

РОССИЙСКИЙ  
ФОНД  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ISSN 1605-8070

# ВЕСТНИК РФФИ

1 (73) январь–март 2012



# ВЕСТНИК РФФИ

№ 1 (73) январь—март 2012 года

**Основан в 1994 году**  
Зарегистрирован Комитетом РФ по печати,  
рег. № 012620 от 03.06.1994 г.

**Учредитель**  
**Российский фонд фундаментальных исследований**

Главная редакция:

Главный редактор В.Я. Панченко, академик, председатель Совета РФФИ  
Заместитель главного редактора В.А. Шахнов, член-корреспондент РАН,  
ответственный секретарь

Редактор тематического блока — приглашенная персона,  
в зависимости от темы номера

Редакционная коллегия:

академики А.Ф. Андреев, В.А. Геловани, Ю.В. Копаев, В.П. Матвеевко,  
Е.И.Моисеев, А.М. Музафаров, Р.В. Петров, И.Б. Федоров, В.В. Ярмолюк,  
члены-корреспонденты РАН П.П. Пашинин, Е.Н. Черных, А.Г. Габиров,  
профессора В.П. Кандидов, П.К. Кашкаров.

Редакция:

Директор издания — В.И. Елисеев, директор РФФИ  
Шеф-редактор — А.П. Локтев, начальник Издательского отдела РФФИ  
Выпускающий редактор — А.О. Тимофеева, заместитель начальника издательского  
отдела РФФИ

Адрес редакции:

119991, Москва, Ленинский проспект, 32а  
Тел.: (495) 952 6053, факс: (495) 952 5541  
e-mail: [pressa@rfbr.ru](mailto:pressa@rfbr.ru)



**ИСТОРИЧЕСКИЙ ЭКСКУРС**

Развитие международных связей РФФИ .....7

**ОПЫТ И РЕЗУЛЬТАТ**

*Цыганов С.А., Рудицкая Е.Р.*

Конкурс ориентированных фундаментальных исследований..... 12

**ИНТЕРВЬЮ**

*Пашинин П.П. в газете «Поиск»*

Практика широкого формата .....21

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК**

Аннотация к тематическому блоку .....27

Обзор по междисциплинарной теме: фундаментальные проблемы теоретической математики..... 27

Обзор по междисциплинарной теме: когерентное взаимодействие рентгеновского, синхротронного и терагерцового излучения с конденсированными средами ..... 35

Обзор по междисциплинарной теме: фундаментальные исследования проблем твердотельной волновой электроники ..... 39

Обзор по междисциплинарной теме: фундаментальные основы создания новых лекарственных препаратов и вакцин ..... 45

Обзор по междисциплинарной теме: фундаментальные аспекты геномики и протеомики эукариот..... 49

Обзор по междисциплинарной теме: фундаментальные основы формирования ресурсной базы стратегического сырья (Au, Ag, Pt, Cu, редкие элементы и металлы)..... 59

Обзор по междисциплинарной теме: фундаментальные проблемы использования супер-ЭВМ петафлопного класса для детального предсказательного моделирования в научных и инженерных исследованиях ..... 65

Обзор по междисциплинарной теме: развитие фундаментальных основ, алгоритмического обеспечения и вычислительных методов для информационных систем нового поколения ..... 73

Обзор по междисциплинарной теме: искусственное электромагнитное воздействие на природную геологическую среду ..... 85

*Обзоры подготовлены членами совета «офи»*

*Сазонов С.Ю., Буренин Р.А.*

Автоматизация и дооснащение телескопа РТТ-150 для выполнения задач наблюдательной космологии и проведения исследований астрофизических объектов со сверхвысоким временным разрешением ..... 98

<i>Панасюк М.И., Хренов Б.А., Калмыков Н.Н., Яшин И.В., Гарипов Г.К., Климов П.А., Константинов А.А., Сапрыкин О.А., Шаракин С.А., Шустова О.П.</i> <b>Мониторинг небесной сферы с высоким угловым и временным разрешением в космических лучах (протонов, ядер, фотонов и нейтрино) ультравысокой энергии при помощи орбитального детектора .....</b>	<b>105</b>
<i>Лапинов А.В., Левшаков С.А., Козлов М.Г.</i> <b>Исследование фундаментальных свойств Вселенной на основе прецизионной спектроскопии молекул.....</b>	<b>111</b>
<i>Конаев Ю.В.</i> <b>Исследование сверхвысокочастотных свойств туннельно-резонансных гетероструктур с целью создания многофункциональных СВЧ микросхем и генераторов терагерцового диапазона .....</b>	<b>119</b>
<i>Максимов М.В., Гордеев Н.Ю., Новиков И.И., Савельев А.В., Шерняков Ю.М., Жуков А.Е.</i> <b>Пространственно-одномодовые источники лазерного излучения на квантовых точках со сверхширокими спектрами генерации .....</b>	<b>126</b>
<i>Якимов А.И.</i> <b>Разработка опытного образца модулятора оптического излучения на основе эффекта Штарка в многослойных гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками Ge .....</b>	<b>130</b>
<i>Молчанов В.Я.</i> <b>Интеллектуальные акустооптические системы адаптивного управления спектральными амплитудами и фазами фемтосекундных импульсов мощных лазерных комплексов.....</b>	<b>134</b>
<i>Кошелец В.П.</i> <b>Сверхпроводниковые интегральные наноструктуры для приема и генерации в терагерцовом диапазоне .....</b>	<b>141</b>
<b>ВЫБОР МОЛОДЫХ</b>	
<b>Геносистематика печеночников — древнейших наземных растений .....</b>	<b>149</b>
<b>Цифровой морфометрический анализ геосистем как возможность для сотрудничества географов .....</b>	<b>153</b>
<b>Генетическая стабильность клонированных in vitro орхидных .....</b>	<b>158</b>

# «RFBR Journal»

No1 (73), January–March 2012

(Supplement to RFBR Information Bulletin No 20)

---

---

## HISTORICAL BACKGROUND

Development of RFBR International Relations..... 7

## EXPERIENCE AND RESULT

*Tsyganov S.A., Rudtskaya E.R.*

Oriented Basic Research Competition..... 12

## INTERVIEW

Large-Scale Practice

(Interview with P.P. Pashinin in Poisk newspaper)..... 21

## THEMATIC SECTION

Annotation for the Thematic Section..... 27

Interdisciplinary Review: Fundamental Problems of Theoretical Mathematics ..... 27

Interdisciplinary Review: Coherent Interaction of X-Ray, Synchrotron and Terahertz  
Radiation with Condensed Matter ..... 35

Interdisciplinary Review: Basic Research on Solid-State Wave Electronics ..... 39

Interdisciplinary Review: Fundamental Principles for Creating New Medicines and Vaccines..... 45

Interdisciplinary Review: Fundamental Aspects of Genomics and Proteomics of Eukaryotes ..... 49

Interdisciplinary Review: Fundamental Principles for Formation of Strategic Raw  
Material Resource Base (Au, Ag, Pt, Cu, Rare Elements and Metals)..... 59

Interdisciplinary Review: Basic Issues in the Use of Petaflop Supercomputer  
for Detailed Predictive Modeling in Scientific and Engineering Research..... 65

Interdisciplinary Review: Development of Basic Research, Algorithms and Calculation  
Methods for New-Generation Information Systems ..... 73

Interdisciplinary Review: Impact of Artificial Electromagnetic Radiation on Geo-Environment..... 85

*The reviews were prepared by the members of the Oriented Basic Research Council*

*Sazonov S.Yu., Burenin R.A.*

Automatization and modernization of the RTT-150 telescope for application to observational  
cosmology and studies of astrophysical objects with ultra-high temporal resolution ..... 98

<i>Panasyuk M.I., Khrenov B.A., Kalmykov N.N., Yashin I.V., Garipov G.K., Klimov P.A., Konstantinov A.A., Saprykin O.A., Sharakin S.A., Shustova O.P.</i> <b>Monitoring of Celestial Sphere with High Angular and Time Resolution in Ultrahigh Energy Cosmic Rays (Protons, Nucleuses, Photons, and Neutrinos) by Means of an Orbital Detector .....</b>	<b>105</b>
<i>Lapinov A.V., Levshakov S.A., Kozlov M.G.</i> <b>Research on the Fundamental Properties of the Universe Based on Precision Spectroscopy of Molecules .....</b>	<b>111</b>
<i>Kopayev Yu.V.</i> <b>Research on Superhigh Frequency Properties of Resonant-Tunneling Heterostructures Aimed at Creation of Multifunctional SHF-Microcircuit and Generators of the Terahertz Range.....</b>	<b>119</b>
<i>Maksimov M.V., Gordeyev N.Yu., Novikov I.I., Savelyev A.V., Shernyakov Yu.M., Zhukov A.Ye.</i> <b>Spatial Single-Mode Sources of Laser Radiation on Quantum Dots with Ultra Wide Generation Spectra .....</b>	<b>126</b>
<i>Yakimov A.I.</i> <b>Development of a Prototype Model of the Optic Radiation Modulator Based on Stark effect in Ge/Si Multilayer Heterostructures with Ge Quantum Dots.....</b>	<b>130</b>
<i>Molchanov V.Ya.</i> <b>Intellectual Acousto-Optical Systems of Adaptive Management of Spectral Amplitudes and Phases of Femtosecond Impulses in High-Energy Laser Stations.....</b>	<b>134</b>
<i>Koshelets V.P.</i> <b>Superconductor Integral Nanostructures for Reception and Generation in the Terahertz Range .....</b>	<b>141</b>
<b><i>THE CHOICE OF YOUNG SCIENTISTS</i></b>	
<b>Genosystematics of Liverworts - the Oldest Land Plants.....</b>	<b>149</b>
<b>Digital Morphometric Analysis of Geosystems as an Opportunity for the Cooperation of Geographers...</b>	<b>153</b>
<b>Genetic Stability of Orchid Plants Cloned In Vitro.....</b>	<b>158</b>

## РАЗВИТИЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ СВЯЗЕЙ РФФИ

Шаров А. Н.<sup>1</sup>

Историю зарубежных связей РФФИ можно проследить с его зарождения. Как вспоминают участники обсуждений этого проекта И.Г. Дежина и Л. Грэхем, «основной моделью во время его создания послужил Национальный научный фонд (ННФ США — прим. автора), но после того как РФФИ начал свою деятельность, его руководство принимало во внимание также опыт других иностранных организаций, включая БРС (Немецкое научно исследовательское сообщество)»<sup>2</sup>. Благодаря этому РФФИ, сформированный с учетом наиболее успешных западных образцов, не только фактически расчистил для российских ученых ранее не доступный им путь творческого сотрудничества с зарубежными коллегами, а также путь к собственному взаимодействию с зарубежными научными фондами, не имевшими «родственных» партнеров в нашей стране.

Сходство РФФИ с ННФ США заключалось главным образом в статусе федерального правительственного учреждения, хотя, в отличие от американского фонда, РФФИ не стал агентством исполнительной власти. В то же время процесс экспертизы заявок в большей степени напоминал Немецкое научно-исследовательское сообщество (ННИС), в котором бюрократический аппарат полностью устранен от содержательной экспертизы поступающих проектов, рассматриваемых экспертами из рядов научного сообщества.

Характерно, что первым партнером РФФИ в Европе стало именно ННИС. В феврале 1995 г. с ним было заключено соглашение, предусматривающее проведение двусторонних конкурсов. В отличие от ряда других зарубежных ор-

ганизаций: Американского фонда гражданских исследований и развития (АФГИР), Международной ассоциации по продвижению сотрудничества с учеными новых независимых государств (ИНТАС), Фонда «Открытое общество» Дж. Сороса и др., ННИС не практиковало поддержку российских ученых непосредственно в России, однако сумело сыграть видную роль, обеспечивая им достаточно продолжительные командировки в Германию с возмещением расходов и выплатой суточных.

А первой зарубежной организацией, с которой у РФФИ появилось соглашение в декабре 1994 г., стал Государственный фонд естественных наук (ГФЕН) КНР, который старше РФФИ всего на 5 лет, но был ценен не столько опытом своей деятельности, сколько как партнер по налаживанию новых форм коллаборации с бурно прогрессирующим научным сектором этой страны.

В 90-е гг. РФФИ фактически являлся единственной государственной организацией, обладавшей полномочиями и средствами для финансирования международных проектов в области фундаментальных наук. Средства эти были скромными, но значимость роли РФФИ заключалась главным образом в том, что он оказался одной из немногих научных организаций в России, функционирующей по понятным для зарубежных партнеров правилам, через которую они могли бы оказывать поддержку российским ученым в непростых условиях этого периода.

В это время активно идет расширение зарубежных связей фонда: заключаются соглашения с Национальным центром научных ис-

<sup>1</sup>



Александр Николаевич Шаров, начальник управления международных связей, e-mail: a.sharov@rfbr.ru.

<sup>2</sup> Дежина И.Г., Грэхем Л. Наука в новой России: кризис, помощь, реформы. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2009. С. 73.

следований Франции (НЦНИ), Нидерландской научно-исследовательской организацией (ННИО), Швейцарским национальным научным фондом (ТТННФ) и др. Главной целью заключаемых соглашений остается привлечение дополнительных средств для поддержки научной деятельности в России. В связи с этим условия международных конкурсов далеко не всегда были симметричными. Иногда участие РФФИ ограничивалось проведением экспертизы совместных заявок параллельно с иностранным фондом, который самостоятельно финансировал и российскую, и иностранную группы, выполнявшие проект. Такой подход использовался в сотрудничестве с ШНФФ.

В других случаях РФФИ по итогам совместно проведенного конкурса предоставлял финансирование российской части коллектива, в то время как зарубежный партнер обеспечивал весь международный коллектив. При этом больше половины зарубежных средств могло направляться именно российской стороне, как это было, например, в совместных программах с ННИО, в которых 70 % голландских средств поступало российским ученым. Стоит отметить, что такой подход поддерживался российской исполнительной властью, которая освобождала гранты зарубежных организаций от налогообложения с помощью ежегодно обновляемых перечней, утверждаемых распоряжениями Правительства РФ.

Одновременно РФФИ проводил международные конкурсы, которые финансировались и на паритетных началах. В данном случае поддержка проектов, осуществляемых в сотрудничестве с учеными других стран, оказывалась в соответствии с соглашениями, заключенными с зарубежными организациями, по которым РФФИ обязывался предоставить финансирование российским участникам проектов, прошедшим конкурс, а зарубежная организация — представителям своей страны, участвующим в сотрудничестве. Проекты должны были пройти экспертизу в обеих организациях, и решение о поддержке принималось совместно, основываясь на мнениях экспертов двух стран. Именно на таких условиях осуществлялось сотрудничество с первыми партнерами РФФИ: ННИС и ГФЕН, — и именно эта схема стала со временем основной.

Особое место в истории РФФИ 1990-х занимает совместная программа с ИНТАС — орга-

низацией, созданной в рамках ЕС специально для поддержки науки в странах бывшего СССР. В этой работе ассоциация столкнулась со сложностями в оценке как научных проектов, предлагаемых российскими учреждениями, так и самих научных коллективов. Сыграли свою роль и языковой барьер, и длительная закрытость от Запада многих направлений советской науки, и попытки отдельных ученых злоупотреблять зарубежной помощью. В рамках совместной программы РФФИ получил первый опыт организации международных экспертных комитетов: конкурсные заявки отбирались на совместных заседаниях экспертов Фонда и ИНТАС.

В 2000-е гг. круг партнеров РФФИ стал еще шире, что повлекло за собой заметные изменения в международной стратегии фонда. Во-первых, начался отход от асимметричных форм сотрудничества. К 2006 г. РФФИ завершил все программы, в которых его роль сводилась к участию в экспертизе или предоставлении небольшой доли общего финансирования. Это сделало Фонд более внимательным к выбору тематик конкурсов: если раньше, часто оказываясь в роли «младшего» партнера, РФФИ был готов к компромиссам, то теперь он гораздо более взвешенно стал подходить к вопросам введения конкурсных приоритетов. Новацией стало проведение консультаций с экспертами с целью выработки собственных приоритетов для продвижения на международной арене.

Во-вторых, в качестве главного преимущества международных проектов стала рассматриваться не возможность привлечения зарубежного финансирования, а «удвоение результата». Суть этого эффекта заключается в том, что каждая из сторон, поддерживающих совместный проект, фактически получает за тот же грант удвоенный научный потенциал, predeterminedный участием двух коллективов вместо одного: непосредственно финансируемой отечественной группы и ее зарубежных партнеров. Однако этот эффект срабатывает не всегда, и могут встречаться случаи, когда распределение обязанностей по проекту или относительная слабость одной из участвующих сторон не позволяют «удвоить» результат. В итоге приоритетом становится поиск тем и коллективов, обладающих равными или даже более сильными (по навыкам, оборудованию и другим показателям) зарубежными партнерами, а не просто способных договариваться о подготовке совместных заявок. Важным шагом

в этом направлении стала поддержка российско-французских лабораторий, осуществляемая совместно с НЦНИ, в которой экспертизу проходит именно международный коллектив, продемонстрировавший способность к созданию устойчивого исследовательского центра. В случае высокой оценки такого центра обеими сторонами, он получает возможность участвовать в особом конкурсе проектов.

В-третьих, по-новому встала проблема дублирующего финансирования. Среди грантополучателей сложился круг активно участвующих в целом ряде международных конкурсов с самыми различными странами. В их числе были пользующиеся мировым признанием ученые, действительно способные выполнять целый пакет международных исследований в рамках своей специализации. Однако, встречались и те, кто практически не шел дальше сотрудничества «на бумаге», продвигая фактически одни и те же проекты по различным конкурсам. В условиях стремительного расширения международных программ активная поддержка первых и отсеив вторых стали новой задачей для РФФИ.

В этот же период фонд заключил первые соглашения с организациями, непосредственно занимающимися научными исследованиями. В целом среди партнеров РФФИ преобладают аналогичные ему фонды и иные организации, главной функцией которых является финансирование исследований. В то же время, в течение 2000-х гг. среди них появились такие, как немецкое Объединение им. Гельмгольца, ЦЕРН, Лондонское Королевское общество, каждое из которых является уникальным как по статусу и полномочиям, так и по условиям выделения финансовых средств, и подготовка соглашений с ними нередко требовала длительной проработки.

Важная новация второй половины 2000-х гг. — участие в многосторонних программах поддержки научных исследований. Первой среди них была «Всемирная сеть материаловедения», инициированная и координируемая ННФ, к которой РФФИ присоединился в 2005 г. В 2007 г. по той же схеме Фонд вошел в программу ННФ международного сотрудничества по химии. С 2006 г. РФФИ также принимает участие в объединении научных учреждений балтийских стран «ВОМЛ5», нацеленном на поддержку исследований по проблематике Балтики. В 2010 г. в Петербурге на встрече руководителей организаций, финансирующих

науку в странах «восьмерки», было подписано соглашение о проведении совместного конкурса G8, в котором могут принять участие ученые этих стран (т.н. «Инициатива «восьмерки» в области многостороннего финансирования исследований»).

