный сотрудник ОТФ Виктор Тимофеев выиграл грант как руководитель проекта «Теоретическое исследование топологического перехода в спектре магнонов скирмионного кристалла в киральных магнетиках с одноосной анизотропией».

Над проектом «Методы тензорного разложения для высокоточного релятивистского моделирования электронной структуры и свойств материалов на основе f -элементов» под руководством научного сотрудника Александра Олейниченко будут трудиться специалисты отдела квантовой физики и химии ОПР. Успешное выполнение задач проекта РНФ позволит резко сократить вычислительные затраты при квантово-механических расчетах электронных состояний и оптических свойств материалов за счет применения тензорных разложений для снижения вычислительной стоимости метода связанных кластеров, лежащего в основе моделирования. Таким образом, можно будет не только быстрее решать уже имеющиеся задачи, но и надеяться на расширение круга моделируемых материалов и их свойств, которые сейчас недостижимы ввиду запредельно высокой сложности и продолжительности расчета.

Грантовой поддержки удостоен также проект «Механизмы поддержания барьерных функций в организме. Роль гена *PNPLA6/swiss cheese*», руководить которым будет научный сотрудник ОМРБ Елена Рябова. Изучение механизмов патогенеза заболеваний человека является одним из основных направлений современных научных исследований. В основе патогенеза различных воспалительных, аутоиммунных неврологических и нейродегенеративных заболеваний, для многих из которых в настоящее время отсутствует эффективная терапия, лежит нарушение барьерных функций внутренних органов. Несмотря на высокую степень изученности, многие детали функционирования внутренних барьеров остаются невыясненными.

В начале июля 2024 г. в Московской области состоялась Международная школа-конференция “PhysChem Challenges 2024” по проблемам квантовой физики, теоретической химии, высокопроизводительных вычислений и смежных дисциплин. Соорганизаторами мероприятия выступили НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина), АО «РТ-Техприемка» (Москва), химический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (Москва), Институт квантовой физики Иркутского национального исследовательского технического университета (Иркутск), Московский физико-технический институт (Долгопрудный) и Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (Москва).

Лаборант-исследователь отдела квантовой физики и химии ОПР Полина Хадеева (научный руководитель – А. В. Титов) представила на конференции постерный доклад «Квантово-химическое моделирование электронной структуры галогенидов иттербия методом связанных кластеров». В ее работе были впервые вычислены химические сдвиги линий рентгеновского эмиссионного спектра для кристаллов галогенидов иттербия. Для описания электронной структуры кристаллических структур рассматривался фрагмент, а действие окружения описывалось с помощью подстраиваемого под соединение потенциала внедрения (СТЕР). Тема исследования вызвала большой интерес и активное обсуждение, а жюри конкурса признало доклад Полины Хадеевой лучшим.



Научные мероприятия

Общеинститутские семинары

10.01.2024. Теоретический семинар ОПР. А. С. Багмутов (Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики). «Спектральный анализ систем со взаимодействиями на множествах нулевой меры (по материалам кандидатской диссертации)».

23.01.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. С. И. Воробьев. « μ SR-исследования материалов с различными видами магнитного упорядочения на мюонном канале СЦ-1000».

30.01.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. А. И. Львов (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН). «Комптоновское рассеяние и поляризуемости нуклонов».

01.02.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. М. М. Кирсанов (Институт ядерных исследований РАН). «Недавние результаты и планы эксперимента NA64 на SPS ЦЕРН».

06.02.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. Н. П. Ткаченко (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ). «ATLAS & TOTEM: $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Результаты или полуфабрикаты?»

13.02.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. С. В. Григорьев. «Проект компактного источника нейтронов DARIA для исследований методами нейтронного рассеяния».

14.02.2024. Теоретический семинар ОПР. Д. А. Макинский. «Квантово-химическое исследование эндометаллофуллерена $\text{Yb}@C_{60}$ ».

15.02.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. И. Б. Логашенко (от имени коллаборации КМД-3, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН). «Измерение сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в эксперименте КМД-3 и адронный вклад в аномальный магнитный момент мюона a_μ ».

21.02.2024. Теоретический семинар ОПР. Д. М. Васильева. «Неупругое рассеяние электронов на водородоподобных ионах».

22.02.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. А. П. Серебров. «Стерильные нейтрино, темная материя, Стандартная модель с правыми нейтрино, иерархия нейтринных масс и CP -нарушение».

27.02.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. И. А. Митропольский. «Компактные источники нейтронов: DARIA vs NG».

28.02.2024. Теоретический семинар ОПР. С. Д. Просняк. «Теоретическое изучение свойств ядер с использованием атомно-молекулярных систем (по материалам кандидатской диссертации)».

29.02.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. И. И. Страковский (Университет Джорджа Вашингтона, США). «Поиск пентакварка Θ^+ в процессе $K^0 p \rightarrow K^+ n$ в Jlab».

05.03.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. А. А. Дзюба. «Прецизионное измерение параметров CP -нарушения в распадах прелестных мезонов в эксперименте LHCb».

06.03.2024. Теоретический семинар ОПР. Н. С. Мосягин. «Обобщенные релятивистские псевдопотенциалы для легких элементов, моделирующие релятивистские и КЭД-эффекты».

12.03.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. С. В. Евдокимов (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ). «Изучение нейтральных состояний, образующихся в мезон-ядерных взаимодействиях в эксперименте „Гиперон-М“».

14.03.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. М. Г. Рыскин. «Осцилляции в амплитуде упругого рассеяния при высоких энергиях».

- 26.03.2024. Ядерный семинар ОФВЭ.** Д. А. Иванищев. «Триггерная система эксперимента MPD на ускорителе NICA».
- 02.04.2024. Ядерный семинар ОФВЭ.** И. А. Александров (Санкт-Петербургский государственный университет). «Механизм Швингера и вакуумное излучение фотонов».
- 11.04.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** Д. Г. Левков (Институт ядерных исследований РАН, Институт теоретической и математической физики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова). «Легкая бозонная темная материя и аксионные звезды».
- 16.04.2024. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. Л. Геталов. «Наноферригидрит бактериального происхождения».
- 23.04.2024. Ядерный семинар ОФВЭ.** Ю. Г. Куденко (Институт ядерных исследований РАН). «Нейтринная физика: современное состояние, аномалии, перспективы».
- 25.04.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** А. В. Нефедьев (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН). «Природа и свойства дважды очарованного экзотического состояния T_{cc}^{++} в эксперименте и на решетке».
- 25.04.2024. Теоретический семинар по ФКС.** П. Н. Бибииков (Российский государственный гидрометеорологический университет). «Низкотемпературный магнотонный резонансный контур в поперечном динамическом структурном факторе ферромагнитно-поляризованной XXZ-цепочки».
- 14.05.2024. Ядерный семинар ОФВЭ.** Гао Джи (Институт физики высоких энергий Китайской академии наук, Китай). «CEPC–SprC: общее состояние дел и перспективы».
- 14.05.2024. Семинар ОМРБ.** В. М. Говорун (НИИ системной биологии и медицины Роспотребнадзора). «Изучение минимальной клетки: от системной к синтетической биологии».
- 21.05.2024. Ядерный семинар ОФВЭ.** Н. П. Ткаченко (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ). «ATLAS и TOTEM: о предполагаемых осцилляциях дифференциальных сечений при 13 ТэВ».
- 23.05.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** Д. В. Карловец (Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики). «Закрученные частицы: генерация и потенциальные приложения в квантовой физике».
- 28.05.2024. Ядерный семинар ОФВЭ.** Г. А. Теофилов (Санкт-Петербургский государственный университет). «Основные недавние результаты адронных столкновений в эксперименте ALICE на БАК».
- 30.05.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** А. А. Дзюба. «Пентакварки со скрытым очарованием».
- 04.06.2024. Ядерный семинар ОФВЭ.** О. В. Теряев (Объединенный институт ядерных исследований). «Поляризация в реакциях с адронами и тяжелыми ионами: сходство и различие».
- 11.06.2024. Ядерный семинар ОФВЭ.** М. В. Токарев (Объединенный институт ядерных исследований). «Z-скейлинг: состояние и перспективы».
- 13.06.2024. Теоретический семинар ОПР.** Е. Ю. Тупикина (Санкт-Петербургский государственный университет). «Квантовая химия в исследовании невалентных взаимодействий».
- 13.06.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** А. П. Серебров. «Анализ экспериментальных данных распада нейтрона на возможность существования правого калибровочного векторного бозона W_R ».
- 18.06.2024. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. М. Зайцев (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ). «Эксперименты на ускорительном комплексе У-70».
- 19.06.2024. Теоретический семинар ОПР.** А. В. Олейниченко. «Приближенный метод вычисления матриц плотности и матриц плотности перехода в релятивистском методе связанных кластеров».
- 25.06.2024. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. Е. Шевель. «Компьютерная инфраструктура в экспериментах по физике высоких энергий (по материалам конференции NEPIX 15–19 апреля 2024 г.)».

02.07.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. М. Ю. Малышев. «Подход к КХД на световом фронте».

05.09.2024. Теоретический семинар ОПР. К. А. Пшеничный. «Малоугловое рассеяние нейтронов на магнонах в ферромагнетиках и гелимагнетиках со взаимодействием Дзялошинского – Мория».

17.09.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. Н. А. Бурмасов. «Исследование когерентного фоторождения векторных мезонов и димюонного континуума в эксперименте ALICE на LHC». А. Ю. Рождественский. «Разработка системы сцинтилляционных детекторов для подавления космического излучения в рамках проекта по исследованию реакции ядерного dd -синтеза с поляризацией исходных частиц при низких энергиях (PolFusion)».

18.09.2024. Теоретический семинар ОПР. М. М. Серёгин (Московский физико-технический институт). «Основы работы с квантово-химическим пакетом PySCF и интерфейс к программам, реализующим квазивыврожденную теорию возмущений MPPT».

24.09.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. В. Е. Ларионов. «Поляризованные газовые мишени в рамках проекта по изучению ядерного синтеза при энергиях до 100 кэВ». А. Ю. Арутюнова. «Подготовка эксперимента по комптоновскому рассеянию на ядрах водорода и гелия с помощью активной мишени».

25.09.2024. Теоретический семинар ОПР. Н. С. Мосягин. «Теоретические основы метода обобщенного релятивистского эффективного потенциала остова».

26.09.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. И. В. Ворончихин (Томский политехнический университет). «Рождение медиаторов темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью».