В ряду аналогичных международных проектов, заключенные в 2011 г. соглашения о присоединении РФФИ к ряду европейских многосторонних программ: «Европейская молекулярно-биологическая лаборатория (EMBL)», по изучению космических частиц (ASPERA), исследованиям в области разработки новых материалов (Euro-Chemistry), использованию рентгеновского лазера на свободных электронах (XFEL).

Процессы глобализации, охватывающие наряду с другими областями и сферу научной деятельности, одним из своих главных проявлений имеют возрастание международного научного сотрудничества. Этому способствует ряд объективных причин, таких как развитие коммуникационных технологий, возросшая мобильность научных работников, масштабы решаемых научных проблем и требования к уникальности применяемого для этого научного оборудования, высокие потребности научной сферы в ресурсах для роста и ограниченные возможности их мобилизации в отдельных странах. Главный стимул развития международного научного сотрудничества — стремление к нему самих ученых, налаживание, расширение и углубление творческих контактов учеными разных стран. С учетом всех этих факторов выстраивается современная научная политика государства, деятельность занятых в научной сфере организаций, в том числе РФФИ.

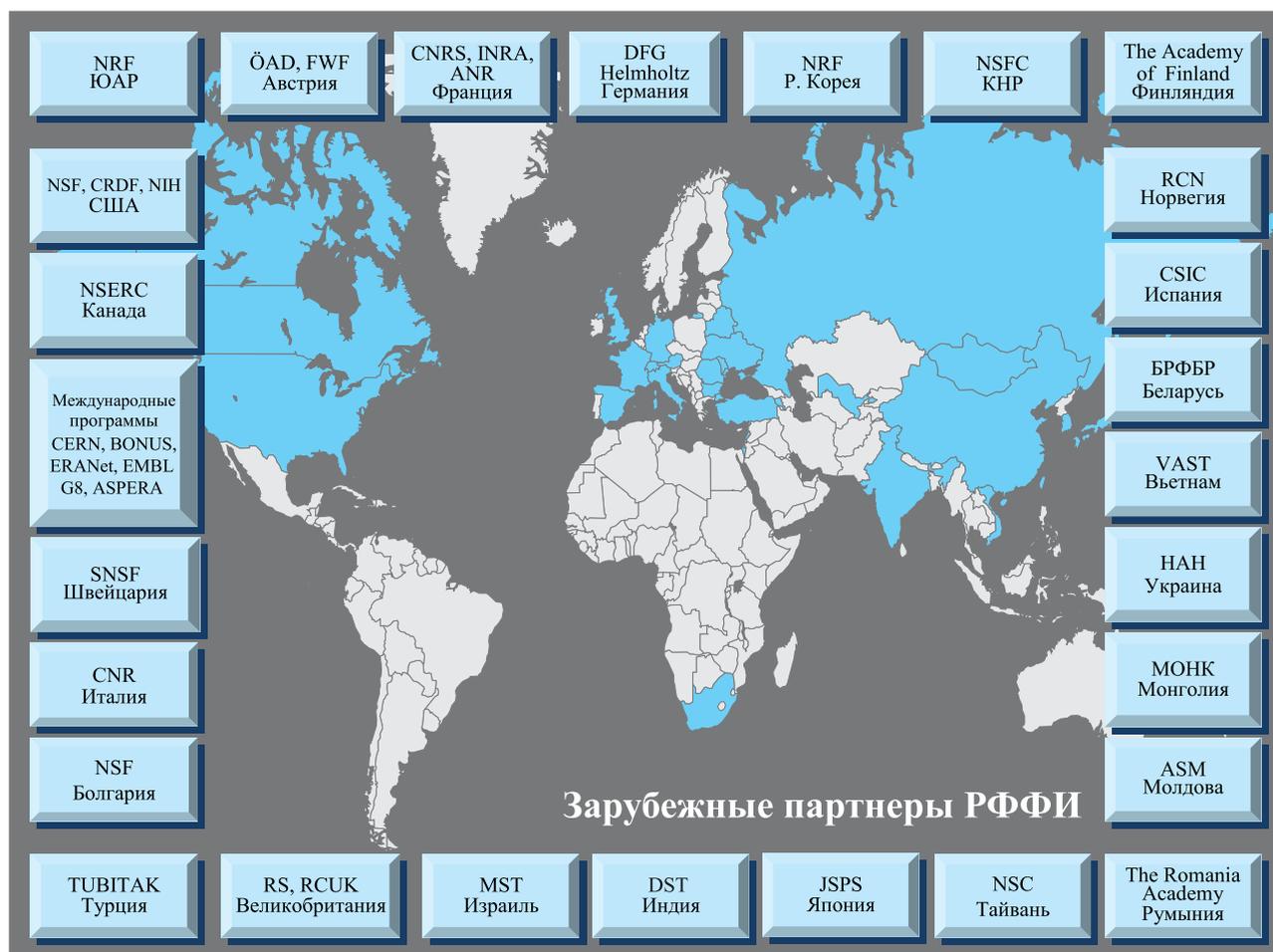
Предусмотренная уставом РФФИ международная деятельность имеет своей целью эффективное выполнение основного предназначения Фонда — оказание всемерной поддержки отечественной фундаментальной науке, обеспечение её рациональной интеграции в мировую систему научных связей в национальных интересах России. В этом случае содействие отечественным исследователям оказывается при условии их кооперации с зарубежными учеными в рамках проектов, которые РФФИ отбирает на конкурсной основе совместно со своими зарубежными партнерами. Соответственно, основной формой международного сотрудничества, в которое вовлечен Фонд, является проведение международных конкурсов, которые ор-

ганизуются в рамках договоренностей, зафиксированных в его соглашениях с партнерами.

Начиная с 1994 г., когда было заключено первое такое соглашение, круг зарубежных партнеров РФФИ непрерывно расширялся и в настоящее время насчитывает более 30 национальных организаций из 26 стран, а также 6 международных организаций.

лом, они практически не распространяются на Латинскую Америку и Ближний Восток.

В последние годы ведущими зарубежными партнерами РФФИ в рамках его двусторонних связей были такие страны, как Франция (Национальный центр научных исследований и Национальный институт сельскохозяйственных исследований), Германия (Немецкое на-



Этот перечень включает крупнейшие зарубежные организации, специализирующиеся на финансировании научных исследований в странах, занимающих ведущие позиции в научной области. На долю этих стран, включая таких безусловных лидеров, как страны «восьмерки», а также становящиеся вровень с ними новые лидеры в этой области, такие как Китай, Индия, Р. Корея, ЮАР, приходится более 80 % общей суммы расходов на НИОКР в мире. Вместе с тем, судя по приведенной диаграмме, в географии международных связей РФФИ остается много «белых пятен», поскольку ими охвачены далеко не все европейские и азиатские страны с развитым научным потенциа-

льно-исследовательское сообщество и Ассоциация им. Гельмгольца) и КНР (Государственный фонд естественных наук Китая), на долю которых приходилось свыше 50 % всех поддержанных исследовательских проектов и объема средств РФФИ, выделяемых для финансирования международных проектов.

Следует отметить, что перед Фондом не стоит задача наладить сотрудничество «со всеми». На всю международную деятельность расходуются в последние годы не более 10 % его бюджета, что сопоставимо с долей расходов на эти цели научных фондов других стран. Учитывая вполне конкретные финансовые обязательства, которые принимает на себя РФФИ, всту-

пая в соглашения о международном сотрудничестве (договариваясь о числе поддерживаемых проектов, их продолжительности, а также о размерах выплачиваемых по ним грантов), развивать международные связи увеличением числа зарубежных партнеров такими же высокими темпами, как это происходило в 1990-е и 2000-е годы, представляется нецелесообразным и вряд ли возможным. На смену экстенсивному пути расширения международных связей приходит забота о повышении их интенсивности и эффективности.

Как известно, любая форма кооперации дает сложение вкладов её участников в создаваемый ими совместный продукт. Оказывая «вкладчину» с зарубежными партнерами поддержку конкурсным международным проектам, в которых участвуют российские исследователи, РФФИ предоставляет им не только свои гранты, но и открывает возможность пользоваться плодами более щедрого, как правило, финансирования зарубежных участников проектов. В 2010 г., например, РФФИ затратил на финансирование международных проектов (с участием исследователей из стран «дальнего зарубежья») приблизительно в 2,5 раза меньше, чем в целом его партнеры в этих странах. Естественно, что возможности последних также неодинаковы, поэтому финансирование, например, проектов с рядом стран (Великобритания, Китай, Индия, Монголия, Вьетнам) происходит практически на паритетной основе (1:1), тогда как совместно с Академией Финляндии, Австрийским научным фондом в пропорции 1:10, с американским ННФ, немецкими ДФГ и ОГ, французским НЦНИ, тайваньским ННС — в пропорции 1:4–1:5.

Вместе с тем, условиями сотрудничества фонда с зарубежными партнерами в ряде международных научных программ, к которым РФФИ присоединился (ЦЕРН, ЕМВЬ, ХРЕГ),

предусмотрена выплата им грантов только российским участникам совместных исследовательских проектов, тогда как вклад партнеров выражается в предоставлении возможности работать на принадлежащем им научном оборудовании и пользоваться другими инфраструктурными объектами.

Необходимо также принимать во внимание и то, что заметное (до 20 % в отдельных проектах) число участников исследовательских коллективов, получающих гранты зарубежных партнеров РФФИ (в Германии, Франции, Великобритании и ряде других стран), приходится на ученых-выходцев из России. Таким образом, международная деятельность Фонда способствует поддержанию и развитию связей с российской научной диаспорой.

Международная деятельность РФФИ включает также регулярную грантовую поддержку проведения в России международных научных мероприятий (конференций, семинаров и т.п.), а также участия российских ученых в аналогичных мероприятиях, проводимых за рубежом. В 2010 г. Фонд профинансировал 20 научных мероприятий в России, за тот же период 2631 человек получили гранты на участие в научных мероприятиях за рубежом.

РФФИ безусловно играет важную роль в поддержке научного сотрудничества России со странами СНГ. Благодаря соглашениям с целым рядом однопрофильных организаций этих стран (Белоруссии, Украины, Молдовы, Узбекистана, Армении), не только реализуются конкретные исследовательские проекты, но сохраняются и приумножаются традиции взаимодействия и сотрудничества ученых, выросших в научных коллективах некогда одной страны, получивших профессию в общих вузах, говорящих на русском языке, приверженцев общих научных школ.

КОНКУРСЫ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

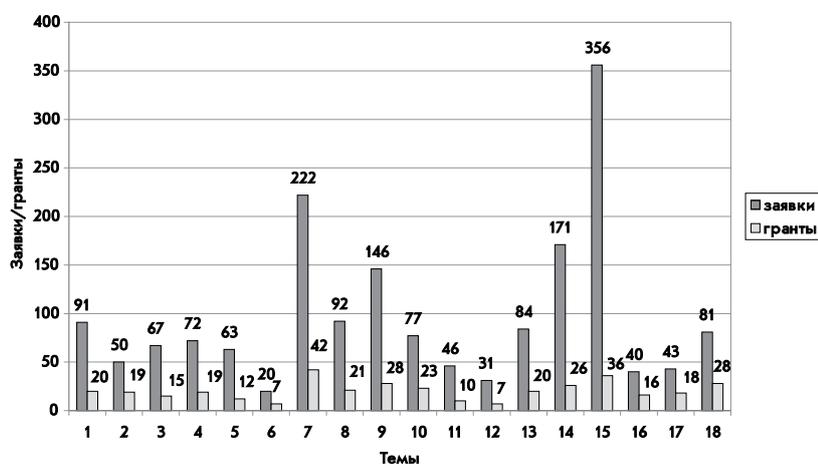
Цыганов С.А., Рудцкая Е.Р.<sup>1</sup>

В 2009–2010 гг. был организован и проведен конкурс ориентированных фундаментальных исследований по актуальным междисциплинарным темам (конкурс «офи\_м»). Для проведения первого конкурса членами Совета РФФИ было предложено 18 тем с соответствующими рубрикаторами. Всего на конкурс поступило 1752 заявки, из которых

было поддержано 367. Величина среднего гранта по данному конкурсу составила 1600 тыс. руб.

Распределение заявок и грантов по темам приведено на рис. 1.

В таблице 1 приведены сведения о соответствии развиваемых тем с приоритетными направлениями развития науки и технологий.



**Рис. 1.** Распределение заявок и грантов по темам: 1 — Фундаментальные проблемы использования супер-ЭВМ петафлопного класса для детального предсказательного моделирования в научных и инженерных исследованиях; 2 — Криогенные наноструктуры; 3 — Когерентное взаимодействие рентгеновского, синхротронного и терагерцового излучения с конденсированными средами; 4 — Космомикрофизика; 5 — Фундаментальные проблемы взаимодействия высокоинтенсивных электромагнитных полей с веществом; 6 — Сверхтяжелые элементы: синтез, свойства и астрофизические аспекты; 7 — Наноразмерные молекулярные и супрамолекулярные системы; 8 — Фундаментальные основы экологически чистой химии; 9 — Фундаментальные основы создания новых лекарственных препаратов и вакцин; 10 — Фундаментальные аспекты геномики и протеомики эукариот; 11 — Фундаментальные основы формирования ресурсной базы стратегического сырья (Au, Ag, Pt, Cu, редкие элементы и металлы); 12 — Искусственное электромагнитное воздействие на природную геологическую среду; 13 — Когнитивные исследования; 14 — Развитие фундаментальных основ, алгоритмического обеспечения и вычислительных методов для информационных систем нового поколения; 15 — Разработка и создание наноразмерных и наноструктурных материалов и покрытий на металлической, керамической и полимерной основе; 16 — Фундаментальные проблемы создания полупроводниковых наноструктур для электроники и возобновляемых источников энергии; 17 — Фундаментальные исследования проблем твердотельной волновой электроники; 18 — Фундаментальные проблемы теоретической математики.



<sup>1</sup> Сергей Алексеевич Цыганов, доктор физико-математических наук, начальник Управления ориентированных исследований РФФИ, e-mail: tsyganov@rfbr.ru.



Елена Робертовна Рудцкая, кандидат технических наук, начальник Отдела ориентированных фундаментальных исследований РФФИ, e-mail: rer@rfbr.ru.

Таблица 1

№ п/п	Приоритетные направления развития науки, технологий и техник в Российской Федерации	Финансирование в 2010 г. (руб.)
1	Безопасность и противодействие терроризму	32 200 000
2	Живые системы	92 840 000
3	Индустрия наносистем и материалов	121 900 000
4	Информационно-телекоммуникационные системы	44 950 000
5	Перспективные вооружения, военная и специальная техника	6 500 000
6	Рациональное природопользование	62 300 000
7	Транспортные, авиационные и космические системы	9 000 000
8	Энергетика и энергосбережение	21 140 000
<b>Всего:</b>		<b>390 830 000</b>

Таким образом, объем финансирования указанных тем соответствует определенным решениями Правительства РФ приоритетным направлениям.

Диаграмма рис.1 показывает, что распределение заявок по темам имеет неравномерный характер: по 6 темам из 18 число поданных на конкурс заявок не превышает 50, а по 4 темам из 18 — значительно превышает сотню. Возможно, это объясняется отсутствием единых требований к формулировке и выбору тем, что

приводит к появлению тем с широким спектром научных проблем. Наиболее яркими примерами являются темы «Наноразмерные молекулярные и супрамолекулярные системы» и «Разработка и создание наноразмерных и наноструктурных материалов и покрытий на металлической, керамической и полимерной основе».

В то же время заявки/гранты, в названии которых присутствует приставка «нано», присутствуют в 14 темах из 18 — рис. 2.

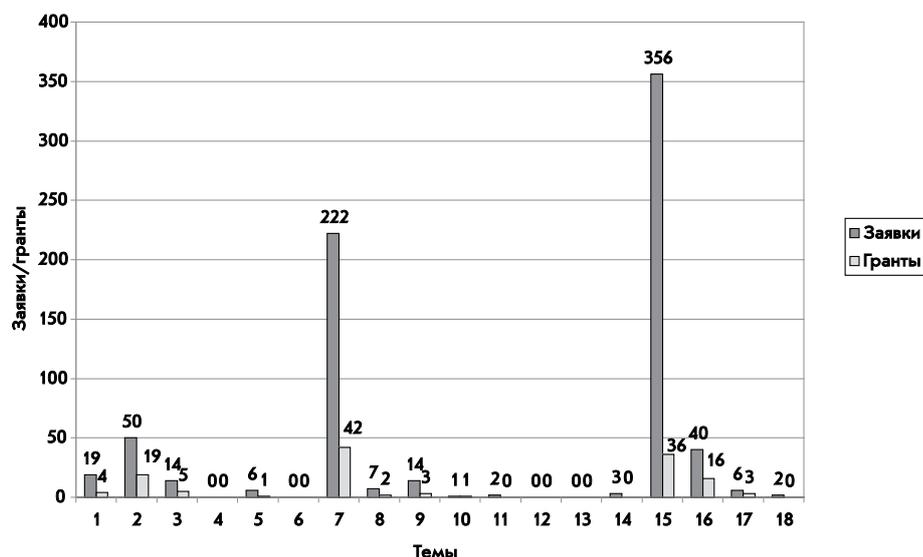


Рис. 2. Распределение по темам заявок и грантов, относящихся к «нано»-проблемам.

Данный факт, скорее всего, объясняется активным проникновением «наноидеологии» во все области знания, что должно приводить к более жестким требованиям при определении тем в рамках конкурса «офи\_м».

Похожая ситуация наблюдается и с темами по лекарственным средствам. В таблице 2 приведены данные по разным темам, заявки/гранты которых по названию могут быть отнесены к проблематике «Лекарства».

Таблица 2

Тема	Заявки	Гранты
Фундаментальные проблемы использования супер-ЭВМ петафлопного класса для детального предсказательного моделирования в научных и инженерных исследованиях	1	1
Наноразмерные молекулярные и супрамолекулярные системы	17	2
Фундаментальные основы создания новых лекарственных препаратов и вакцин	146	28
Фундаментальные аспекты геномики и протеомики эукариот	4	1
<b>ИТОГО</b>	<b>168</b>	<b>32</b>

Выше были представлены результаты оценочного анализа степени отражения проблем в рамках одной темы. Возможно, этот аспект необходимо принимать во внимание при формулировке темы и ее рубрикатора.

Другим важным моментом является распределение заявок и грантов по рубрикам каждой темы. Ниже (рис. 3–20) приводятся диаграммы данного распределения по каждой теме.

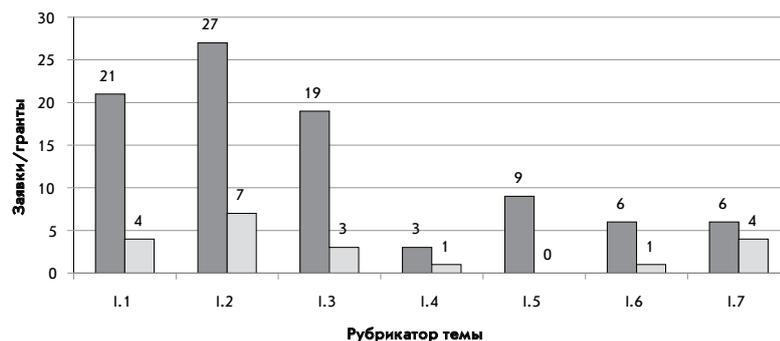


Рис. 3. Распределение заявок и грантов по рубрикам темы «Фундаментальные проблемы использования супер-ЭВМ петафлопного класса для детального предсказательного моделирования в научных и инженерных исследованиях».

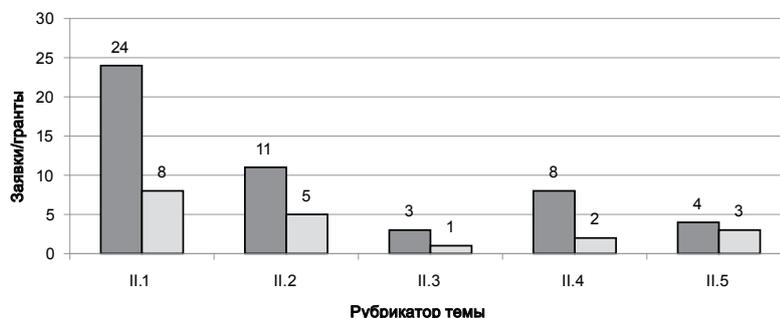


Рис. 4. Распределение заявок и грантов по рубрикам темы «Криогенные наноструктуры».

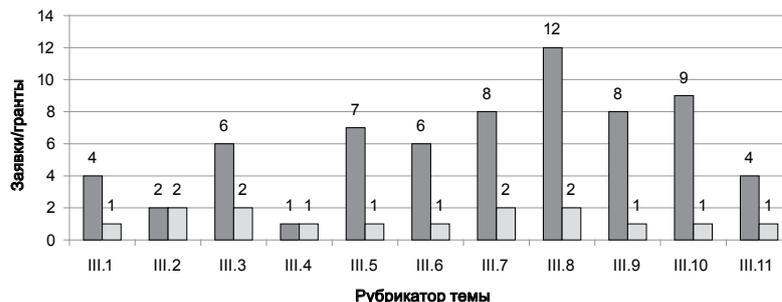


Рис. 5. Распределение заявок и грантов по рубриктору темы «Когерентное взаимодействие рентгеновского, синхротронного и терагерцового излучения с конденсированными средами».

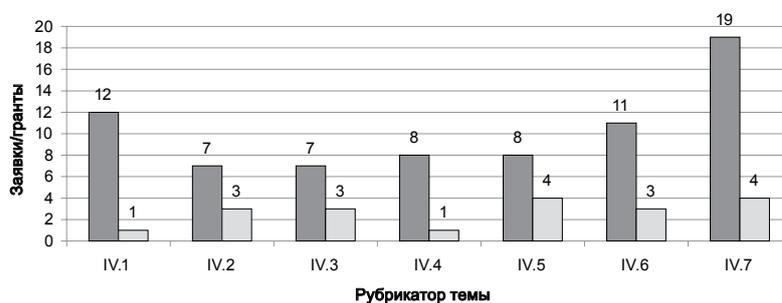


Рис. 6. Распределение заявок и грантов по рубриктору темы «Космомикрофизика».

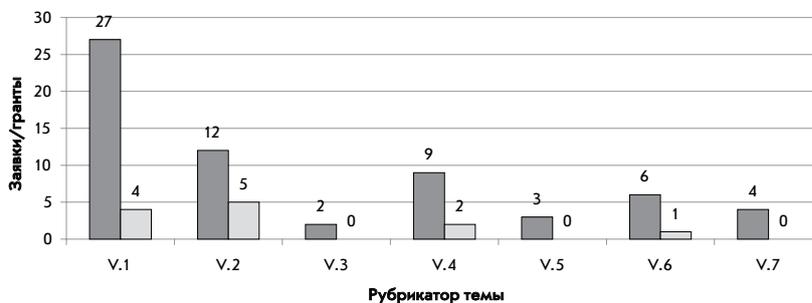


Рис. 7. Распределение заявок и грантов по рубриктору темы «Фундаментальные проблемы взаимодействия высокоинтенсивных электромагнитных полей с веществом».

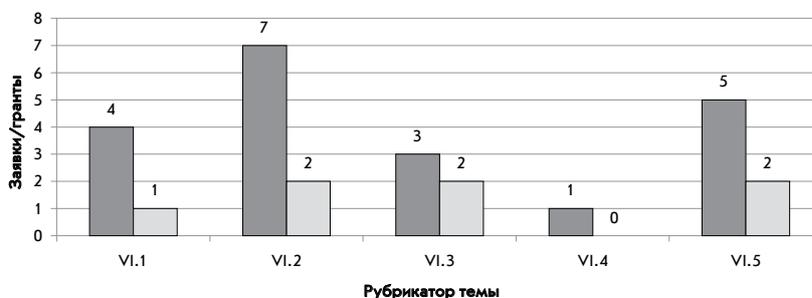


Рис. 8. Распределение заявок и грантов по рубриктору темы «Сверхтяжелые элементы: синтез, свойства и астрофизические аспекты».

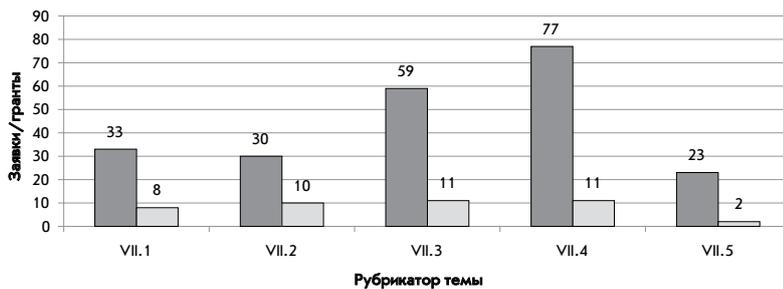


Рис. 9. Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Наноразмерные молекулярные и супрамолекулярные системы».

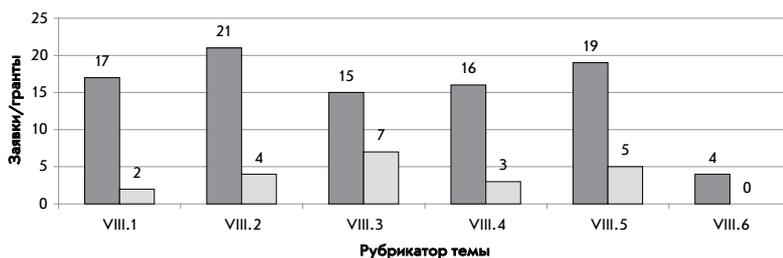


Рис. 10. Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Фундаментальные основы экологически чистой химии».

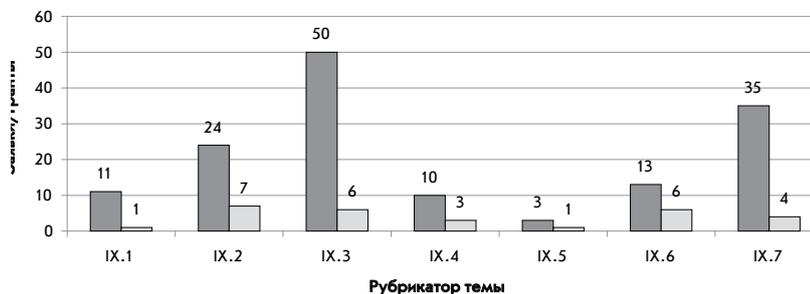


Рис. 11. Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Фундаментальные основы создания новых лекарственных препаратов и вакцин».

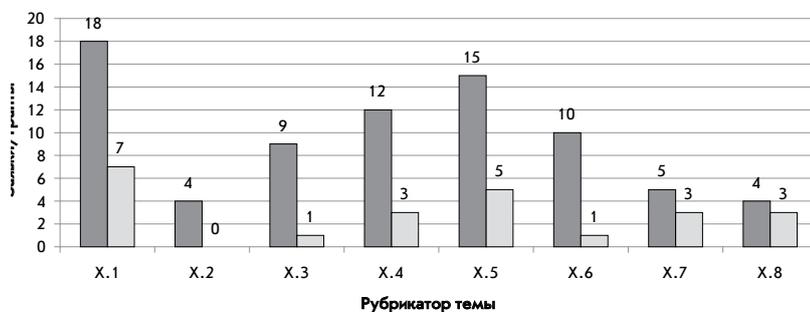
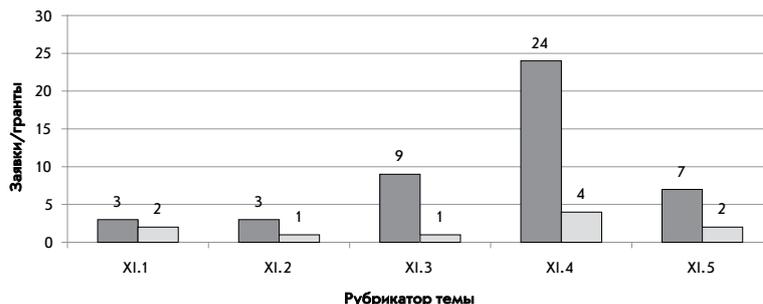
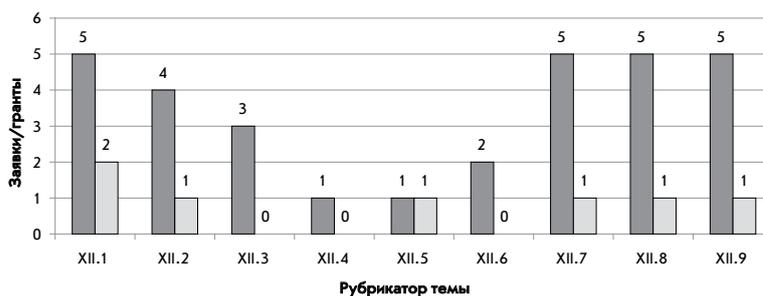


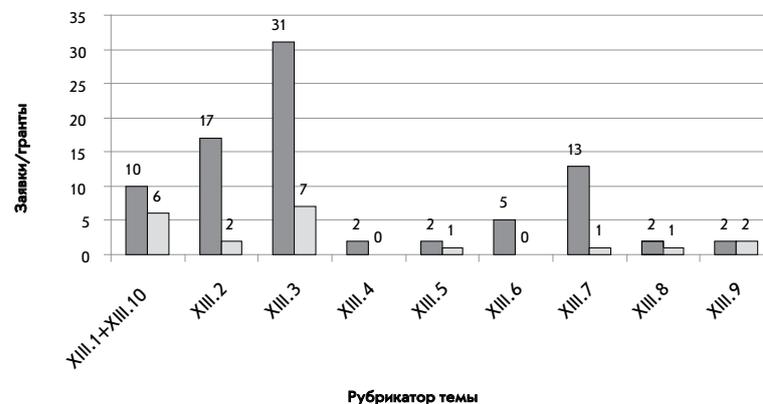
Рис. 12. Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Фундаментальные аспекты геномики и протеомики эукариот».



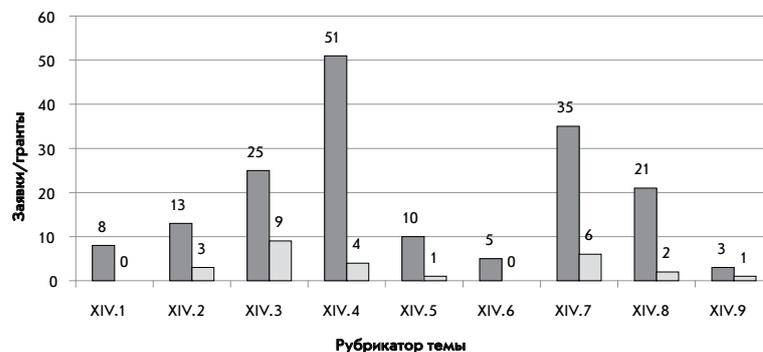
**Рис. 13.** Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Фундаментальные основы формирования ресурсной базы стратегического сырья (Au,Ag,Pt,Cu, редкие элементы и металлы)».



**Рис. 14.** Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Искусственное электромагнитное воздействие на природную геологическую среду».



**Рис. 15.** Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Когнитивные исследования».



**Рис. 16.** Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Развитие фундаментальных основ алгоритмического обеспечения и вычислительных методов для информационных систем нового поколения».

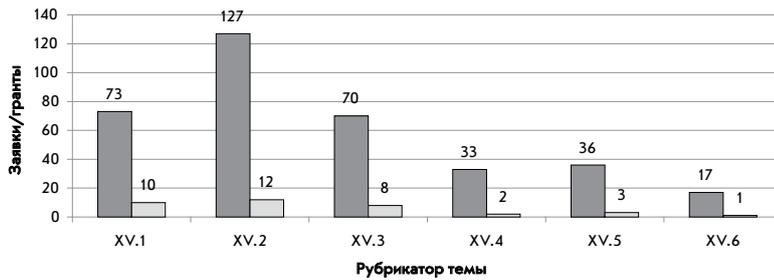


Рис. 17. Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Разработка и создание наноразмерных и наноструктурных материалов и покрытий на металлической, керамической и полимерной основе».

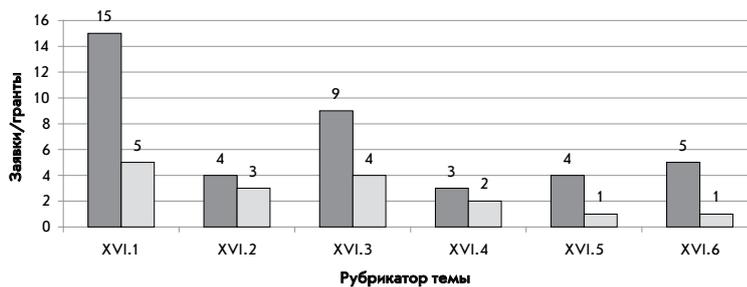


Рис. 18. Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Фундаментальные проблемы создания полупроводниковых наноструктур для электроники и возобновляемых источников энергии».

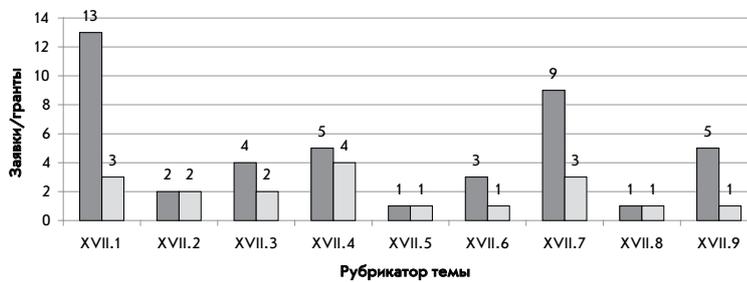


Рис. 19. Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Фундаментальные исследования проблем твердотельной волновой электроники».

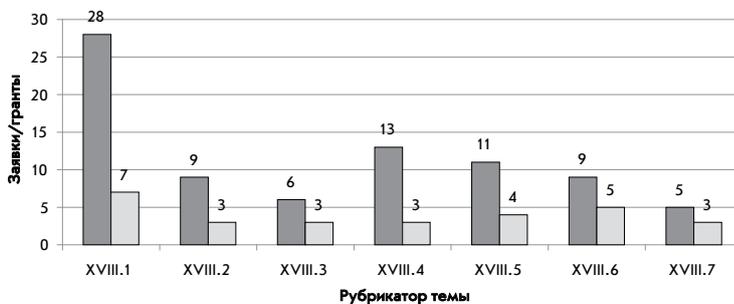


Рис. 20. Распределение заявок и грантов по рубрикатору темы «Фундаментальные проблемы теоретической математики».

Как видно из диаграмм, практически для всех тем характерно неравномерное распределение заявок/грантов по рубрикам тем, причем для целого ряда тем характерно наличие рубрикаторов, в рамках которых не поддержана ни одна заявка (темы I, VI, VIII, X, XIV — по 1 рубрику, тема XIII — 2, темы V, XII — по три рубрика). В этой связи становится очевидной необходимость выработки определения понятия «междисциплинарная тема» и разработки критериев отбора тем и их рубрикаторов для конкурсов междисциплинарных исследований по приоритетным темам.

Анализируя результаты первого конкурса по конкурсу «офи\_м», можно предложить для рассмотрения следующее определение этого ключевого понятия:

*«Междисциплинарная тема» (или т.п. понятия) — это направление фундаментальных исследований, выполнение которых в течение двух–трех лет должно завершиться либо достижением значимого научного результата в области фундаментальных знаний об окружающем мире, сопоставимого с прорывным и оказывающим влияние на развитие научных исследований в данной области знаний; либо значимого научного результата, имеющего инновационный потенциал и являющегося основой для создания принципиально новой (возможно, прорывной) технологии, нового материала и т.п.; предполагает привлечение научных коллективов с различным спектром научных интересов, объединение которых позволит получить ожидаемый результат.*

Если принимается данное положение, то в этом случае рубрикатор темы должен отражать ключевые задачи, решение которых обеспечит достижение конечного результата.

Отбор тем для конкурсной поддержки возможен на основе анализа результатов фундаментальных исследований, проведенных при финансовой поддержке РФФИ в годы, предшествующие объявлению настоящего конкурса. Такой анализ должен выполняться экспертными советами РФФИ по областям знаний 01–08 в ходе рассмотрения отчетов по проектам фундаментальных исследований, получившим поддержку РФФИ в предшествующие годы. Актуальность выдвигаемых для дополнительной финансовой поддержки наиболее перспективных направлений исследований оценивается с учетом степени междисциплинарности их решения. При отборе тем для конкурса «офи\_м» особое внимание уделяется анализу состояния

исследований по теме, наличию публикаций в рецензируемых журналах, соответствующих задачам и целям выбранной темы, вероятности и времени успешного завершения исследований, ожидаемому воздействию результата выполнения работ по теме на дальнейшее развитие исследований и разработок в данной области.