01.10.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. Ю. А. Мулин (Объединенный институт ядерных исследований от имени консорциума NICA MPD ITS). «Текущее состояние и перспективы проекта NICA MPD ITS».

03.10.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. М. Г. Рыскин. «Распределение по множественности в случаях эйкональной и U -матричной унитаризации».

08.10.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. И. Б. Смирнов. «Реконструкция пространственного разрешения многослойных координатно-чувствительных детекторов».

09.10.2024. Теоретический семинар ОПР. А. В. Олейниченко. «Метод связанных кластеров для многодетерминантного вакуумного состояния (ic-MRCC): текущее состояние и перспективы (часть 1)».

10.10.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. А. П. Серебров. «Анализ экспериментальных данных распада нейтрона на возможность существования правого векторного бозона W_R ».

15.10.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. Т. А. Залялюдинов. «Нерезонансные эффекты в прецизионной атомной спектроскопии».

16.10.2024. Теоретический семинар ОПР. А. В. Олейниченко. «Метод связанных кластеров для многодетерминантного вакуумного состояния (ic-MRCC): текущее состояние и перспективы (часть 2)».

17.10.2024. Теоретический семинар по ФКС. К. А. Пшеничный. «Измерение спин-волновой жесткости в гелимагнетиках методом малоуглового рассеяния нейтронов».

17.10.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. Б. И. Ермолаев (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН). «Современное состояние проблемы со спином протона».

22.10.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. А. Е. Шевель. «Прототип платформы машинного обучения».

23.10.2024. Теоретический семинар ОПР. И. П. Курчавов. «Поиск магнитного квадрупольного момента ядер в двухатомных и линейных трехатомных молекулах (короткое сообщение)».

23.10.2024. Теоретический семинар ОПР. М. Г. Козлов. «КЭД-поправки к $E1$ -амплитудам переходов в многоэлектронных атомах».

29.10.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. И. А. Митропольский. «База данных и систематика магнитных моментов основных состояний ядер».

30.10.2024. Теоретический семинар ОПР. И. А. Мальцев (Санкт-Петербургский государственный университет). «Расчеты атомных систем с помощью квантовых алгоритмов».

31.10.2024. Теоретический семинар по ФКС. А. Г. Яшенкин. «Блуждающие оптические моды в наноструктурированных средах».

31.10.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. Юбин Донг (Институт физики высоких энергий Китайской академии наук, Китай). «Адронная экзотика: молекулярный и компактный сценарии».

05.11.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. А. В. Дербин. «Экспериментальные поиски солнечных аксионов».

06.11.2024. Теоретический семинар ОПР. И. Д. Федоров (Объединенный институт высоких температур РАН). «Модель поведения экситонов в плотных молекулярных флюидах H₂ и N₂ на основе первопринципной молекулярной динамики для описания экспериментов по их импульсному нагреву (по материалам кандидатской диссертации)».

12.11.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. В. Р. Шагинян. «Нарушение симметрии обращения времени и барионной симметрии».

19.11.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. О. Б. Самойлов (Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Давыдова Объединенного института ядерных исследований). «Результаты десятилетней работы эксперимента NOvA».

20.11.2024. Теоретический семинар ОПР. А. Н. Петров. «g-факторы молекулы YbOH во внешнем электрическом поле».

21.11.2024. Теоретический семинар по ФКС. В. Ю. Юшанхай (Объединенный институт ядерных исследований). «Квантовые алгоритмы для вычислительных задач физики и химии».

26.11.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. П. В. Кравченко. «Поиск ядерной реакции $d + {}^3\text{He}$ -синтеза в мюонном катализе».

27.11.2024. Теоретический семинар ОПР. Д. А. Мальцев. «Методы расчета неупорядоченных кристаллов и моделирование структуры YNbTiO₆».

28.11.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. А. Б. Арбузов (Объединенный институт ядерных исследований). «Физика на будущей e^+e^- -фабрике Z-бозонов».

03.12.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. Ю. Г. Нарышкин. «Наблюдение эффекта квантовой запутанности в парном рождении топ- и антитоп-кварков в экспериментах ATLAS и CMS».

04.12.2024. Теоретический семинар ОПР. И. О. Глебов. «CDAS-PT2: эффективная реализация теории возмущений второго порядка в полном модельном пространстве».

05.12.2024. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. М. Н. Дубинин (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Университет науки и технологий «МИСиС»). «Стандартные и стерильные майорановские нейтрино в моделях с расширенным лептонным сектором».

10.12.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. Д. В. Попов (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»). «Спектры реакторных антинейтрино модели КИ: текущий статус и последние результаты».

12.12.2024. Теоретический семинар по ФКС. А. В. Сыромятников. «Спиновая динамика сильноанизотропных квазиодномерных квантовых систем на примере Cs₂CoBr₄».

17.12.2024. Ядерный семинар ОФВЭ. А. А. Дзюба. «CP-нарушение в распадах прелестных адронов».

18.12.2024. Теоретический семинар ОПР. Т. А. Залялюдинов. «Молекулярные свойства легких двухатомных молекул в сильных магнитных полях».

25.12.2024. Теоретический семинар ОПР. А. В. Олейниченко. «Python-интерфейс к библиотеке LIBGRPP для вычисления интегралов от операторов обобщенных псевдопотенциалов и ее использование в пакете PySCF».