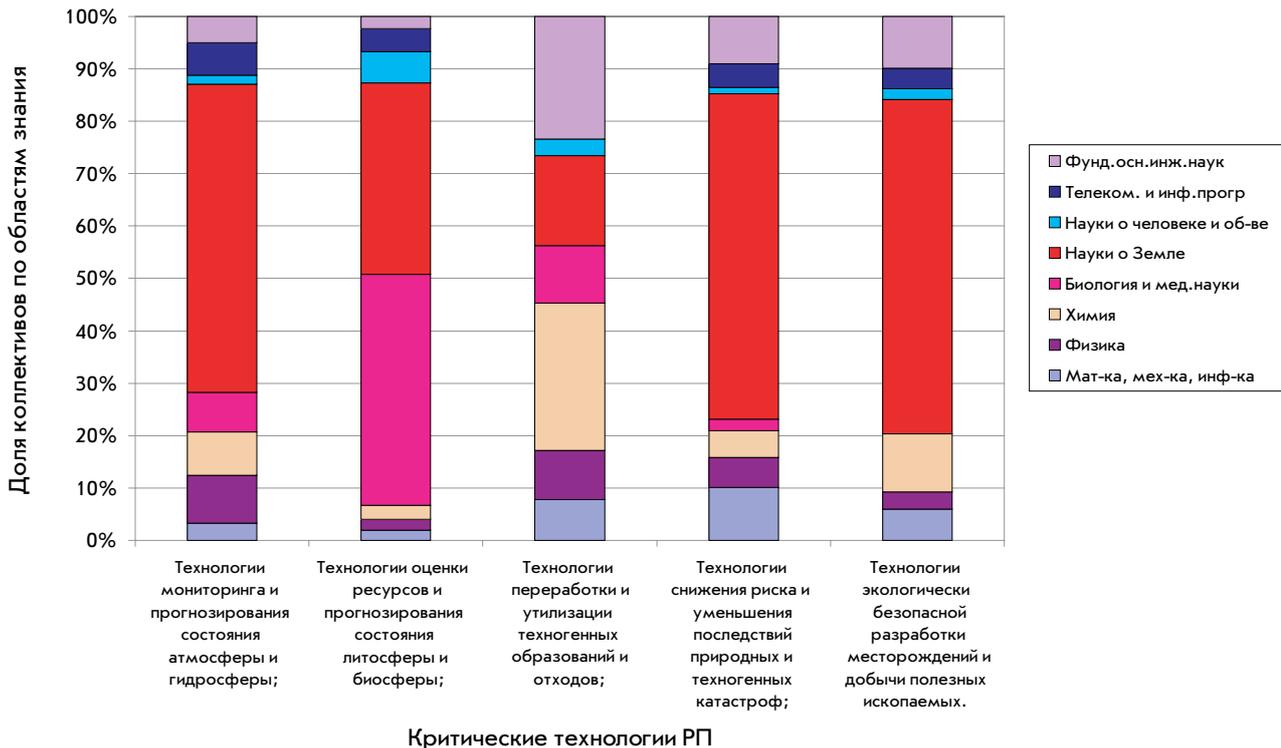
Описание темы имеет следующую структуру:

- Наименование темы;
- Аннотация;
- Рубрикатор темы;
- Анализ предпосылок и полученных ранее результатов;
- Актуальные проблемы, конкретные задачи, решаемые в рамках проекта;
- Организации-лидеры, в которых получены базовые результаты;
- Ожидаемые основные участники и ученые-лидеры в данной области;
- Ожидаемое время достижения намеченных результатов;
- Оценка интереса научного сообщества в РФ и за рубежом к задачам и целям, сформулированным в рамках темы;
- Вероятность успешного завершения темы (получения прорывного результата);
- Возможный научный координатор исследований по теме.

По-видимому, рубрикатор темы должен представлять собой комплекс конкретных научных задач, без решения которых не может быть достигнут итоговый результат по теме. Наиболее показательным примером, подтверждающим успешность данного подхода, является тема VI «Сверхтяжелые элементы: синтез, свойства и астрофизические аспекты». Поддержанные ранее инициативные проекты послужили основой для достижения значимого результата в рамках конкурса «офи\_м» по теме.

При таком подходе междисциплинарные исследования по приоритетным темам представляют собой стадию исследовательского процесса, концентрирующую интеллектуальные, материальные и финансовые ресурсы исследовательских коллективов для достижения прорывного научного результата с возможным инновационным потенциалом (темы VII, VIII, IX, X, XV, XVI, XVII).

Предпосылками для успешной реализации данного подхода могут быть результаты анализа БД РФФИ (заявочные и отчетные формы поддержанных проектов конкурсов «а», «офи» и «офи\_ц»).



**Рис. 21.** Междисциплинарные исследования в рамках критических технологий по приоритетному направлению «Рациональное природопользование». Распределение научных коллективов по критическим технологиям приоритетного направления «Рациональное природопользование».

Как отмечалось выше, для формулировки тем по данному направлению конкурса желательно проанализировать форму 511 из отчетных форм по проектам. Примеры такого анализа уже имеются в распоряжении управления ориентированных фундаментальных исследований. В частности, сотрудниками управления были проанализированы проекты, указавшие в отчетных формах на соответствие своих результатов приоритетному направлению «Рациональное природопользование» и критическим технологиям в рамках данного направления.

Как видно из приведенной диаграммы, наиболее ярко междисциплинарный характер исследований проявляется в рамках критической технологии переработки и утилизации технических образований и отходов. Т.е. в рамках данной критической технологии возможно

сформулировать междисциплинарную тему, достижение результатов по которой потребует вовлечения различных коллективов. Во всех остальных случаях доминирующими являются коллективы, работающие в области наук о Земле. Данная диаграмма не является руководством для принятия решений, но наглядно демонстрирует необходимость проведения предварительных аналитических исследований для определения тем тематических междисциплинарных исследований. Аналогичные исследования могут быть выполнены с участием экспертов РФФИ по всем основным приоритетным направлениям.

Важным моментом при таком подходе в организации конкурса «офи\_м» является изменение функций экспертного совета по теме и соответственно координатора темы.

### ПРАКТИКА ШИРОКОГО ФОРМАТА (интервью с П.П. Пашиным в газете «Поиск»)

*По материалам Ежедневной газеты научного сообщества «Поиск»*

*Давным-давно российское научное сообщество определилось в своем отношении к грантовой системе вообще и РФФИ как ее основному элементу в частности. Едва ли не единогласно ученые голосуют «за». Однако при детальном рассмотрении этот почти тотальный позитив оказывается отнюдь не безоговорочным. Напротив, оговорок-то как раз можно услышать великое множество. Исключив из него традиционные жалобы на злых экспертов и мелкогрантье, нетрудно вычленил главный «аллерген» под ставшим кодовым названием «офи». С этой режущей русское ухо аббревиатурой зачастую связывают многие пороки нашей околонуучной бюрократии: келейность, кумовство и далее по списку.*

*Насколько обоснованы бытующие подозрения? Кому и зачем на самом деле нужны пресловутые конкурсы? За разъяснениями наш корреспондент отправился к председателю Экспертного совета РФФИ по ориентированным фундаментальным исследованиям члену-корреспонденту РАН Павлу ПАШИНУ.*

**— Павел Павлович, заранее прошу простить меня, если какие-то вопросы покажутся вам не очень вежливыми...**

— Спрашивайте, не стесняйтесь.

**— Тогда начнем с личного. Скажите честно, почему вы согласились возглавить совет по «офи»? Должность-то, как говорится, «расстрельная»?**

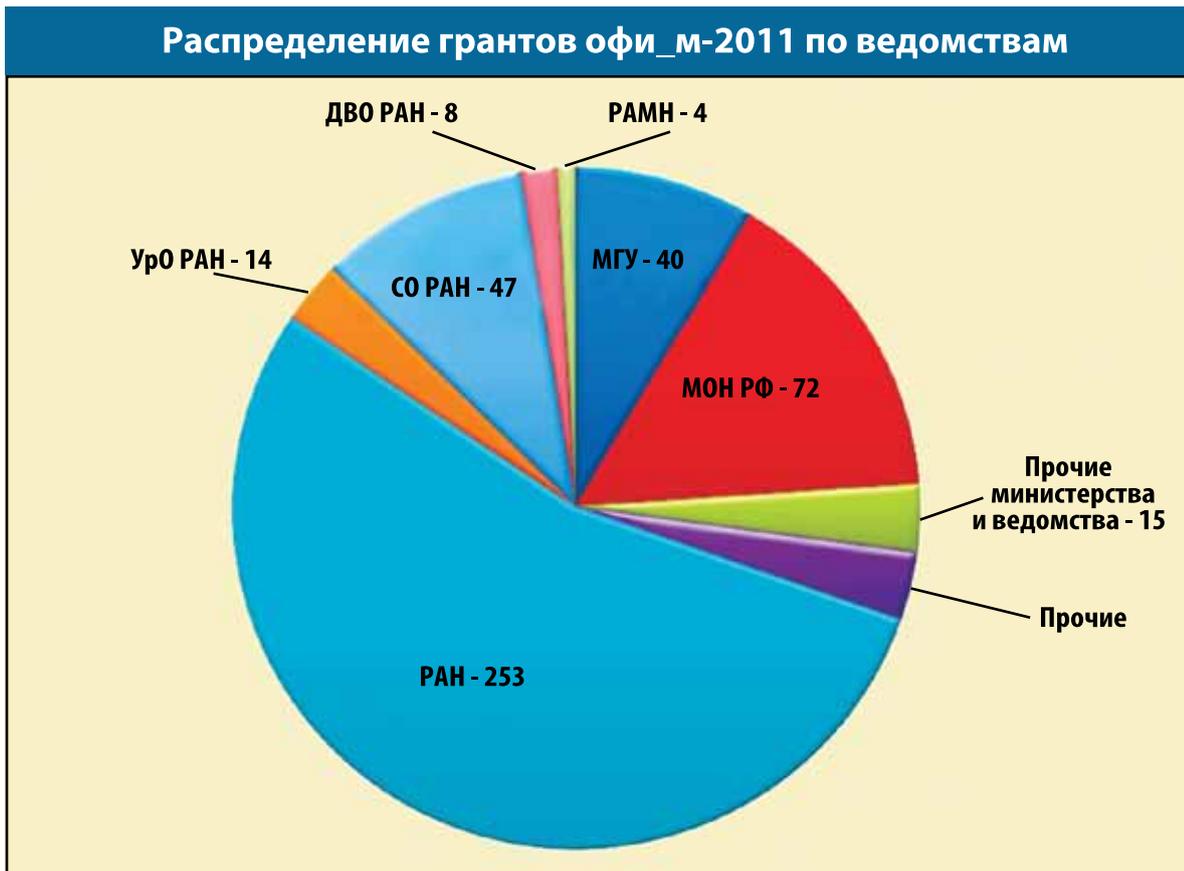
— В смысле критики?

— **Именно.**

— Видите ли, в моем возрасте (Павел Пашин родился в 1935 г. — прим. ред.) глупо опасаться, что кто-то может о тебе нехорошо подумать или отозваться. Что же касается конкурсов «офи», то среди выдвигаемых к ним претензий есть и вполне справедливые, но по большей части это мифы и домыслы. Говорю ответственно, зная всю здешнюю кухню «от и до».

С РФФИ моя жизнь напрямую связана с 1993 г. В то время фонд возглавлял академик Владимир Евгеньевич Фортов, с которым мы выполнили несколько совместных работ. Он и попросил меня войти в состав Экспертного совета по физике в качестве заместителя председателя. Это была неоплачиваемая «общественная нагрузка», как и моя нынешняя должность в фонде. А спустя несколько лет поступило новое предложение: стать зампредом Совета РФФИ. Вот тогда действительно пришлось помучиться, посомневаться. На тот момент я руководил большим, активно работающим отделом в Институте общей физики РАН. У нас была прекрасная, сплоченная команда, масса интереснейших проектов.





И все это предстояло поменять на чуждую мне чиновничью службу. Совместительство не допускалось, хотя платили в фонде сущие копейки.

— *Как же вас уговорили?*

— А никто особо и не уговаривал. Это было мое собственное, абсолютно сознательное решение. Если хотите, моя персональная жертва.

— *Ради чего?*

— Это может прозвучать излишне пафосно, но все-таки скажу: ради возможности сделать что-то полезное не для себя или коллег по институту, а для всех наших ученых, для науки. Не мне судить, насколько это удалось, но весь положенный срок я добросовестно отработал, а потом с удовольствием вернулся в родной ИОФАН, к своей любимой лазерной физике. Но и отношения с фондом продолжал поддерживать. Помогал на первых порах своему преемнику, участвовал в экспертизе. Председателем Экспертного совета по «офи» тоже стал по доброй воле, поскольку был уверен, что такие конкурсы РФФИ необходимы.

— *Какие «такие»? Насколько я помню, они неоднократно видоизменялись, верно?*

— Верно. Это целая история, причем довольно поучительная. Еще лет 15 назад и в фонде,

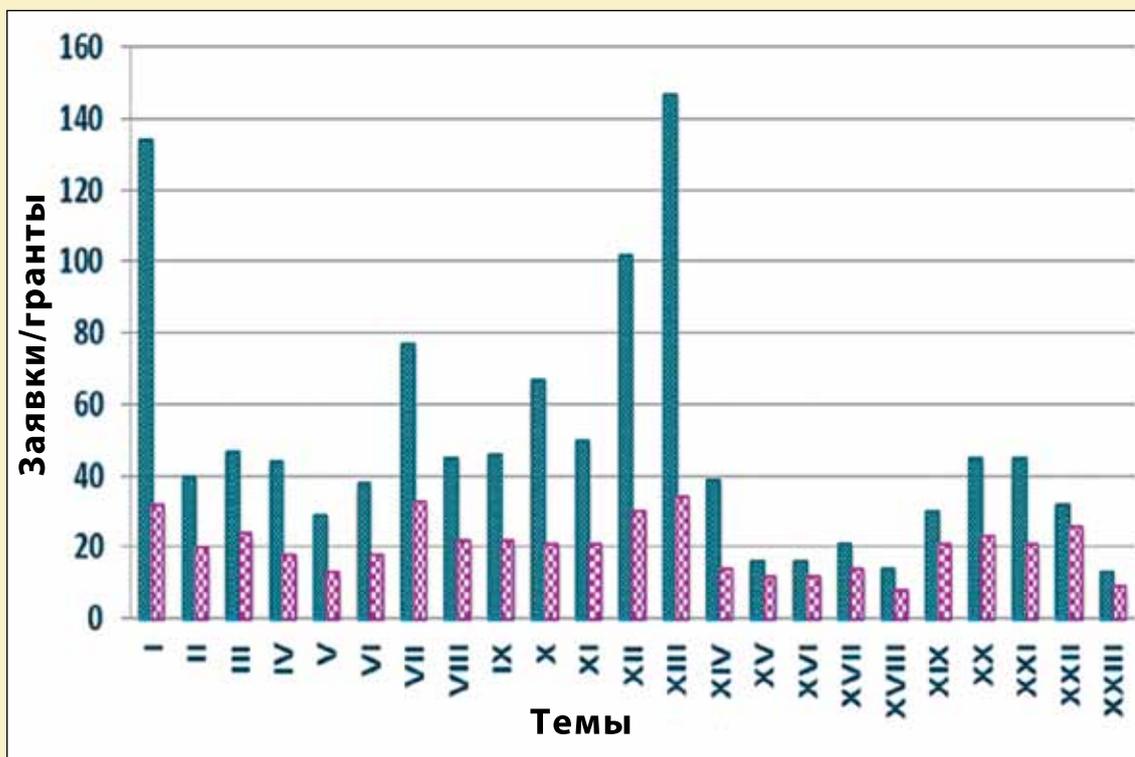
и за его пределами то и дело заходил разговор о том, что кроме обычных грантов «на поддержание штанов», должны быть и другие, значительно крупнее. Серьезные научные работы заслуживают столь же серьезной, а не символической поддержки. Это все понимали. Но осознавали и то, что при имеющемся финансировании фонда больших грантов не может быть много. Единицы, десятки, в лучшем случае — сотни. Ключевым был вопрос, как выделить из общей массы проектов самые достойные, самые важные и перспективные?

Ответ, казалось, лежал на поверхности. У нас же есть экспертные советы по областям знаний, там авторитетные ученые, им и карты в руки. Пусть посоветуются между собой и решат, какие исследования в соответствующей области заслуживают особого внимания и особых денег. Логично, не так ли?

Однако же экспертные советы эту очевидную идею дружно отвергли. Аргументы приводились однотипные: мы плохих проектов не поддерживаем, а все хорошие настолько хороши, что выбрать лучшие не представляется возможным. Точка.

— *И в чем, по-вашему, тут дело? Правда так трудно выбрать?*

## Распределение заявок/грантов по темам офи\_м-2011



1. Фундаментальная математика в естественных науках, технике и информационных технологиях
2. Новые частицы и редкие процессы во Вселенной
3. Низкотемпературные наноструктуры и приборы на их основе
4. Фундаментальные основы создания в терагерцовом диапазоне новых технологических и диагностических систем
5. Физические основы получения и применения сверхсильных электромагнитных полей
6. Композитные мультиферроидные материалы как платформа для создания нового поколения устройств обработки информации
7. Фундаментальные проблемы физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур
8. Многофункциональные интеллектуальные наноматериалы с кластерным упорядочением
9. Новые гибридные материалы на основе суперинженерных пластиков для высоких технологий и охраны окружающей среды
10. Фундаментальные основы новых сверхкритических флюидных технологий
11. Фундаментальные основы создания новых оксидных конструкционных и функциональных керамических материалов для техники, электроники и оптики
12. Ориентированные фундаментальные исследования в области металлургии и машиностроения
13. Фундаментальные основы биофармацевтики и регенеративной биомедицины как платформа медицины XXI века

14. Междисциплинарные фундаментальные исследования в области клинической эпигеномики, транскриптомики и протеомики
15. Исследование нейрофизиологических механизмов восстановления двигательных функций при нейротравме и сосудистых заболеваниях мозга с использованием мультимодальной стимуляции, виртуального моделирования, роботизированных систем двигательного обучения и интерфейса мозг-компьютер (ИМК)
16. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина "метановой катастрофы" ("Метановая катастрофа")
17. Источники и механизмы концентрирования стратегических металлов в природных и искусственных средах (к проблеме формирования ресурсной базы стратегического сырья России)
18. Электромагнитное воздействие на литосферу океанов и континентов
19. Фундаментальные проблемы создания распределенной инфраструктуры коллективного использования данных космического дистанционного зондирования Земли
20. Фундаментальные основы конвергентных технологий
21. Фундаментальные проблемы разработки и использования супер-ЭВМ для детального предсказательного моделирования многомасштабных процессов в природных и техногенных системах
22. Мегаструктура Евразийского мира: основные этапы формирования
23. Сверхтяжелые элементы Периодической таблицы Д.И. Менделеева. Синтез, ядерно-физические и химические свойства. Поиск в природе

— Это непросто, но, конечно, возможно. Проблема в том, что в таких случаях кто-то должен брать на себя ответственность, быть готовым к столкновениям, конфликтам. А кому это нужно?