Конференции, школы, совещания

В рамках широкого спектра тематик научных исследований, осуществляемых в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, организуются собственные конференции, лектории и рабочие совещания, в которых участвуют ведущие научные центры России и зарубежья.

В 2024 г. при участии Института было организовано около 30 мероприятий (совещаний, конференций и школ).

Научные мероприятия, проведенные в 2024 г. в целях повышения квалификации молодых ученых

Наименование мероприятия	Дата проведения	Место проведения	Количество участников
XXIII Зимняя молодежная школа по биофизике и молекулярной биологии	26 февраля – 2 марта	Гостиница «Репинская» (Санкт-Петербург)	> 200
Молодежная школа по физике конденсированного состояния («ФКС-2024»)	11–15 марта	пос. Лосево Приозерского района Ленинградской обл.	~ 250
XXX Каргинские чтения. Всероссийская научно-техническая конференция студентов и молодых ученых «Физика, химия и новые технологии»	28–30 марта	Тверь	~ 200
LVI Зимняя школа ПИЯФ	17–22 марта	Луга	~ 100
Свиридовские чтения – 2024. 10-я Международная конференция по химии и химическому образованию	9–12 апреля	Минск	~ 150
Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2024»	12–26 апреля	Москва	~ 200
XXVII Всероссийская конференция молодых ученых-химиков (с международным участием)	16–18 апреля	Нижний Новгород	~ 200
XXVII Международная медико-биологическая научная конференция молодых исследователей «Фундаментальная наука и клиническая медицина. Человек и его здоровье»	20 апреля	Санкт-Петербург	~ 100
XXVII Международная медико-биологическая конференция молодых исследователей	20 апреля	Санкт-Петербург	~ 100
XIV Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых имени профессора, лауреата Государственной премии СССР А. С. Дудырева «Неделя науки – 2024. Творчество молодежи – будущему России»	22–24 апреля	Санкт-Петербург	~ 100
XIII Международная научная конференция и Школа молодых ученых «Химия и технология растительных веществ»	28 мая – 1 июня	Сыктывкар	~ 150
Девятая Всероссийская каргинская конференция «Полимеры-2024»	1–3 июля	Москва	~ 200
XX Международная научно-практическая конференция «Новые полимерные композиционные материалы»	4–10 июля	пос. Эльбрус Кабардино-Балкарской Республики	~ 400
Международная конференция «Современные проблемы теории конденсированных сред»	15–19 июля	Дубна	~ 100
IV Летняя школа Совета молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ	30 августа – 1 сентября	пос. Шапки Тосненского района Ленинградской обл.	45

Окончание таблицы

Наименование мероприятия	Дата проведения	Место проведения	Количество участников
XIII International Conference on Chemistry for Young Scientists “Mendeleev 2024”	2–6 сентября	Санкт-Петербург	~ 100
IX Молодежная школа РК ПИК (Профессионализм. Интеллект. Карьера. «ПИК-2024»)	9–20 сентября (дистанционный модуль), 16–30 сентября (очные занятия)	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	39
XIII Всероссийская конференция с международным участием «Химия твердого тела и функциональные материалы – 2024»	16–20 сентября	Санкт-Петербург	~ 150
XI Всероссийский молодежный научный форум с международным участием “Open Science 2024”	13–15 ноября	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	~ 250
Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение» (YOUNG ISC 2024)	3–6 декабря	Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС (Санкт-Петербург)	> 250

Также в течение 2024 г. сотрудники Института участвовали в работе более 120 международных и российских конференций, были сделаны более 600 докладов.

Дайджест новостей науки



С 26 февраля по 2 марта проходила XXIII Зимняя молодежная школа НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ по биофизике и молекулярной биологии.

В работе Школы приняли участие более 250 человек. Среди них студенты, аспиранты и молодые ученые, а также ведущие ученые и руководители из научных центров и исследовательских институтов Российской Федерации. География участников в 2024 г. была традиционно широка – от Санкт-Петербурга до Владивостока (Москва, Краснодар, Сочи, Новосибирск, Нижний Новгород, Томск, Саратов и др.). Тематика лекций и докладов охватывала

такие научные направления, как биофизика, молекулярная, клеточная и синтетическая биология, генетика, нейробиология и молекулярная медицина, протеомика, биотехнология, биоинформатика, биоинженерия, генетические технологии, ядерная медицина.

5 марта программа НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ «Школьная экологическая инициатива» подвела итоги за 2023 г. Конференция «Молодые таланты» и «Эко-шоу», организованные научно-образовательным центром Института, прошли на сцене новой Гатчинской школы № 12.

Праздник объединил более 160 участников программы, которые выступали с номерами, читали стихи, пели и танцевали. Самые активные дети и взрослые были награждены благодарностями и грамотами.

От имени НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ выступил ученый секретарь Сергей Иванович Воробьев. Он пожелал удачи всем участникам и выразил надежду на то, что еще больше детей с помощью программы «Школьная экологическая инициатива» приобщатся к науке и экологии.

Всего в 2023 г. в программе приняли участие свыше 40 организаций образования и культуры Гатчинского района, Санкт-Петербурга и других регионов – это более 2 000 детей. Победителем в конкурсе «Лидер программы года» стал Районный центр детского творчества, который признан самой активной организацией, участвующей во всех мероприятиях «Школьной экологической инициативы».