В общем, раз за разом идею повышенных грантов тихо хоронили. Пока не возникло новое мощное веяние. Высшее начальство стало все настойчивее требовать от ученых и от фонда коммерциализации научных результатов.

Ситуация сложилась, мягко говоря, неоднозначная. С одной стороны, РФФИ по уставу должен поддерживать исключительно фундаментальные, то есть далекие от потребностей рынка исследования. С другой, — фонд как государственная организация обязан прислушиваться к мнению руководителей страны. Конкурсы «офи» в их первоначальном виде стали, в сущности, тем компромиссом, который всех

более или менее устраивал. По замыслу, гранты предназначались для поисковых исследований с какой-то коммерческой перспективой.

Между тем, заинтересованность в сотрудничестве с фондом начали активно проявлять различные государственные ведомства, в первую очередь те, которые принято считать «научными». На них, очевидно, тоже давили сверху, подталкивая к модернизации. В итоге на свет появились две разновидности конкурсов «офи». Одна была инициативой собственно фонда, а другая — совместным детищем РФФИ и нескольких ведомств. Последние, кстати, оказались довольно скверными «родителями». Когда пришла пора платить по грантам, вдруг выяснилось, что делать это ведомствам запрещено. И хотя изначально целевые проекты предполагалось финансировать на паритетной основе, фактически основные расходы нес РФФИ.

На этом фоне предсказуемо возникла очередная волна споров о том, нужны ли ученым подобные «особенные» конкурсы, а если нужны, то в каком виде? Многие коллеги, и я в том числе, наиболее интересным сочли предложение расширить формат ориентированных проектов, сделав ставку на междисциплинарность. К нашей радости, эту позицию поддержал и академик Владислав Яковлевич Панченко, назначенный председателем Совета РФФИ. Так родилась новейшая версия конкурсов — «офи\_м».

— *Еще раз прошу извинить меня, Павел Павлович, но нынешнюю моду на междисциплинарность и конвергентность далеко не все приветствуют. Некоторые видят в ней лишь способ выживания дополнительных средств из госкармана.*

— Я с такой точкой зрения знаком, но абсолютно не согласен. Возьмем те же лазеры, в которых я как-никак немножко разбираюсь. Уверяю вас: эта тематика по сути своей междисциплинарна. То же самое вам скажет любой специалист. Здесь изначально и неразрывно переплетены самые разные направления физики, химии, сразу нескольких технических наук.

— *Ну, лазеры — это особая статья.*

— Могу привести еще сколько угодно примеров.

— *Минуту. Хотелось бы закончить с лазерами. Их история насчитывает больше 50 лет. Почему же о междисциплинарности так громко заговорили только в последние годы?*

— Потому что за полвека много чего произошло и много чего изменилось. Могу судить по

собственному опыту, поскольку всю лазерную эпопею видел своими глазами и щупал своими руками. Еще студентом-дипломником я пришел в Физический институт АН СССР к Александру Михайловичу Прохорову. Это было в 1955-м, за несколько лет до официального рождения лазера. С тех пор по мере сил и способностей работаю в этой области. Так вот, для меня совершенно очевидно, что путь пройден гигантский. Современные машины на много порядков сложнее своих прародителей, а их возможности просто несравнимы. Сегодня лазеры используют и для термоядерного синтеза, и для получения сверхплотной плазмы, и для ускорения элементарных частиц... Все это важнейшие, но разноплановые научные задачи, и специалисты для их решения нужны разные.

Поймите: наука — не только лазерная — развивается в соответствии со своими внутренними, вполне четкими закономерностями. На каждом следующем этапе необходимы соответствующие ему новые подходы к организации и финансированию исследований. Сейчас мы все находимся на стадии нарастающей конвергентности, стремительного сближения и взаимопроникновения различных наук и технологий. Это, как теперь выражаются, мировой тренд, реальное требование времени.

— *Ладно, будем считать, что насчет междисциплинарности вы меня убедили. Теперь давайте разбираться с ориентированностью. Много нареканий вызывает избранный фондом способ формирования тематического перечня для конкурсов «офи\_м». Предлагать темы могут только члены Совета РФФИ?*

— Не совсем так. Когда мы приступали к организации первого конкурса «офи\_м» 2009 г., к участию в определении тематики были приглашены многие ведущие ученые, в том числе и не входящие в Совет. Но анализ поступивших предложений показал, что сам смысл, содержание этой затеи не всеми были до конца поняты. Палитра выглядела слишком пестрой. Утвердить окончательный список из 18 тем удалось лишь после жарких многочасовых дискуссий.

В следующем конкурсном цикле, начавшемся в прошлом году, картина была уже другой, куда менее эклектичной. Из полусотни «наброшенных» на старте тем мы смогли без особых сложностей скомпоновать 23 достаточно крупных тематических блока.

Никто не скрывает, что последнее решающее слово остается за членами Совета РФФИ. По-

моему, это нормально и правильно. Совет как раз и нужен для того, чтобы направлять и корректировать политику фонда в соответствии с поставленными целями.

— *Но элемент субъективизма все-таки присутствует?*

— Если я скажу «нет», вы ведь все равно не поверите? Совет РФФИ, как и любой подобный орган, состоит из живых людей, каждый из которых не лишен своих амбиций, интересов, симпатий и антипатий. В известной мере страховкой от субъективизма служит коллегиальность. Но считать это полной и абсолютной гарантией, разумеется, нельзя.

— *То есть, вы не отрицаете, что темы формулируются под заранее известных исполнителей, располагающих достаточным административным ресурсом?*

— Отрицаю категорически. Те или иные предпочтения членов Совета РФФИ могут отражаться на тематике, но ни в коем случае не влияют на оценки экспертов. А те выбираются из общей базы фонда без всякого участия «заинтересованных лиц и организаций».

Кроме того, формулировки, а значит, и рамки почти всех тем настолько широки, что охватывают огромное число потенциальных исполнителей и практически не ограничивают творческую инициативу ученых. Предсказать, какие именно проекты выигрывают гранты, нереально.

— *А вы не допускаете, что Совет РФФИ, пусть и без всякого умысла, может напортачить, промахнуться при выборе ориентиров?*

— Безусловно, допускаю. Ровно по названной вами причине гранты по конкурсам «офи\_м» присуждаются на два года, а не на три, как обычно бывает в РФФИ. Это тоже своего рода страховка. Если по отчетам становится заметно, что тема «не идет», можно достаточно оперативно внести коррективы в перечень.

При сравнении двух проведенных в нынешнем формате конкурсов видно, как изменилась их тематика. Благополучно «перекочевали», хотя и с серьезными обновлениями, семь тематических кластеров, сохранивших научную актуальность. Это, к примеру, предсказательное моделирование на суперкомпьютерах, поиск и синтез сверхтяжелых элементов, создание низкотемпературных наноструктур. Потенциал же новых тем оценивать пока еще рановато. Впрочем, у меня нет сомнений в перспективности, скажем, анализа данных дистанционного зон-

дирования Земли или возможных причин «метановой катастрофы».

— *Продолжая сравнения двух конкурсов, не могу не спросить о цифрах. Число заявок сократилось с 1752 до 1137, а количество грантов, наоборот, выросло с 367 до 468. Как вы это объясните?*

— Конкурс трехлетней давности был пилотным и во многом экспериментальным. Оценка проектов проявила ту же проблему, с которой мы столкнулись при формировании тематики: многие заявки не соответствовали идеологии конкурса.

В нынешнем цикле такого почти не было. И научный уровень работ стал заметно выше. Из-за этого сильно усложнилась задача нашего экспертного совета. Пришлось отсеять множество достойных предложений. Хорошо еще, что в этот раз была возможность увеличить на целую сотню число поддержанных проектов.

— *Председатели разных экспертных советов РФФИ в интервью «Поиску» жаловались на так называемый «коэффициент прохождения», который ограничивает долю проектов-победителей от количества заявок. По общему мнению, действующая сейчас норма в 30 % слишком мала. Вы согласны?*

— Полностью. К счастью, на конкурсы «офи» это правило не распространяется. Число грантов лимитируется объемом выделенных средств. Но если все же вычислить коэффициент прохождения, то получится, что у нас он превышает 40 %. Это значительно больше, чем обычно, но все равно недостаточно.

— *Интересно, откуда взялась «лишняя» сотня грантов? Денег прибавилось? Или размеры грантов сократились?*

— И общий бюджет ориентированных исследований, и средний размер гранта (1,6 млн руб.) остались прежними. А число поддержанных проектов возросло благодаря тому, что сейчас у РФФИ уже нет обязательств по «старым» грантам «офи», которые были раньше.

— *Теперь понятно. Но мы упустили из виду совместный конкурс РФФИ и ОАО «Российские железные дороги». Там гранты еще больше?*

— Да, средний — 2 млн руб. Но в данном случае финансирование действительно осуществляется на паритетной основе. И в целом взаимодействием с РЖД мы вполне довольны. Наконец у фонда появился очень «правильный» партнер, умеющий поставить перед учеными четкие задачи, искренне заинтересованный в максимальном результате.

Развитие высокоскоростного транспорта, растущие нагрузки на инфраструктуру порождают новые проблемы в организации движения, обеспечении безопасности. Замечательно, что в РЖД стараются вовремя их выявлять и стремятся решать с помощью науки. Радует и отклик со стороны ученых. На наш совместный конкурс при всей его заведомой «компактности» поступило 167 весьма качественных проектов, 38 из которых получили поддержку.

Словом, попытку «реинкарнации» достойных «офи-ц» можно признать успешной. Планируем проводить подобные конкурсы и в будущем.

— *Слишком уж благостным выходит наш с вами разговор, Павел Павлович. И тут все хорошо, и там неплохо... А проблемы? А трудности?*

— Ну что ж, давайте о проблемах. Основная из них уже вскользь упоминалась: хорошие, даже прекрасные работы зачастую остаются без поддержки. Двадцатилетний опыт РФФИ свидетельствует, что достаточно высокие оценки экспертов неизменно получают около 80 % поданных проектов. А финансируется в итоге меньше трети. Таким образом, половина конкурсантов оказывается незаслуженно обиженной. Какой реакции можно от них ожидать? Только негативной.

Как известно, сейчас любой заявитель вправе ознакомиться с экспертными заключениями по своему проекту. Человек видит, что коллеги рекомендовали его работу к финансированию, тем не менее гранта ему не достается. Вот и начинаются претензии — к экспертному совету, к руководителям фонда, к конкурсам «офи», якобы съедающим львиную долю всех денег.

— *Но ведь какую-то долю они действительно «съедают». Любопытно, какую?*

— Менее 15 % общего бюджета фонда. Если быть точным — 13,3 % по плану на текущий год.

— *По вашим словам получается, что корень проблемы — в излишней мягкости экспертов, ставящих высокие оценки. Так?*

— Ничего подобного! Наоборот, эксперты нередко занижают баллы, причем по разным соображениям. Причина может скрываться в личных отношениях, а может быть и в том, что эксперту не близка или просто безразлична заявленная тема. Это тоже наша «головная боль», и особенную остроту она приобретает, когда дело касается конкурсов «офи».

Широкий формат междисциплинарных исследований требует той же «широкоформатности» от ученых, оценивающих проекты. Ясно, что крайне важен научный кругозор, но кроме этого нужны умение «забывать» о собственных пристрастиях и устремлениях, подлинный интерес к тому, чем занимаются товарищи по цеху. Плюс способность чистосердечно радоваться чужим талантам и успехам. Увы, слишком многим из нас этих качеств явно не хватает.

Но корень проблемы, конечно, не в мягкости или жесткости экспертов. Он, как ни парадоксально, в том, что у нас до сих пор каким-то чудом сохранилась приличная, серьезная наука. Как минимум четыре из пяти заявок на гранты РФФИ достойны поддержки. И государство обязано ее обеспечить, резко увеличив финансирование научных фондов.

— *На сколько?*

— Хотя бы в три раза.

— *По моему, это фантастика.*

— Нет. Страна у нас достаточно богатая, чтобы осилить такие расходы. Нужна лишь политическая воля и понимание того, что только так это богатство можно сберечь и приумножить.

*Беседу вел Дмитрий МЫСЯКОВ*

АННОТАЦИЯ

Данный выпуск журнала «Вестник РФФИ» посвящен результатам первого конкурса междисциплинарных ориентированных исследований («офи\_м») 2009–2010 гг. Все статьи разбиты на две группы работ. В первую вошли аннотированные обзоры по отдельным направлениям исследований. К сожалению, невозможно охватить все 18 тем, по которым был проведен конкурс «офи\_м». Однако в обзорах представлены почти все направления наук. Здесь показаны как важные фундаментальные исследования, так и проблемы, имеющие прикладное значение. Основой обзоров послужили отчеты и итоговые конференции, проведенные экспертными советами по отдельным темам. Вторая часть выпуска составлена из отдельных статей руководителей конкретных проектов «офи\_м», которые также охватывают различные области знаний и представляют несомненный интерес.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК | ОБЗОРЫ

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНАЯ ТЕМА:  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИКИ

Обзор подготовил Бухштабер Виктор Матвеевич

Экспертный Совет по теме рекомендовал к публикации следующие справки о результатах.

**«Исследование вопросов сложности вычислений и доказательств в математической логике, алгебре и информатике»**

*Руководитель: академик С. И. Адян, МИРАН*

Важным разделом дискретной математики является так называемая экстремальная комбинаторика. Значительная ее часть посвящена изучению вопроса о том, чему при определенных ограничениях может быть равна плотность вхождений комбинаторных объектов данного вида (таких как графы, ориентированные графы или гиперграфы) в неизвестные объекты того же типа, но большего размера.

В цикле работ А. А. Разборова строится общая теория, в которой рассматриваются задачи такого рода. Этот подход основан на введении специальных коммутативных алгебр («алгебр флагов») и изучении их свойств алгебраическими, аналитическими и вычислительными методами. Теория алгебр флагов позволяет

унифицировать многие ранее известные доказательства и связать их со структурами, возникающими в других областях математики.

С помощью этого подхода А. А. Разборовым были решены две конкретные задачи. Первая задача относится к вычислению минимально возможной плотности числа треугольников в графе с известной плотностью ребер. Рассматриваются простые графы без петель и кратных ребер. Плотностью ребер графа называется отношение числа его ребер к максимально возможному числу  $n(n - 1)/2$ , где  $n$  – число вершин графа. Задача заключалась в определении минимально возможного числа треугольников для графов с заданной плотностью ребер.

Эта элементарная по постановке проблема оказалась неожиданно трудной. Частичные результаты были получены еще в 1959 г., а общая задача оставалась открытой полвека. А. А. Разборов получил точную формулу для минимальной возможной плотности треугольников в графе с заданной плотностью ребер. Тем самым им была поставлена окончательная точка в решении этой проблемы.

Пожалуй, одной из самых известных и до сих пор не решенных проблем в комбинаторике является так называемая проблема Турана для гиперграфов, поставленная еще в 1941 г. А. А. Разборову удалось получить первое существенное продвижение в решении этой задачи для 3-графов.

3-графом называется конечное множество вершин  $V$  с заданной на нем некоторой совокупностью 3-ребер, то есть трехэлементных подмножеств  $V$ . Требовалось узнать, насколько малой может быть плотность 3-ребер в 3-графах, не содержащих независимых множеств на 4 вершинах. Сам Туран предположил ответ —  $(4/9)$  и построил пример 3-графа с такой плотностью 3-ребер. Этот ответ А. А. Разборовым был подтвержден при дополнительном ограничении, что никакие 4 вершины не могут содержать ровно три 3-ребра.

Результаты А. А. Разборова с полным основанием могут быть названы *прорывными*. Они были отмечены в отчете РАН за 2009 г. как *лучшие в масштабе Академии Наук*.

В настоящее время в связи с развитием систем символического вычисления в теоретической информатике усилился интерес к исследованию так называемых систем подстановок термов. Важнейшим частным случаем таких систем являются системы подстановок слов в заданном алфавите. В рамках данного проекта исследовалась одна частная система такого рода, которая привлекла внимание простотой своей формулировки и в то же самое время достаточно сложным поведением.

Рассмотрим систему подстановок слов в алфавите  $\{a, b, c\}$ , задаваемую тремя правилами:  $aa \rightarrow bc$ ,  $bb \rightarrow ac$ ,  $cc \rightarrow ab$ . Эта система была предложена несколько лет назад Г. Зантемой как пример простой по формулировке однородной системы, для которой не удавалось доказать свойство терминируемости, то есть свойство обрыва любых цепей подстановок указанного типа. Впоследствии для этой системы Д. Хофбауэр и Й. Вальдманн доказали свойство терминируемости с использованием компьютера. Однако их метод давал лишь экспоненциальную оценку максимальной длины цепочки подстановок в зависимости от длины исходного слова. Они поставили вопрос о существовании полиномиальной оценки сложности выводов в этой системе.

Эта задача была полностью решена С. И. Адяном, который не только доказал квад-

ратичную оценку сложности выводов в этой системе, но и получил точную формулу, выражающую максимальную длину цепочки подстановок в зависимости от длины исходного слова.

Отметим, что получение столь точного и исчерпывающего результата в этой задаче стало возможным благодаря применению методов, развитых в школе П. С. Новикова и С. И. Адяна начиная с 50-х годов для исследования алгоритмических проблем для полугрупп и групп, заданных образующими и определяющими соотношениями. В данном случае удалось применить эти методы для решения конкретной задачи, возникшей в информатике.

Л. Д. Беклемишевым были получены неожиданные результаты, касающиеся топологической семантики полимодальной логики доказуемости. Полимодальная логика доказуемости GLP, введенная еще в 1980-х гг., в последние годы нашла интересные применения для анализа формальных арифметических теорий. В связи с этим усилился интерес к вопросам семантики этой логики.

Давно было известно, что уже фрагмент этой логики для языка с двумя модальностями не является полным по Крипке. В связи с этим предпринимались попытки найти для GLP другую семантику. Л. Д. Беклемишевым были предложены естественные топологические модели для этой логики, обобщающие модели Крипке. Им была установлена полнота для фрагмента этой логики с двумя модальностями.

Тем самым был положительно решен старый вопрос из области модальной логики о существовании конечно аксиоматизируемой логики, полной в смысле топологической семантики, но не полной по Крипке.

Л. Д. Беклемишев также исследовал вопрос о полноте фрагмента логики GLP с двумя модальностями относительно наиболее естественного класса топологических пространств, связанных с ординалами. Оказалось, что решение этого вопроса невозможно в рамках общепринятой аксиоматической теории множеств. Было доказано, что логика GLP является полной в предположении аксиомы конструктивности. С другой стороны, доказано, что с теорией множеств совместно и утверждение о неполноте этой логики (в предположении о существовании так называемого слабого кардинала Мало).