11–15 марта 2024 г. состоялась LV Зимняя школа по физике конденсированного состояния («ФКС-2024»), проводимая НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. За годы существования, начиная с 1964 г., Школа имела свои взлеты и падения и в последние десятилетия переживает несомненный ренессанс. В последние годы, благодаря активному участию в ней молодых ученых, представляющих свои научные достижения на устных и стендовых сессиях, а также в ходе дискуссий на дополнительных сессиях – клубах по интересам, Школа приобрела статус молодежной.

Научная программа «ФКС-2024» традиционно охватывает широкий круг актуальных проблем, находящихся на переднем крае современной физики конденсированного состояния. Общая тематика Школы была посвящена значимым результатам в области физики твердого тела и мягкой материи,

полученным разными методами, главным образом с помощью рассеяния нейтронов или синхротронного излучения. Следует отметить три сессии с короткими устными докладами молодых ученых и три стендовые сессии, которые проходили во второй половине этих дней и на которых научная молодежь показывала, каких результатов она добилась за последние два-три года. Авторы лучших докладов были награждены дипломами трех степеней по направлениям: «Исследование функциональных материалов», «Структурные исследования и кристаллография», «Методика эксперимента и приборы», «Взаимодействие излучения с веществом и магнетизм» и «Теоретические и численные исследования конденсированного состояния».



Сразу два летних лагеря организовал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ для ребят Гатчины, увлеченных наукой.

В рамках программы «Школьная экологическая инициатива» 31 мая стартовал экологический лагерь «ЭКО-2024». Юные экологи из 8-х и 10-х классов Гатчинской СОШ № 9 целую неделю собирались в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, чтобы больше узнать об экологии. Программа «ЭКО-2024» была насыщенной и увлекательной. В этом году участников летнего эколлага ждало много интересного: лекции работников Института, практикумы и мастер-классы, экскурсии в лаборатории, интеллектуальные игры и проектная деятельность. Хочется отметить, что участие членов экологического клуба «Симбиоз» Гатчинской СОШ № 9 в экологических сменах, организованных научно-образовательным центром Института, становится уже доброй традицией.

3 июня свои двери для учеников 10-го физико-математического класса Гатчинского лицея № 3 открыл научный лагерь НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Юных ученых целую неделю ждали лекции работников Института по современным направлениям развития физики, практикумы по решению нестандартных задач, подготовка к участию на следующий учебный год в совместной олимпиаде НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и СПбГУ «Естествознание», мастер-классы и экскурсии, в т. ч. на реакторный комплекс ПИК.

По окончании обеих смен все ребята получили сертификаты участников и памятные сувениры от НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

В начале июня 2024 г. на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ состоялось Седьмое рабочее совещание по неупругому рассеянию нейтронов «Спектрина-2024».

Совещание традиционно было посвящено актуальным исследованиям динамики вещества с помощью нейтронного рассеяния. Значительное внимание было уделено инструментальному обеспечению и развитию различных методов ведения неупругого рассеяния нейтронов.

В совещании приняли участие 40 ученых из НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и других научных институтов России.

Программа мероприятия была представлена пятью сессиями с устными докладами по следующим направлениям:

- 1) исследования динамических свойств конденсированного состояния нейтронами и комплементарными методами;
- 2) теоретическая дискуссия «Скирмионный консенсус»;
- 3) опосредованные спектральные задачи;
- 4) экспериментальные установки по неупругому рассеянию нейтронов на РК ПИК;
- 5) методика эксперимента по неупругому рассеянию нейтронов.



В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ с 8 по 12 июля 2024 г. прошла 9-я Международная конференция «Структура адронов и фундаментальные взаимодействия» (Hadron Structure and Fundamental Interactions: from Low to High Energies (HSFI-2024)), организованная НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Санкт-Петербургским государственным университетом (СПбГУ), Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого, Институтом физики им. В. А. Фока СПбГУ и Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ).

Целью конференции являлся обзор и обсуждение прогресса в теории и эксперименте физики адронов, квантовой хромодинамике, в теории Стандартной модели и ее обобщений, физике нейтрино и последних экспериментальных достижений на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН (Женева), на готовящемся к запуску коллайдере NICA в ОИЯИ, а также в других мировых центрах физики низких, промежуточных и высоких энергий и ядерной физики.

В работе конференции приняли участие более 80 ученых, аспирантов и студентов из России, Казахстана, Италии, Австралии, США, Индии, Китая, Южной Кореи и Сирии, некоторые участники из других стран представили свои доклады удаленно.

С 30 августа по 1 сентября 2024 г. на территории туристской базы «Пикник» состоялась IV Летняя школа Совета молодых ученых и специалистов.

С целью формирования системы мотивации к здоровому образу жизни, создания благоприятной рабочей среды и укрепления здоровья и благополучия работников Института было принято решение провести Школу под эгидой здорового образа жизни. На протяжении всей Школы утром и вечером для всех участников мероприятия проводились занятия по йоге.

Во время секции «ПИЯФ на стороне спорта и здорового образа жизни» рассказали о развитии спорта как об одном из направлений развития молодежной политики в Институте и предложили принять участие в марафоне шагов, где участники до конца этого месяца должны каждый день присылать организаторам количество шагов, пройденных за день. Участник, набравший наибольшее количество шагов по итогу марафона, получит ценный приз от Совета молодых ученых и специалистов.