Таким образом, неожиданно оказалось, что вопрос о полноте этой естественной и разре-

шимой пропозициональной логики невозможно решить в рамках теории множеств. Проект № 09-01-12163-офи\_м.

**«Быстрые алгоритмы и фундаментальные проблемы алгебраической теории сложности вычислений»**

*Руководитель: академик В. П. Платонов,  
НИИСИ РАН*

При выполнении указанного проекта были получены результаты *прорывного характера*. Исследования концентрировались вокруг двух знаменитых проблем алгебраической теории сложности вычислений. Первая проблема — это проблема существования субэкспоненциальных алгоритмов для решения проблемы дискретного логарифма в группе точек эллиптической кривой над конечным полем. Эта проблема является центральной в современной криптографии. Большинство из многочисленных исследователей считают, что подобного алгоритма не существует.

В 2002 г. В. П. Платонов открыл глубокую связь между вычислениями групп  $S$ -единиц в гиперэллиптических полях и проблемой дискретного логарифма в эллиптической криптографии. В связи с этим возникла проблема исследования и построения быстрых алгоритмов для вычисления групп  $S$ -единиц. В. П. Платоновым были развиты два метода для решения этой проблемы. Эти методы принципиально различны.

Первый метод базируется на теории непрерывных дробей. Была развита теория непрерывных дробей в функциональных полях над конечными полями констант и на ее основе построена эффективная аппроксимация  $S$ -единиц в гиперэллиптических полях непрерывными дробями. Исследованы границы эффективной аппроксимации непрерывными дробями в функциональных полях в зависимости от нормирований, входящих в множество  $S$ . Оказывается, в важном случае, когда нормирования из  $S$  соответствуют точкам на гиперэллиптической кривой, эта аппроксимация является наилучшей. В тоже время В. П. Платоновым построены контрпримеры, показывающие, что для нормирований высших степеней аппроксимация непрерывными дробями не является эффективной и даже не может быть использована в реальных вычислениях.

Второй метод базируется на новой процедуре матричной линеаризации. Этот метод позволяет решить проблему вычисления групп  $S$ -единиц в общем случае, для любых нормирований. Тем самым он превосходит метод непрерывных дробей. Более того, сравнительные вычисления, проведенные с помощью обоих методов, показывают, что второй метод дает более быстрые алгоритмы.

Эти результаты являются *самым значительным продвижением в этой области* со времен известных работ 1924 г. немецкого математика Артина. Проект № 09-01-12169-офи\_м.

**«Геометрические методы в механике»**

*Руководитель: член-корр. М. А. Гузев,  
ИПМ ДВО РАН*

Построено регулярное решение спектрального уравнения для тензора кручения пространства абсолютного параллелизма. Данное решение использовано в неевклидовой модели сплошной среды при описании механического состояния материала, содержащего дефекты внутренней структуры типа дислокаций. Вычислено распределение тензора плотности дислокаций и компонент поля напряжений, дано описание порогового свойства поведения материала под действием нагрузки. Установлено, что поведение механических характеристик определяется поведением тензора кручения. В отличие от подходов, применяемых другими авторами, используемые соотношения неевклидовой модели позволяют строить регулярные решения для различных типов дефектов.

Построено однопараметрическое семейство новых точных решений уравнения Эйнштейна с нулевой космологической постоянной, при «крайних» значениях параметра совпадающих с ранее известными метриками Калаби. Найденные метрики имеют специальную группу голономии  $SU(4)$  и являются асимптотически коническими. Римановы многообразия, снабженные построенными метриками, могут быть использованы для моделирования эффекта расширения пространства-времени в некоторых физических теориях, например,  $M$ -теории.

На основе теории преобразований Мутара построены примеры многопараметрических потенциалов (в частности, гравитационных потенциалов), допускающих точное интегри-

рование уравнений движения материальной точки для заданного уровня энергии. Данные потенциалы могут быть использованы при расчете движения спутников для орбит, не близких к полярным. Доказано, что для почти всех уровней энергии на критических уровнях, полученных из принципа перекидывания циклов, лежат критические точки – замкнутые магнитные геодезические.

Для римановых метрик, достаточно близких к гиперболической, доказана глобальная граничная жесткость: если метрика  $g$ , заданная на  $n$ -мерном шаре, близка к гиперболической, а метрика  $G$  реализует те же геодезические расстояния между точками края, что и  $g$ , то эти две метрики изометричны. С одной стороны, это обобщает результаты о единственности решения в классической обратной задаче кинематики на случай неизотропной среды. С другой стороны, это усиливает известные результаты о локальной граничной жесткости, в которых требуется априорная близость метрик  $g$  и  $G$  друг к другу.

Доказано, что все римановы и финслеровы метрики без сопряженных точек являются минимальными заполнениями для функционала финслеровой площади по Холмсу-Томпсону. С точки зрения классической механики, площадь по Холмсу-Томпсону представляет собой фазовый объем области между определенными уровнями энергии соответствующей гамильтоновой системы, а минимальность заполнения означает возможность получения хороших нижних оценок на этом объеме с помощью относительно грубых измерений граничных данных. Полученные нами результаты в глобальной задаче о восстановлении метрики по краевым расстояниям *не имеют зарубежных аналогов*, а используемые нами методы в отличие от работ других авторов, не ограничивают область применимости римановыми метриками, и сформулированные результаты справедливы для финслеровых пространств. Проект № 09-01-12130-офи\_м.

**«Методы римановой геометрии и топологии в математической физике и физике твердого тела»**

*Руководитель: доктор физ-мат. наук,  
П.Г.Гриневич, МГУ мех-мат.*

В рамках работы над проектом П. Г. Гриневичем, А. Е. Мироновым и С. П. Новиковым был получен следующий результат: уда-

лось применить методы динамических систем, включая алгебро-геометрический подход к спектральной теории чисто магнитного двумерного оператора Паули при одном уровне энергии, отвечающем основному состоянию.

Отметим, что двумерные (квазидвумерные) системы играют важную роль в современной физике. Достаточно упомянуть технологии, связанные с использованием тонких (сравнимых по толщине с размерами атомов) пленок или квантовый эффект Холла, используемый для создания квантового стандарта сопротивления.

Задача при фиксированном уровне энергии естественно возникает в физике твердого тела, поскольку в большинстве задач наиболее существенен вклад электронов вблизи поверхности Ферми (кривой Ферми в двумерных задачах), т.е. таких, энергия которых равна энергии Ферми.

Оператор Паули описывает квантовую динамику нерелятивистских заряженных частиц с ненулевым спином во внешнем электромагнитном поле. Для электронов (спин равен  $1/2$ ) в размерности 2 в калибровке Лоренца он имеет вид

$$L^P = \sum_{\alpha=1,2} (p_\alpha)^2 + B\sigma_3 + U,$$

$$ip_\alpha = \partial_\alpha + iA_\alpha, \quad \sum_{\alpha=1}^2 \partial_\alpha A_\alpha = 0$$

где  $\sigma_j$  – матрицы Паули

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix},$$

$$\sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \sigma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

(для упрощения формул мы полагаем  $e = 1$ ,  $m = 1/2$ , и пренебрегаем несущественными универсальными постоянными  $c$ ,  $\hbar$ ).

Для случая нулевого электрического поля  $E = 0$  он приводится к прямой сумме двух операторов Шредингера, имеющих «факторизованный вид» и связанных друг с другом преобразованием Лапласа.

Для двумерного оператора Шредингера исследование обратной задачи при одном уровне энергии методами теории солитонов было начато в 1976 г. Дубровиным, Кричевером и Но-

виковым. В качестве данных обратной задачи берется продолжение кривой Ферми в область комплексных квазиимпульсов, которое предполагается имеющим конечный род, и дивизор полюсов на ней. Среднее магнитное поле в этом подходе оказывается автоматически равным 0. В то же время для физики крайне важен случай ненулевого магнитного потока, исследованный, в частности, в работах Ааронова и Кашера для локализованных потенциалов, Дубровина и Новикова — для периодических другими методами. Однако до последнего времени применить к этой задаче методы теории динамических систем (теории солитонов) не удавалось.

Естественно возникает задача о выделении подкласса операторов с тождественно нулевым магнитным полем в терминах данных обратной задачи. Эта проблема оказалась неожиданно сложной, и ее решение было получено лишь в 1984 г. Веселовым и Новиковым с использованием идей работы Чередника 1980 г.

Наш новый результат состоит в выделении спектральных данных, отвечающих физически важной редукции, когда электрическое поле тождественно равно 0, а магнитное нетривиально. Оказывается, что при этом комплексная кривая Ферми распадается на две компоненты, волновая функция на которых совпадает в точках их пересечения. Редукции такого типа ранее не возникали. Удастся построить большой набор примеров, точно решаемых при одной энергии потенциалов, волновые функции которых на всей кривой Ферми явно вычисляются. В частности, построены примеры, когда собственные функции основного состояния заполняют многоугольник на кривой Ферми.

Также построены операторы, магнитное поле которых имеет решетку  $\delta$ -образных особенностей (решетку вихрей). Как известно, потенциалы с  $\delta$ -образными особенностями отвечают за эффект Ааронова-Бома, однако в нашем случае поток через особенность равен целому числу квантов, поэтому она может быть устранена калибровочным преобразованием. До калибровочного преобразования среднее поле равно 0, поскольку вклад регулярной части компенсируется вкладом особенностей. Тем самым, устраняя особенности, мы получаем регулярное поле с ненулевым интегралом потоком через элементарную ячейку.

Полученные результаты изложены в двух работах, принятых к публикации в журналах

«Теоретическая и математическая физика» и «Успехи математических наук». Они также опубликованы в форме электронных препринтов — arXiv:1001.4300, arXiv:1004.1157, arXiv:1005.0612. Проект № 09-01-12148-офи\_м.

### «Интегрируемые модели и развитие квантовой теории поля»

*Руководитель: академик Л.Д. Фаддеев,  
ПОМИ РАН*

1. Альтернативная интерпретация модели Вайнберга-Салама.

Объединение электромагнитного и слабого взаимодействий, предложенное Вайнбергом и Саламом в конце 60-х, стало первым адекватным применением полей Янга-Миллса в реальной физике. В основе успеха лежит безразмерность константы связи, обеспечивающая перенормируемость и использование скалярного поля (мезон Хиггса) для введения размерного параметра, определяющего массы физических полей. Однако, наивный механизм появления этого параметра через вакуумное ожидание  $\langle \phi \rangle$ , порождаемого несимметричным взаимодействием вида  $\mathcal{L} = \lambda(\phi^2 - a^2)^2$ , вызывает скептическое отношение многих теоретиков на протяжении сорока лет существования модели. Представляется, что использование взаимодействия вида  $\lambda\phi^4$ , которое не обладает свойством асимптотической свободы, не может дать последовательное и корректное теоретико-полевое описание модели.

Бесспорно, что модель Вайнберга-Салама и механизм Хиггса вошли в современную Стандартную Модель элементарных частиц и вполне удовлетворяют феноменологическое сообщество. Остается ждать, когда большой коллайдер подтвердит существование мезона Хиггса. Тем не менее, это не исключает возможности для поиска альтернативной интерпретации появления массы в модели Вайнберга-Салама.

Одна из таких возможностей была предложена Л. Д. Фаддеевым в сотрудничестве с А. Ниemi и М. Чернодубом (см. [M.N.Chernodub, L.D.Faddeev, A.J.Niemi, Non-abelian Supercurrents and Electroweak Theory, JHEP 0812 (2008) 014, arXiv:0804.1544 [hep-th]]).

Несколько позже Л. Д. Фаддеев изложил свой подход к этой проблеме в работе [L.D.Faddeev, An alternative interpretation of the Weinberg-Salam

model. arXiv:0811.3311 [hep-th]]. Основная идея этого подхода заключается в следующем: Поле Хиггса, используемое с модели Вайнберга-Салама, задается дублетом  $\phi = (\phi_1, \phi_2)$ , где  $\phi_1$  и  $\phi_2$  – комплексные скалярные поля. Калибровочная группа  $SU(2)$  действует на этот дублет и поле Янга-Миллса промежуточных мезонов обычным образом. Мы можем параметризовать дублет  $\phi$  через амплитуду  $\rho$ ,  $\rho^2 = |\phi_1|^2 + |\phi_2|^2$ , и три компактных переменных, из которых можно составить матрицу из группы  $SU(2)$ .

Если произвести калибровочное преобразование, используя эту матрицу, мы приходим к набору калибровочно-инвариантных переменных  $\rho$ ,  $W_\mu$ ,  $Z_\mu$ ,  $A_\mu$ , причем в лагранжиан войдет выражение типа  $\alpha\rho^2 W_\mu^* W_\mu + \beta\rho^2 Z_\mu^2$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  выражаются через константы связи  $g$  и  $g'$  модели. Таким образом, эффективные массы  $W$  и  $Z$  векторных частиц могут быть обеспечены ненулевым значением для  $\rho$ . Поле  $\rho$  входит в полный лагранжиан как конформный множитель в метрику  $ds^2 = \rho^2(dx^\mu)^2$ .

Таким образом, ненулевое значение  $\rho^2$  означает, что эта метрика является асимптотически плоской. Такое предложение и связанная с ним интерпретация механизма Хиггса вполне естественны.

Работа в этом направлении должна быть продолжена. Следует критически пересмотреть проблему вырождения вакуума для безмассовых скалярных полей. Ненулевое значение для  $\rho^2$  должно означать выбор физического вакуума. Хотелось бы привлечь к этой проблеме внимание специалистов по квантовой теории поля.

2. Перенормировка теории Янга-Миллса в свободной от неоднозначности калибровке.

Вопрос о построении корректной процедуры квантования неабелевых калибровочных теорий (полей Янга-Миллса), пригодной вне рамок теории возмущений, до сих пор остается открытым. В рамках теории возмущений процедура квантования полей Янга-Миллса была построена в работах Л. Д. Фаддеева, В. Н. Попова и Б. Де Витта. Предложенная ими процедура квантования лежит в основе современных моделей слабых и электромагнитных взаимодействий, а также является теоретической базой описания процессов глубоко неупругого рассеяния сильно взаимодействующих частиц и позволяет объяснить наблюдаемое экспериментально явление асимптотической свободы. Однако вне рамок теории возмущений эта процедура сталкивается с серьезными проблема-

ми. Квантование Фаддеева-Попова-Де Витта требует наложения на поля Янга-Миллса условия калибровки, которое выделяло бы однозначного представителя в классе калибровочно эквивалентных полевых конфигураций. В качестве такого условия обычно выбирают условие Кулоновской калибровки. Как было отмечено В. Н. Грибовым, это условие, совместно с уравнениями поля, действительно приводит к однозначной фиксации векторного потенциала в случае абелева векторного поля, описывающего электромагнитные взаимодействия. Однако для неабелевых многокомпонентных полей Янга-Миллса условие кулоновской калибровки не фиксирует однозначно калибровочное поле. Позднее этот результат был обобщен И. Зингером на случай произвольной релятивистски инвариантной калибровки. Возникает своеобразная «no-go» теорема: с одной стороны, каноническая процедура квантования требует наложения условия калибровки, в то время как для случая больших полей Янга-Миллса не существует условия калибровки, выбирающего однозначного представителя в классе калибровочно эквивалентных конфигураций. Формальное применение процедуры Фаддеева-Попова вне рамок теории возмущений приводит к появлению дополнительных сингулярностей, физический смысл которых не ясен. Возможный путь обхода этой трудности состоит в использовании так называемых «алгебраических» калибровок (т.е. калибровочных условий, не содержащих дифференциального оператора) типа. Действительно, в этом случае можно избежать неоднозначности, отмеченной Грибовым. Однако алгебраические калибровки в стандартной теории Янга-Миллса неизбежно нарушают явную релятивистскую инвариантность теории, что приводит к серьезным трудностям и не позволяет построить процедуру устранения ультрафиолетовых расходимостей (перенормировку). Таким образом существует дилемма: процедура квантования Фаддеева-Попова-Де Витта в случае дифференциальных калибровок неприменима вне рамок теории возмущений, а использование алгебраических калибровок приводит к нарушению явной релятивистской инвариантности и не позволяет построить процедуру перенормировки. Между тем теоретический анализ данных, полученных на современных ускорителях, в частности результатов, которые, как ожидается, будут получены на Большом Адронном Коллайдере

(ЛНС), требует создания последовательных количественных методов, применимых в случае наличия сильно взаимодействующих частиц.

Возможный путь обхода указанной выше «no-go» теоремы с сохранением явной релятивистской инвариантности был предложен в работах (А. А. Slavnov, JHEP, 0808, 047; А. А. Славнов, Теоретическая и математическая физика, 161 (2009) 204; А. Quadri, А. А. Slavnov, arXiv: 1002.2490i[hep-th]). В этих работах было замечено, что явно релятивистски инвариантная формулировка теории калибровочных полей (в том числе электродинамика) требует введения нефизических степеней свободы (продольные и временные «фотоны»), которые однако не дают вклада в наблюдаемые калибровочно инвариантные величины. Возникает естественная идея: расширить спектр нефизических возбуждений поля Янга-Миллса, сохраняя неизменными значения наблюдаемых величин так, чтобы можно было наложить явно релятивистски инвариантную алгебраическую калибровку, свободную от неоднозначности Грибова. Эта идея была успешно осуществлена в упомянутых выше работах. При этом оказалось однако, что стандартная процедура перенормировки в новой формулировке требует существенной модификации.

Модифицированная процедура перенормировки для свободной от неоднозначности формулировки теории Янга-Миллса была построена в работе arXiv:1002.2490[hep-th], выполненной при поддержке гранта РФФИ № 09-01-12150-офи\_м. Оказалось, что в отличие от стандартной формулировки теории Янга-Миллса, устранение ультрафиолетовых расходимостей в калибровке, свободной от неоднозначности, требует не только перенормировки параметров (зарядов, масс, нормировки волновых функций), но и не мультипликативного переопределения полей. Тем не менее, как было показано, значения наблюдаемых калибровочно инвариантных величин не зависят от констант, участвующих в переопределении полей, и в том случае, когда применима теория возмущений, совпадают со значениями, вычисленными в стандартном формализме. Таким образом, предлагаемая модель позволяет анализировать процессы с участием сильно взаимодействующих элементарных частиц как путем приближенного решения уравнений Швингера-Дайсона, так и с помощью численных экспериментов на современных суперкомпьютерах. Проект № 09-01-12150-офи\_м.