С целью оценки условий труда, что позволяет выявить проблемные области и своевременно реагировать на них, поддержать высокий уровень мотивации и продуктивности работников, начальник центра по подготовке персонала С. А. Шека провела опрос среди участников на тему «Ключевые



факторы повышения уровня удовлетворенности персонала». Опрос позволяет сравнивать текущие условия с ранее установленными стандартами и отслеживать изменения.

Также участники Школы совместно с директором Института С. Е. Горчаковым приняли участие в деловой игре, где каждая команда представила себя в роли экспертов и защитила перед почетным жюри свой план по решению одного из предложенных вопросов, связанных с деятельностью Института. Далее происходило обсуждение каждого проекта в формате панельной дискуссии. По завершении деловой игры директор Института С. Е. Горчаков вручил команде-победителю памятные призы.

11 сентября в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ стартовал второй модуль Школы исследователей-лидеров «Университет – РАН» в области наук о материалах.

Школа – совместный проект трех научных организаций: Южного федерального университета (ЮФУ), Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН (ФИЦ ПХФ и МХ РАН) и НИЦ «Курчатовский институт».

Программа работы Школы направлена на решение такой важнейшей задачи, как подготовка нового поколения руководителей научных исследований, а также создание и развитие междисциплинарных команд молодых исследователей, объединяющих представителей академической науки, высшей школы и НИЦ «Курчатовский институт».

Участники Школы, молодые, но уже зарекомендовавшие себя в науке исследователи, распределены на шесть групп по направлениям: «Высокотемпературные сверхпроводники», «Нанопроволока и тонкие пленки», «Силикат лития, кальция», «Композиционные порошки для напыления покрытий», «Фуллерены и углеродные нанотрубки», «Полимерные композиционные материалы». Перед каждой из групп поставлена задача предложить интересную и актуальную научно-техническую проблему в рамках заданного направления, провести в отведенный срок необходимые исследования на базе организаций – участников Школы и разработать технологическое решение, пригодное для внедрения в промышленность.

Первый модуль Школы проводился весной этого года в Ростове-на-Дону (ЮФУ) и Черноголовке (ФИЦ ПХФ и МХ РАН), второй модуль – на базе НИЦ «Курчатовский институт» и входящих в его состав организаций: НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина) и НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» (Санкт-Петербург).

Группа молодых исследователей, прибывшая в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, вела работу в рамках направления «Фуллерены и углеродные нанотрубки» по выбранной для разработки проблеме «Эндометаллофуллерены – основа для производства радиофармпрепаратов».

Объединенными усилиями участников Школы и экспертов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на основе полученных результатов подготовлен проект промышленной реализации технологии синтеза радиофармпрепаратов на основе эндометаллофуллеренов. 19 сентября в НИЦ «Курчатовский институт» состоялась защита подготовленных проектов и подведение итогов работы Школы.

Во второй половине сентября в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ начала свою работу IX Молодежная школа РК ПИК (Профессионализм. Интеллект. Карьера. «ПИК-2024»), которая ежегодно объединяет 40 молодых специалистов комплекса ядерных установок на ближайшие две недели с целью повышения уровня профессиональной подготовки и личностного роста.

Школа проходит в очном формате с применением дистанционных методов обучения, что имеет ряд преимуществ: доступность лекционных материалов в любое время, индивидуальный подход к участникам Школы, возможность коммуникаций между работниками разных подразделений, освоение





полезных навыков в профессиональной сфере в части обеспечения безопасности на ядерных объектах, снижение уровня стресса при прохождении тестирования ввиду неограниченного числа попыток.

Программу Школы можно условно разделить на два модуля.

В первом модуле предполагается изучение материалов, прослушивание лекций и видеоуроков, выполнение практических заданий на крупнейшей в России образовательной платформе «Нетология». Штат преподавателей

«Нетологии» – это ведущие специалисты крупных сервисов, таких как Mail, «Яндекс», «Сбер», Google и другие, которые делятся своими практическими кейсами.

Второй модуль Школы – улучшение профессиональных компетенций по темам: «Методы и средства радиационного и дозиметрического контроля», «Современные требования по обеспечению ядерной и радиационной безопасности при ведении работ в области использования атомной энергии», «Система государственного учета и контроля ядерных материалов» и «Техногенная безопасность на объектах использования атомной энергии». Каждая из тем имеет непосредственное отношение к сфере деятельности участников Школы. Развитие таких навыков напрямую влияет на способность работника справляться с трудностями на работе, адаптироваться к изменениям в нормативной документации, развиваться профессионально и эффективно.

28 октября открылась первая в Ленинградской области тематическая профильная смена «Коды Курчатова». Научную профильную смену в еще одном регионе Российской Федерации организовал и проводит НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

Шестьдесят учеников гатчинских 8-х Курчатовских классов собрались в актовом зале Гатчинской СОШ № 9. Приветствовали юных курчатовцев ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ кандидат физико-математических наук Сергей Воробьев, начальник научно-образовательного центра Института Татьяна Быкова, директор Гатчинского районного методического центра Елена Глыбина. Старт первой в области профильной смены дала по видеосвязи директор Департамента образовательной деятельности и молодежной политики НИЦ «Курчатовский институт» Зоя Чернышева.