**«Разработка новых методов аппроксимации и анализа вероятностных распределений. Приложения к построению эффективных алгоритмов обработки информации по полным и неполным данным (сжатие, классификация и оценивание)»**

*Руководители: член-корр. Б. С. Кашин,  
член-корр. А. Н. Ширяев, МИРАН*

С чисто математической точки зрения наиболее значительные результаты по гранту:

1. «Сжатые измерения», формулируемые как результаты о возможности эффективного восстановления любого разреженного вектора (сигнала) размерности  $N$  по информации о результатах измерений значений (на этом векторе) малого числа линейных функционалов. Критическую роль здесь играют полученные ранее геометрические результаты о возможности хорошего равномерного приближения  $N$ -мерного евклидова шара подпространством малой размерности. Принципиально важными в задачах восстановления являются недавние результаты Б. С. Кашина с J. Burgein'ом (Принстон) о возможности «хорошего» равномерного на конечном интервале приближения любого полинома Дирихле, ограниченного в среднем более «короткими полиномами». (Результаты такого типа представляют интерес для теории чисел.)

2. Значительный прогресс (международного уровня) в разработке методов аппроксимации вероятностных распределений достигнут В. Сенатовым, получившим новые неулучшаемые оценки в точности приближения (в метрике Леви и в средней метрике) распределений сумм независимых случайных величин в законе больших чисел и в центральной предельной теореме для многомерных векторов.

3. Разработана (А. Н. Ширяев) теория сведения нестандартных задач об оптимальной остановке, относящихся к основным задачам стохастической оптимизации, что дает резкое уменьшение размерности решаемых задач. На этом пути получены (А. Н. Ширяев, Е.В. Бурнаев) оптимизационные алгоритмы, многие из которых имеют неожиданную структуру типа правил «Buy and Hold» — хорошо известных (но не обоснованных) правил инвестирования в финансовой практике. Решен ряд конкретных практически интересных задач (задача ребалансирования портфеля ценных бумаг, задачи о разладке для скачкообразных процессов). Проект № 09-01-12173-офи\_м.

**«Методы асимптотической теории представлений в комбинаторике и математической физике»**

*Руководитель: доктор физ-мат. наук  
А. М. Вершик, ПОМИ РАН*

1. Главный разработанный и предположительно доказанный результат одного из направлений работы по проекту состоит в описании континуальной предельной модели некоторых подалгебр групповой алгебры симметрических групп так называемых алгебр Бете. Этот вопрос связан с широко известным анзацем Bethe, который до сих пор не получил полного математического обоснования. Новым является континуальный («гидродинамический»). Особенно важен случай антиферромагнетика, где альтернативных моделей нет. Не исключено, что проводимое исследование поможет дать не только объяснение анзацу Бете, но и послужить основой для построения континуальных моделей в других алгебро-физических задачах.

2. В другой части проводимых исследований удалось обобщить ряд классических результатов о случайных блужданиях в евклидовых пространствах (результаты о невозвратности, предельные теоремы) на случай псевдохарактеров и квазиморфизмов произвольных групп. Разработанный подход носит *прорывный характер* и позволяет получить доказательства серии глубоких результатов (включая известные гипотезы сразу в нескольких смежных областях) непосредственно из базовых фактов существования нетривиальных псевдохарактеров на группах того или иного класса. Так, в случае групп классов отображений поверхностей в качестве следствия нами *получено доказательство знаменитой гипотезы* о том, что «случайный элемент группы является псевдоаносовским». Применение нашего подхода к группам кос Артина позволяет доказать значительное количество важнейших результатов для теории классических узлов и зацеплений. Проект № 09-01-12175-офи\_м.

## КОГЕРЕНТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО, СИНХРОТРОННОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ

*Обзор подготовил Квардаков В.В.*

По тематике Секции было поддержано 15 проектов /1-15/, выполняемых научными коллективами из Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Новосибирского государственного университета, Российского научного центра «Курчатовский институт», Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Института кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Института прикладной физики РАН, Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, Научно-исследовательского института нормальной физиологии им. П.К. Анохина РАМН, Института цитологии и генетики Сибирского отделения РАН, Института физики полупроводников СО РАН и др.

Основной целью поддержанных работ явилось развитие междисциплинарных фундаментальных научных исследований в области генерации, регистрации и применения рентгеновского, синхротронного и терагерцового излучений, в частности, в условиях когерентного взаимодействия этого излучения с веществом.

Актуальность работ по созданию новых методов структурной диагностики материалов, включая биоорганические, связана с развитием новых научных направлений и технологий, в частности, конвергентных нано-био-инфо-когнитивных (НБИК) наук и технологий, а также с прогрессом в области модернизации имеющихся и созданием новых – более ярких и когерентных источников синхротронного и терагерцового излучения. Представленные работы были выполнены с использованием Курчатовского источника синхротронного излучения /7, 9, 10, 13/, Новосибирского терагерцового лазера на свободных электронах /3, 4, 6, 14/, мощных сверхпроводящих гиротронов /5/, российско-германского канала на синхротроне BESSY-2 /13/.

Среди развиваемых экспериментальных методов можно отметить: методы на основе стоячих рентгеновских волн /9/, рентгеновскую голографию, многоволновую дифракцию, ли-

нии Коссея, рефлектометрию /7/, рентгеноакустику, резонансное рассеяние /11/, молекулярно-контрастную /10/ и эмиссионную /12/ микротомографию, рентгеновскую микроскопию /2/, фотоэлектронную и EXAFS спектроскопию /13/, рентгеновскую дифракцию с временным разрешением /2/, эффект Комптона /1/. Для терагерцового излучения были развиты методы томографии, голографии /6/, плазмоники /8/, генерации /4, 5/, детектирования /15/, исследования электромагнитных свойств метаматериалов /14/ и др.

Междисциплинарный характер исследований проявился, в частности, в кооперации специалистов нескольких научных направлений при изучении сложных биоорганических объектов: белково-липидных клеточных мембран /9/, молекул ДНК и белков /3/, бактериальных клеток /15/, нейронов мозга животных /10/, а также неорганических наноматериалов с уникальными свойствами: материалов спинтроники /7/, материалов с эффектом памяти формы /13/, метаматериалов /14/ и др.

Так, в проекте /10/ на примере мозга крыс впервые продемонстрирована возможность рентгеновской микротомографической визуализации активных групп нейронов, декорированных тяжелыми металлами, что открывает принципиально новые возможности для исследования когнитивных функций. Работа основана на совместных междисциплинарных экспериментах специалистов по рентгеновской томографии и синхротронному излучению, с одной стороны, и клеточной и когнитивной нейробиологии, с другой. Выполняемые работы носят оригинальный характер, реализованные методы молекулярного контрастирования мозга в сочетании с рентгеновской микротомографией ранее не использовались.

В проекте /9/ впервые методом стоячих рентгеновских волн выполнены исследования механизмов формирования биоорганических наносистем, нанесенных непосредственно на поверхность жидкой субфазы. Продемонстрированы принципиально новые возможности для характеристики белково-липидных моделей

клеточных мембран в условиях, наиболее приближенных к естественным условиям функционирования биомембраны в живых клетках. Такие исследования направлены на получение информации о структурно-функциональном состоянии мембранных моделей на молекулярном уровне и могут быть использованы для решения широкого круга задач, связанных с медицинской диагностикой и биофизическими исследованиями:

- получение данных о молекулярной организации белково-липидных моделей клеточных мембран;
- изучение механизмов повреждения клеточных мембран при патологическом воздействии на клетку;
- контроль эффективности и безопасности действия новых лекарственных препаратов *in vitro* и т.п.

В частности, было изучено влияние различных повреждающих агентов (тяжелых металлов и мочевины) на процессы формирования упорядоченных белково-липидных наносистем /9/. Показано, что при обработке молекул фермента глюкозооксидаза ионами свинца и хрома формирование белково-липидных слоев происходит по различному механизму белок-липидного взаимодействия. Так, при обработке ионами свинца белковые молекулы внедряются в липидную мембрану (гидрофобное взаимодействие), а при обработке ионами хрома белковые молекулы располагаются под липидным слоем (электростатическое взаимодействие). Результатом проведенных в проекте /9/ исследований явилось формирование нового научного направления, основанного на применении метода стоячих рентгеновских волн – нанодиагностики упорядоченных белково-липидных наносистем на поверхности жидкости.

В проекте /7/ впервые экспериментально зарегистрирован аномальный эффект Косселя, соответствующий выходу рентгеновского флуоресцентного излучения из кристалла в условиях резко асимметричной дифракции возбуждающего излучения. Аномальные линии Косселя представляли собой узко коллимированные пучки с интенсивностью в несколько десятков раз выше флуоресцентного фона и расходимостью в плоскости дифракции порядка нескольких угловых секунд, а вдоль линии Косселя – порядка десяти угловых минут. Отметим высокую чувствительность формы

аномальных линий Косселя к наличию тонких (вплоть до нанометрового размера) кристаллических и даже аморфных слоев на кристаллической подложке, что позволяет использовать обнаруженный эффект в качестве нового метода нанодиагностики.

Проект /2/ направлен на подготовку научного участия РФ в проекте Европейского рентгеновского лазера на свободных электронах (X-FEL). Сформированы предложения в научную программу исследований, разработаны новые рентгенооптические схемы и проекты по созданию научного оборудования экспериментальных станций, развиты вычислительные методы для описания физики рассеяния и электрон-ионных процессов в нанокластерах и макромолекулах. В частности, впервые выполнены прямые теоретические расчеты элементов когерентной рентгеновской оптики, проведен расчет пространственной структуры пучка СИ, сфокусированного планарной преломляющей линзой и претерпевшего дифракцию по Бреггу в совершенном кристалле кремния. В рамках статистической теории решена задача о распространении в свободном пространстве рентгеновских импульсов произвольной формы и «переносе» когерентности при распространении ограниченных пучков при дифракции в кристаллах. Выдвинута оригинальная идея создания источника переходного ТГц-излучения за счет когерентного взаимодействия микроструктур электронных пучков РЛСЭ с внешними слоистыми мишенями. Использование «отработанных» мощных электронных пучков X-FEL с фемтосекундной длительностью импульса (банча) для генерации ТГц-излучения позволит получить мощные когерентные источники терагерцового излучения. Реализация предложенной схемы позволит совершить в ТГц-диапазоне переход, сравнимый с переходом от рентгеновских трубок к источникам СИ, как по интенсивности, так и по когерентным свойствам излучения.

Методическому обеспечению работ на Новосибирском терагерцовом лазере на свободных электронах посвящен, в частности, проект /4/. Измерена длительность импульсов терагерцового излучения и длина когерентности. Разработана и изготовлена система непрерывного измерения спектра излучения при проведении экспериментов на станциях. Разработана система вывода излучения через алмазное окно с предварительной фокусировкой излучения для

получения полного прохождения излучения через окно относительно малого размера. Проведены предварительные измерения диапазонов перестройки частоты излучения при помощи изменения поля в ондуляторе и энергии электронов и определены факторы, ограничивающие диапазон перестройки.

С использованием излучения Новосибирского терагерцового лазера на свободных электронах впервые продемонстрированы методы визуализации объектов в реальном времени /6/. В частности, выполнены эксперименты по голографии, томографии и спекл-метрологии в реальном времени в терагерцовом диапазоне, включая детектирование скрытых объектов. Впервые в терагерцовом диапазоне продемонстрирован и использован для метрологических целей тальбот-эффект, в том числе, для измерения длины волны излучения и изучения искажения волновых фронтов, прошедших неоднородные объекты.

В проекте /14/ исследовано взаимодействие терагерцового излучения с новыми функциональными резонансными метаматериалами, разрабатываемыми для создания устройств управления поляризацией, фазой, интенсивностью и направлением распространения излучения. Эти метаматериалы созданы с помощью оригинальной технологии формирования прецизионных трехмерных оболочек из напряженных нанопленок. Метаматериалы имеют вид двумерных массивов трехмерных резонансных элементов: массивы кольцевых резонаторов и массивы цилиндров с винтовой проводимостью из металл-полупроводниковой нанопленки. Электромагнитные свойства метаматериалов на основе цилиндров с винтовой проводимостью исследованы в терагерцовом диапазоне с помощью фурье-спектроскопии и прямыми измерениями на пользовательской станции на базе лазера на свободных электронах (пропускание, изменение состояния поляризации проходящего излучения) – созданные структуры обладают резонансными высокобианизотропными свойствами в терагерцовом диапазоне.

Разработке научных основ построения различного типа плоских элементов плазмонной оптики работающих в терагерцовом диапазоне частот посвящен проект /8/. Измерен спектр пропускания поверхностного плазмона в области локализации его поля в ТГц-частотах в планарном диэлектрическом волноводе на по-

верхности алюминия. Рассчитаны, созданы и измерены дифракционные решетки, обладающие запрещенной зоной (брэгговским отражением) для ТГц-поверхностных плазмонов. Измерено возбуждение поверхностного плазмона на глубокой диэлектрической решетке, находящейся на металлической подложке. Измерено распространение (спектр пропускания) ТГц-плазмона по полоскам металла с различной доменной структурой. Изучено и оптимизировано устройство ввода широкополосного плазмона на поверхность на основе призмы полного внутреннего отражения. Расширен динамический диапазон терагерцового импульсного спектрометра и улучшена его конфигурация для измерения спектров отражения от поверхности спектра пропускания широкополосного поверхностного плазмона.

В проекте /3/ изучено нетермическое воздействие терагерцового электромагнитного излучения на различные уровни организации живых систем. Исследование воздействия терагерцового излучения на стрессочувствительные системы клетки *E.coli* выявило реакцию генной сети окислительного стресса. Исследование интегрального протеомного ответа клеток *E.coli* выявило не менее 18 белков существенно меняющих (более чем в 2 раза) уровень экспрессии под действием терагерцового излучения. Среди них методом масс-спектрометрического анализа идентифицированы пять. Эффектов прямого воздействия терагерцового излучения на вторичную структуру ДНК обнаружено не было.

В настоящее время в качестве альтернативных (по отношению к лазерам на свободных электронах) источников мощного терагерцового излучения рассматриваются сверхпроводящие гиротроны. В проекте /5/ получены рекордные значения мощности и частоты генерации гиротронов. Предложена новая разновидность электродинамической системы терагерцового гиротрона, позволяющая согласно расчету значительно снизить долю омических потерь в стенках и повысить среднюю мощность излучения. Экспериментально исследована новая разновидность электронно-оптической системы гиротрона, обеспечивающая большую долю вращательной энергии частиц. На начальной стадии работ по созданию точечного источника экстремального ультрафиолетового излучения для проекционной литографии высокого разрешения создана установка,

предназначенная для исследования пробоя газа в сфокусированном пучке терагерцового излучения и параметров образующейся плазмы в режиме относительно длинных импульсов киловаттного уровня мощности.

В заключение отметим, что анализ отчетов по проектам в целом позволяет выявить высокий научный, методический и технический уровень выполненных исследований и широкий междисциплинарный подход к решению проблем.

### Список поддержанных проектов по секции 003

1. РФФИ № 09-02-12090-офи\_м. Исследование фундаментальных проблем рассеяния рентгеновского и синхротронного излучения на свободных и связанных электронах. Рук. Аристов В. В.
2. РФФИ № 09-02-12097-офи\_м. Развитие методов нанодиагностики для рентгеновских лазеров на свободных электронах, специализированных источников синхротронного и терагерцового излучений на основе когерентной рентгеновской оптики и экспериментов с временным разрешением. Рук. Носик В.Л.
3. РФФИ № 09-02-12100-офи\_м. Изучение фундаментальных основ селективного воздействия терагерцового излучения на пространственную организацию биологических объектов. Рук. Пельтек С. Е.
4. РФФИ № 09-02-12121-офи\_м. Разработка методов измерения параметров мощного терагерцового излучения и методов управления этими параметрами. Рук. Винокуров Н. А.
5. РФФИ № 09-02-12154-офи\_м. Терагерцовые гиротроны с предельными параметрами и их возможные приложения. Рук. Литвак А. Г.
6. РФФИ № 09-02-12158-офи\_м. Разработка физических основ томографии, голографии и метрологии с использованием источника когерентного монохроматического терагерцового излучения. Рук. Князев Б. А.
7. РФФИ № 09-02-12164-офи\_м. Развитие фазочувствительных методов рентгеновской голографии, многоволновой дифракции и линий Косселя для изучения атомной структуры наноматериалов. Рук. Квардаков В. В.
8. РФФИ № 09-02-12198-офи\_м. Терагерцовая плазмоника. Рук. Шкуринов А. П.
9. РФФИ № 09-02-12207-офи\_м. Нанодиагностика биоорганических тонкопленочных структур с применением метода стоячих рентгеновских волн. Рук. Ковальчук М. В.
10. РФФИ № 09-02-12210-офи\_м. Разработка нового метода молекулярно-контрастной рентгеновской микротомографии для исследования нервной системы и когнитивных процессов. Рук. Асадчиков В. Е.
11. РФФИ № 09-02-12239-офи\_м. Рентгеноакустические методы и резонансное рассеяние в экспериментах с временным разрешением. Рук. Занавескина И. С.
12. РФФИ № 09-02-12251-офи\_м. Эмиссионная рентгеновская томография микро- и нанообъектов. Рук. Рошупкин Д. В.
13. РФФИ № 09-02-12257-офи\_м. Развитие спектральных локально-чувствительных методов исследования нанообъектов и конденсированных сред с использованием синхротронного излучения. Рук. Менушенков А. П.
14. РФФИ № 09-02-12303-офи\_м. Исследование взаимодействия терагерцового излучения с новыми функциональными резонансными метаматериалами для устройств управления поляризацией, фазой, интенсивностью и направлением распространения излучения. Рук. Принц В. Я.
15. РФФИ № 09-02-12324-офи\_м. Импульсные источники интенсивного терагерцового излучения и их использование для исследования газовых, плазменных и биологических объектов. Рук. Суворов Е. В.

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Обзор подготовил Бугаев Александр Степанович

### Исследование нетрадиционных видов взаимодействий, типов волн, структур и материалов с целью разработки эффективных устройств обработки сигнальной информации

В качестве обобщенной рассматриваемой проблемы можно выделить следующую: исследование нетрадиционных видов взаимодействий, типов волн, структур и материалов с целью разработки эффективных устройств обработки сигнальной информации.

Проекты, непосредственно нацеленные на решение данной проблемы, имеющие не только фундаментальную, но и практическую направленность.