Первая в области тематическая профильная смена посвящена физике. Программа насыщена лекциями и практикумами по изучению элементарных частиц, медицинской радиологии, нейтронным исследованиям, а еще решением нестандартных задач по физике, интеллектуальными играми и мастер-классами ведущих ученых Института.



6 ноября в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ состоялся очный этап Школы подготовки кадрового резерва НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

Основными целями Школы являлись развитие кадрового резерва комплекса ядерных установок, выявление потенциала резервистов, продвижение и мотивация сотрудников. Это мероприятие стало первым шагом к распространению положительного опыта развития системы кадрового резерва во всем Институте.

В рамках кадрового резерва решаются текущие профессиональные задачи с предварительной подготовкой на популярной обучающей платформе «Нетология» для тренировки навыков, способствующих выполнению самостоятельных проектных задач.

Модераторы мероприятия, бизнес-тренер и эксперт Высшей школы экономики Алена Чистякова и начальник Центра по подготовке персонала Светлана Шека, подготовили резервистов к качественному выполнению нетиповых проектов.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ с 13 по 15 ноября 2024 г. состоялся XI Всероссийский молодежный научный форум с международным участием «Open Science 2024», который распахнул свои двери для молодых ученых и специалистов предприятий атомной отрасли, а также студентов ведущих учебных заведений нашей страны. Уже в одиннадцатый раз Форум объединил большое количество перспективной, талантливой молодежи у себя на площадке.

Традиционно можно отметить географию форума и численность зарегистрированных участников. В этом году в Гатчину прибыли около 300 участников из Москвы и Санкт-Петербурга, а также из Иркутска, Казани, Томска, Самары, Пятигорска и других городов. Форум стал возможностью объединить не только молодежь из России – в этом году его посетили гости из Беларуси, Казахстана и Сирии.

Три плодотворных дня, каждый из которых был насыщен докладами по генетике, биомедицине, биофизике, ядерной медицине, физике конденсированного состояния, физике и технике реакторов и ускорителей, теоретической физике и многим другим, пролетели незаметно. Новинкой этого форума стало мероприятие «Наука в городе», которое проходило в популярном молодежном пространстве «K750». В неформальной обстановке желающие рассказали о своей научной жизни в стиле «стендап».



В научно-образовательном центре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 22 ноября состоялся II (очный) этап конкурса «PRO-Наука». Ученики 8–11-х классов защищали свои научные проекты в области физики, химии и биологии перед компетентным жюри – специалистами Института.

Из 18 работ во II тур прошли 11. Это были и изобретения, и исследовательские проекты. Жюри отметило высокий уровень работ, мотивированность и неподдельный интерес участников как к работам (своим и конкурентов), так и к конкурсу в целом.

Однозначно лучшей стала практическая работа Софии Болдорева из 226-го лицея Фрунзенского района Санкт-Петербурга. Одиннадцатиклассница представила проект «Исследование и создание электрокардиографа» и заслуженно заняла первое место в номинации «Физика». Созданный ею портативный прибор, работу которого автор продемонстрировала, достоин быть выпущен в свет.

Второе место в номинации «Физика» занял Арсений Щелкин с работой «Пушка Гаусса». Екатерина Новикова, попробовавшая сконструировать телескоп из доступных всем материалов, оказалась на третьем месте. Все лауреаты в этой номинации учатся в 11-м классе 226-го лицея.

В номинации «Биология» второе место заняли восьмиклассницы Варвара Салтыкова и Виктория Зубова из Гатчинской СОШ № 2. Варвара работала над созданием экологического паспорта своей школы, а Виктория изучала, какими растениями можно наиболее эффективно озеленить пришкольную территорию. Третье место присудили Матвею Крючкову (школа № 225 Адмиралтейского района Санкт-Петербурга, 8-й класс) за исследование такой экологической проблемы, как цветение водорослей. Его выступление, как и защиту Виктории Зубовой, отдельно отметило жюри.

Все участники получили дипломы, призеров наградили памятными подарками.



С 27 по 29 ноября в рамках Десятилетия науки и технологий состоялся IV Конгресс молодых ученых на площадке «Сириуса», на которой развернулась масштабная выставочная экспозиция различных компаний и научных институтов. В работе Конгресса приняла участие делегация специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Они посетили мероприятия Конгресса и обсудили возможности сотрудничества с другими участниками.

В состав делегации Института вошли лаборант-исследователь группы квантовой механики отдела квантовой физики и химии Отделения перспективных разработок Полина Хадеева, лаборант-исследователь лаборатории релятивистской ядерной физики Отделения физики высоких энергий Назар Бурмасов, лаборант-исследователь сектора теории конденсированного состояния Отделения теоретической физики Юлия Барамыгина, младший научный сотрудник лаборатории биотехнологий Отделения молекулярной и радиационной биофизики Дарья Головкина, а также начальник Центра по подготовке персонала (ЦПП) Светлана Шека, начальник отдела организационной деятельности и молодежной политики ЦПП Наталья Петрова, председатель Совета молодых ученых и специалистов Алина Железова, а также другие работники Института.

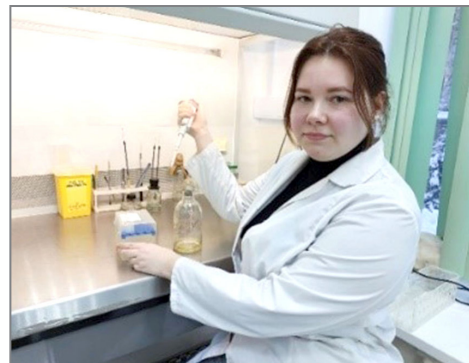
Ученые НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ вместе с коллегами из Института биоорганической химии им. акад. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова и МГУ им. М. В. Ломоносова обнаружили и изучили ранее неизвестное семейство антимикробных пептидов, которые в перспективе могут стать основой для создания нового, более эффективного вида антибиотиков.

Подобные вещества синтезируются в организмах многих животных для защиты своих хозяев от бактериальных инфекций и уже доказали свою эффективность в ходе эволюции. Ученые назвали новое семейство соединений «румицидины», т. к. они были обнаружены у антилоп. При помощи современного арсенала методов румицидины подверглись тщательному исследованию как со структурной, так и с функциональной точки зрения для детального определения механизма их действия на бактерии.

Наши коллеги обнаружили, что в геноме жвачных есть участки, которые могут отвечать за выработку этих антимикробных пептидов. Они состоят примерно из 30 аминокислот и нарушают работу бактериальной рибосомы – молекулярного комплекса, который синтезирует белки и доставляет их в клетку через выходной пептидный канал. Румицидин «проникает» в этот канал и вызывает закупоривание рибосомы, т. е. как минимум механически препятствует прохождению нового растущего белка. Но, как оказалось, антимикробный пептид нарушает и сам процесс синтеза белка на рибосоме, а белки выполняют все функции в организме: строительные, транспортные, ферментативные. Соответственно, бактериальная клетка погибает.

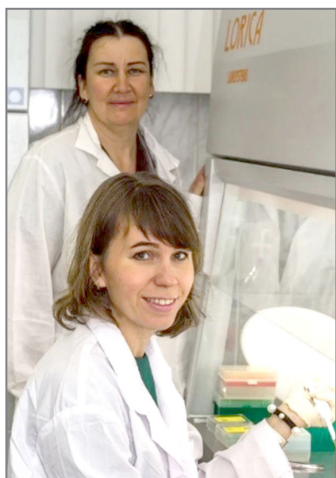


Укрепление грунта является одним из необходимых этапов строительства различных объектов. Традиционный метод – применение химических реагентов, таких как бентонит, силикаты или акриламид. Однако в последнее десятилетие активно разрабатывается технология биоцементации, предполагающая использование специальных уреолитических бактерий, осаждающих кристаллы карбоната кальция. Эти кристаллы способны связывать между собой частицы грунта и тем самым повышать его прочность. Такой метод является более экологичным.



Ученые НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ нашли способ улучшить характеристики грунта за счет добавления наполнителя из измельченной макулатуры. Это способствует более равномерному распределению осаждаемого карбоната кальция и улучшению механических свойств грунта. Прочность экспериментальных образцов по сравнению с образцами без наполнителя повысилась почти в два раза. Технология может также использоваться для ремонта трещин в цементобетонных конструкциях, для предотвращения оседания песчаного грунта и разрушения склонов.

Кроме того, ученые НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ предложили метод, позволяющий снизить затраты на культивирование уреолитических микроорганизмов. Для этого была разработана специальная питательная среда, в которой дорогостоящие компоненты – дрожжевой экстракт и пептон (белковый субстрат животного происхождения) – заменены на экстракт из отработанных пивных дрожжей.



Ученые НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ вместе с коллегами из Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. И. П. Павлова запатентовали препарат для лечения болезни Паркинсона на ранних стадиях. Он воздействует на фермент глюкоцереброзидазу, который кодируется геном *GBA1*. Мутации в нем в 10 раз увеличивают риск развития патологии. Испытания на клетках пациентов показали, что созданная учеными молекула восстанавливает активность фермента.

При разработке препарата российские ученые взяли за основу исследования иностранных коллег, которым удалось исправить работу фермента с помощью малой молекулы – фармакологического шаперона (эта молекула может восстанавливать структуру белковых образований).

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ построили компьютерную модель глюкоцереброзидазы и стали искать химические модификации шаперона, которые могли бы повысить эффективность ее действия. Затем ученые синтезировали несколько молекул и испытали, как они воздействуют на активность фермента в клетках пациентов с мутацией в гене *GBA1*. Для эксперимента исследователи выбрали макрофаги (клетки, захватывающие и переваривающие бактерии), в которых глюкоцереброзидаза проявляет максимальную активность. Эксперименты показали, что полученное соединение более эффективно снижает количество вредного субстрата, вызывающего деградацию нейронов, чем взятые за основу иностранные препараты (которые за рубежом уже проходят стадию клинических испытаний).

По словам ученых, созданное ими средство обладает превентивным действием: оно может предотвратить гибель нейронов, поэтому лекарство нужно применять на самых ранних стадиях развития болезни.

По материалам пресс-центра Института

Основные результаты научной деятельности 2024

Оформление обложки *Т. А. Парфеевой*
Корректоры *Н. В. Силинская, Е. Ю. Оробец*
Компьютерная обработка, верстка *Е. В. Веселовской*

Отпечатано в издательско-полиграфическом отделе
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на Konica Minolta AccurioPrint C4065

188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова роща, д. 1.
Зак. 147, тир. 150, уч.-изд. л. 19; 26.06.2025.