#### 1. Виды взаимодействия

##### «Исследование свойств спин-волновых возбуждений в магнитных микро- и наноструктурах и возможности построения спин-волновых приборов на их основе»

Руководитель: Ю.А. Филимонов

В проекте исследуется возбуждение антисимметричных мод спин-волнового резонанса (СВР) в пленках ферромагнитных металлов с симметричными граничными условиями для спинов. Методика возбуждения основана на использовании копланарной линии передачи с ферромагнитной пленкой, играющей роль центрального проводника. В этом случае возбуждающее высокочастотное магнитное поле имеет антисимметричное распределение по толщине ферромагнитной пленки, что обеспечивает эффективную связь с низшей антисимметричной модой СВР. Показано, что использование дополнительных слоев немагнитного металла над и под ферромагнитной пленкой позволяют перестраивать эффективность связи с симметричной и антисимметричной модами. На основе наноструктурированных пленок ферромагнитных металлов, полученных осаждением на профилированные подложки, разработана конструкция режекторного фильтра СВЧ. Его существенным отличием от известных аналогов является снижение требования к полям подмагничивания за счет эффекта анизотропии формы, при сохранении коэффициента погло-

щения СВЧ мощности. Предложена среда для магнитной записи, отличающаяся от известных аналогов возможностью создания многоуровневой записи. Проект № 09-07-12148.

##### «Создание новых акустоэлектронных СВЧ устройств на объемных акустических волнах на основе физических свойств материалов и современных технологий и методов контроля»

Руководитель: Ю.В. Гуляев

Исследуются магнитоакустические возбуждения в планарных структурах в условиях сильно неоднородного магнитного поля, позволяющие создать высокочастотные резонаторные устройства и датчики на их основе. Показано, что эффективное возбуждение коротких акустических волн (АВ) обменными магнитостатическими колебаниями (МСК) в толстых ферритовых пленках, с толщиной много большей длины АВ, происходит при условии совпадения волновых чисел МСК и АВ. При этом эффективность возбуждения значительно превосходит эффективность возбуждения АВ с помощью дипольных МСК. Показано, что дискретность спектра упругих возбуждений приводит к аномальной частотной зависимости резонансных магнитных полей обменных МСК, волновые числа которых совпадают с волновыми числами АВ, а также к частотным осцилляциям ширины резонансной кривой, что открывает дополнительные возможности при разработке СВЧ резонаторов. Проект № 09-02-12443.

#### 2. Типы волн

##### «Разработка физических принципов создания одноэлементного акустоэлектронного датчика для быстрой идентификации жидкостей»

Руководитель: А.В. Медведь

Рассматривается использование поверхностных акустических волн горизонтально-сдвиго-

вой поляризации в слоистых структурах на подложке из повернутого на  $36^\circ$  Y-среза танталата лития для создания одноканального датчика распознавания жидкостей без традиционных сенсорных решеток. Физическая идея распознавания заключается в использовании многочисленных отраженных от нескольких различных неоднородностей волн, эффективность отражений от каждой из которых зависит от электрофизических параметров граничащей с этими неоднородностями внешней среды. На примере нескольких доступных анализов экспериментально продемонстрирована работоспособность предложенного принципа распознавания жидкостей. Проект № 09-07-12143.

**«Исследование свойств фотонных, фононных и магнонных кристаллов и возможности создания новых приборов на их основе»**

*Руководитель: С.А. Никитов*

В проекте исследовано распространение поверхностных магнитостатических волн в ферромагнитной пленке переменной толщины с планарной периодической структурой в виде решетки вытравленных параллельных полос (одномерном магнонном кристалле). На основе анализа дисперсионных характеристик и пропускательной способности таких структур показана возможность их использования для создания узкополосных и гребенчатых фильтров. Кроме этого, исследован спектр резонансных спин-волновых возбуждений, локализованных в пределах элементарной ячейки касательно намагниченного двумерного ферритового магнонного кристалла, полученного вытравливанием в пленке железоиттриевого граната (ЖИГ) отверстий в виде гексагональной решетки. Экспериментально изучалась зависимость от магнитного поля уровня сигнала на фиксированной частоте, отраженного от расположенной на поверхности кристалла микрополоски. Для диапазона частот 3–8 ГГц показано, что по сравнению со случаем исходной пленки ЖИГ, интервал полей подмагничивания, в котором за счет возбуждения спиновых волн наблюдается снижение уровня отраженной мощности, в магнонном кристалле оказывается, во-первых, существенно шире и, во-вторых, практически не меняется при изменении ориентации поля подмагничивания

относительно микрополоски. Существует ряд значений поля, для которых на фиксированной частоте наблюдается резонансный рост поглощения СВЧ мощности, что связывается с резонансными спин-волновыми возбуждениями, локализованными в пределах элементарной ячейки кристалла. Проект № 09-02-12433.

**«Волновые процессы в структурах магнетик-сегнетоэлектрик»**

*Руководитель: Ю.К. Фетисов*

Изучается поведение спиновых волн в структурах магнетик-сегнетоэлектрик, в частности, высокочастотная (0,8–16 ГГц) бистабильность в планарном резонаторе с пленкой феррита железоиттриевого граната. Наиболее очевидное применение данного явления в электронике — создание переключаемых электрическим и магнитным полем устройств обработки СВЧ сигналов (модуляторы, направленные ответвители) и логических элементов памяти нового типа. Экспериментально исследованы амплитудные и частотные характеристики распространяющихся спиновых волн в линии передачи, содержащей пленку феррита железоиттриевого граната и сегнетоэлектрическую пластину из цирконата-титаната свинца. Пленка феррита механически соединена со стороны подложки с пластиной сегнетоэлектрика с помощью клея. Спиновые волны в пленке возбуждали с помощью микрополосковых преобразователей на частоте 4 ГГц, длина распространения составляла 4 мм. Экспериментально установлено, что амплитудные и фазовые характеристики такой линии передачи имеют вид, аналогичный для свободной ферромагнитной пленки, однако полоса пропускания линии передачи перестраивается с увеличением напряженности магнитного поля, минимальные вносимые потери составляли около 12 дБ. Проект № 09-02-12439.

**3. Структуры и материалы**

**«Разработка лазерного оптоакустического метода получения наноразмерных гетероматериалов»**

*Руководитель: А.А. Карабутов*

В проекте разработаны физические основы лазерного опто-акустического метода по-

лучения наноразмерных гетероматериалов. В основе метода лежит воздействие лазерного излучения наносекундной длительности на поверхность материала, механически нагруженную прозрачным диэлектриком (импедансную). Используя данную технологию, становится возможным получение состояний веществ, находящихся в околокритической области их фазовой диаграммы. Последующий распад указанных состояний приводит к образованию на поверхности материала наноразмерных образований. В ходе экспериментов были получены состояния алюминия и ртути, лежащие в околокритической области их фазовых диаграмм. Проект № 09-02-12427.

**«Взаимная трансформация ближних и дальних электромагнитных полей при их взаимодействии с метаматериалами, включая фотонные и магнитофотонные кристаллы»**

*Руководитель: А.Н. Лагарьков*

Рассмотрены методики изготовления планарных плазмонных метаматериалов на основе пленок благородных металлов (серебра и золота) с использованием метода электронно-лучевой литографии. Изготовлена серия планарных плазмонных метаматериалов, представляющих собой наноперфорированные пленки благородных металлов с набором нанотверстий заданной формы (в том числе хиральной), упорядоченных в квадратную или гексагональную плоскую решетку. Ключевым результатом работ является обнаружение явлений линейного двулучепреломления и линейного дихроизма в анизотропных плазмонных метаматериалах; а также явления циркулярного дихроизма в образцах планарных хиральных метаматериалов. На основе измерения поляризационных характеристик электромагнитного поля, прошедшего через метаматериалы, показана взаимосвязь резонансов бегущих плазмон-поляритонов, возбуждаемых на двумерной субволновой решетке нанотверстий, и спектральных зависимостей поляризационных параметров электромагнитного поля, распространяющегося через метаматериалы. Проект № 09-02-12455.

**«Решение физико-технологических проблем создания акустоэлектронных резонаторов и фильтров на основе монокристаллических пленок, новых материалов и брэгговских структур»**

*Руководитель: Г.Д. Мансфельд*

В проекте, на основе анализа передаточных свойств многослойных структур с учетом эффектов анизотропии, затухания и фазовой расстройки, разработана теория возбуждения и распространения акустических волн в многослойных акустических структурах, образованными парами пьезоэлектрик-металл с целью получения желаемых частотных и фазовых характеристик, оптимизации согласования резонаторов и фильтров с источниками сигнала и электрической нагрузкой. Развита методика расчета передаточных акустических и электрических характеристик пассивного пьезоэлектрического слоя в зависимости от его электрической нагрузки. Начата разработка технологических методик получения тонких монокристаллических пленок диэлектриков, металлов и пьезоэлектриков, а также проведены экспериментальные исследования резонаторных структур на основе таких пленок. Проект № 09-02-12445.

**«Метаматериалы и дифракционные наноструктуры с резонансными магнитооптическими свойствами»**

*Руководитель: В.Ф. Сойфер*

Созданы методы и компьютерные программы для электромагнитного моделирования дифракции света и расчета собственных мод периодических дифракционных структур, выполненных из намагниченного материала. В рамках вычислительного эксперимента исследованы резонансные магнитооптические свойства диэлектрических дифракционных структур, состоящих из дифракционной решетки, образованной щелями субволновой ширины, и однородно намагниченного слоя. Показано, что указанные структуры обладают интенсивными магнитооптическими эффектами, заключающимися в резонансном изменении коэффициентов пропускания и отражения при изменении величины намагниченности. Указанные эффекты обнаружены для обоих типов поляризации падающей волны (ТЕ и ТМ). Величина эффектов на два порядка превышает

ет аналогичные эффекты для однородного намагниченного слоя. Кроме того, исследованы резонансные магнитооптические свойства металлодиэлектрических гетероструктур, состоящих из металлической дифракционной решетки на равномерно намагниченной диэлектрической подложке (вектор намагниченности направлен вдоль штрихов решетки). Показано, что магнитооптический интенсивный эффект (экваториальный эффект Керра) в указанных гетероструктурах в несколько десятков раз превышает аналогичный эффект для однородной магнитной пленки. Проведен расчет дисперсионных кривых мод

рассмотренных дифракционных структур. На основе анализа дисперсионных кривых показано, что спектральные положения обнаруженных магнитооптических резонансов совпадают с условиями возбуждения собственных мод структуры. Исследовано изменение вида дисперсионных кривых, происходящее при намагничивании материала структуры. Результаты приведенных выше исследований и обнаруженные резонансные магнитооптические эффекты открывают новые возможности при разработке устройств интегральной оптики, предназначенных для управления амплитудой световой волны. Проект № 09-07-12147.

### **Разработка высокоэффективных устройств спектрально-поляризационной обработки оптических изображений на основе фотон-фононного взаимодействия в кристаллах для спектроскопии астрономических объектов**

В качестве рассматриваемой проблемы можно выделить следующую: разработка высокоэффективных устройств спектрально-поляризационной обработки оптических изображений на основе фотон-фононного взаимодействия в кристаллах для спектроскопии астрономических объектов.

Проекты, непосредственно нацеленные на решение данной проблемы:

- № 09-02-12419 (головной) «Разработка и исследование новых принципов высокоэффективных устройств спектрально-поляризационной обработки оптических изображений на основе фотон-фононного взаимодействия в кристаллах для создания аппаратуры спектроскопии астрономических объектов» (рук. А.М. Черепашук).
- № 09-02-12432 «Исследование свойств перспективных материалов для устройств акустоэлектроники и акустооптики» (рук. С.В. Кулаков)
- № 09-02-12405 «Разработка принципов управления характеристиками оптического излучения с помощью акустооптических устройств на основе частотной модуляции ультразвуковых волн» (рук. В.Э. Пожар).
- № 09-02-12396 «Разработка принципов создания акустооптических систем для управления двухцветным лазерным излучением» (рук. В.Н. Уласюк).

Использование акустооптических спектральных методов в астрофизических исследованиях

является новым инструментальным методом в мировой практике. Следует отметить, что спектроскопия изображений как развивающийся инструментальный метод, открывающий новые перспективы в астрофизике и астрономии, с успехом применяется зарубежными астрономами и в NASA. В настоящее время известно два вида электронно-перестраиваемых фильтров: жидкокристаллические и акустооптические. Прогресс в акустооптике в последние годы демонстрирует, что созданные на основе акустооптического эффекта перестраиваемые электронным образом по длинам волн акустооптические фильтры могут оказаться почти идеальным инструментом для спектральной и поляризационной обработки оптических изображений в реальном масштабе времени. Акустооптические фильтры не имеют движущихся механических частей и допускают чрезвычайно быструю перестройку вплоть до десятков микросекунд и, соответственно, анализ быстроизменяющихся по спектру и поляризации объектов. Они обеспечивают очень высокое число спектральных каналов и имеют высокий коэффициент пропускания в рабочей поляризации. Наконец, вследствие физического принципа действия акустооптические фильтры позволяют проводить одновременно со спектральным анализом поляризационный анализ изображений в реальном масштабе времени, адаптивно менять спектральную функцию пропускания электронным образом, осуществлять мульти-

спектральный и корреляционный анализ, т.е. осуществлять функции принципиально недоступные традиционным оптическим устройствам. Конструктивно акустооптический спектрометр для астрофизических исследований представляет собой акустооптический управляемый фильтр, размещенный на телескопе перед ССД-камерой, и электронный блок управления.

Предполагается, что конструкция акустооптического фильтра должна быть выполнена таким образом, чтобы оптическая ось системы не претерпевала излома. Акустооптический фильтр должен обладать достаточно большим полем зрения, чтобы его можно было использовать с любым телескопом Cassegrain с типичной сходимостью  $f/12-f/20$  и типичным конструктивом ССД-камеры для астрономических исследований. Отличием акустооптических спектрометров изображений от акустооптических спектрометров интегрального светового потока является способность спектральной фильтрации мелких деталей изображения или высших пространственных частот. Для астрофизических наблюдений эта особенность прибора является чрезвычайно важной, поскольку, как правило, угловой размер наблюдаемых объектов мал и визуальное разрешение нескольких близко расположенных объектов, а также наблюдение формы объектов протяженных требует спектральной аппаратуры, вносящей минимальные искажения в оптический тракт телескопа. Проблема неискаженной акустооптической передачи спектральных изображений порождает задачу исследования физических факторов, влияющих на качество изображения. Кроме того, проблема неискаженной передачи изображений тесно связана с оптическим качеством монокристаллов, применяемых в фильтре, и является самостоятельной задачей кристаллофизики.

Таким образом, междисциплинарный характер решаемой проблемы заключается в том, что исследования могут быть организованы в соответствии с логически связанной производственной цепочкой: от роста кристалла до исследования фундаментальных проблем Вселенной. В этой связи теоретические исследования в области акустики значимы для создания не только акустооптических фильтров, но и для других приборов: дефлекторов, линий задержки, то есть для области фотоники, оптоэлектроники и лазерной техники. Раз-

рабатываемая методика уменьшения хроматических aberrаций (проект № 09-02-12419) по сути является основой для разработки способов уменьшения углового чирпа фемтосекундных лазерных пучков (физика лазеров). Алгоритмы согласования комплексного импеданса преобразователей фильтров изображений (проект № 09-02-12396) значимы для методов согласования комплексных нагрузок в СВЧ-радиоэлектронике. Новое знание в области физики роста кристаллов (проект № 09-02-12432) решает задачу создания на их основе рекордных по функциональным возможностям техническим параметрам спектральных акустооптических фильтров изображений для астрофизических исследований (фотоника, спектроскопия).

Если рассматривать выбранную проблему более детально, то отобранные проекты в комплексе решают задачи создания высокоэффективных акустооптических элементов. В частности, исследуются особенности распространения ультразвуковых волн в наиболее перспективных для акустооптики кристаллах парателлурита. Изучаются физические факторы, влияющие на неискаженную передачу спектральных изображений. Здесь, наряду с традиционными причинами оптических искажений (низкое оптическое качество кристалла), акустооптическим устройствам обработки изображений свойственны специфические искажения, вызываемые физической сущностью акустооптического взаимодействия:

1. Хроматические aberrации обусловлены спектральной селективностью акустооптического взаимодействия. Они приводят к сдвигу спектральных изображений на ССД-матрицы на различных длинах волн.
2. Искажения изображения, вызванные конечной полосой пропускания фильтра, связаны с тем, что спектральные составляющие внутри полосы пропускания отклоняются фильтром под разными углами, т.е. являются также искажениями хроматическими.
3. Влияние неоднородности распределения акустического поля.
4. Паразитная интегральная засветка изображения. В узкополосных акустооптических фильтрах остаточный световой поток в нулевом порядке в несколько сотен раз превышает световой поток, несущий информацию об изображении. Остаточный световой поток вызывает свечение кристалла фильтра

вследствие рассеяния света как внутри кристалла, так и на оптических гранях кристалла.

5. Температурная стабильность спектральной настройки фильтра.

Далее важнейшим технологическим этапом создания акустооптических приборов и, в частности, акустооптических фильтров изображений является изготовление пьезопреобразователей и отдельных акустооптических элементов, а также разработка методик электрического согласования. И, наконец, акустооптические фильтры изображений предъявляют еще более жесткие требования к качеству монокристалла, чем фильтры интегральных световых потоков. Высокое качество изображений можно получить лишь в фильтрах, использующих кристаллы чрезвычайно высокой оптической однородности в достаточно

крупных светозвукопроводах — размерами до 60x35x35 мм вдоль осей. Однако в крупных монокристаллах парателлурита, как правило, присутствуют различного рода ростовые дефекты, приводящие иногда к серьезным нарушениям оптической однородности. Эта проблема так же требует серьезного рассмотрения (проект № 09-02-12432).

Таким образом, работы по созданию экспериментального акустооптического спектрального комплекса адаптивного анализа изображений позволят существенно продвинуться в решении фундаментальной научной проблемы астрофизики — изучения нестационарных явлений и процессов, протекающих в различных астрономических объектах: квазарах, активных ядрах галактик, тесных двойных звездных систем, Новых и Сверхновых звездах.

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ И ВАКЦИН

*Обзор подготовил Александр Габирович Габиров*

В области «биофармацевтики» можно отметить прорывные работы в области низкомолекулярных соединений-биорегуляторов, ингибиторов вирусной активности, гормонов. Безусловно, определенный успех достигнут и в области рекомбинантных белков – потенциальных лекарственных средств, а также и в области инновационных методов диагностики.

Комплексное исследование, проведенное на базе современных технологий, было направлено на поиск эффективных, малотоксичных и универсальных препаратов для лечения онкологических заболеваний. Данная работа, проводимая под руководством член-корреспондент РАМН Ф.Л. Киселева и член-корреспондент РАН О.А. Донцовой, носит абсолютно приоритетный характер. В качестве мишени противоопухолевой терапии выбран фермент теломеразы, который активируется в большинстве опухолей человека, запуская механизм поддержания длины теломер при неограниченном клеточном делении. Для блокирования активности теломеразы будут использованы два типа синтетических олигонуклеотидов: антисмысловые ДНК и малые интерферирующие двуспиральные РНК, нацеленные на различные участки теломеразной РНК (hTERC). Этот биополимер является одним из основных компонентов теломеразного комплекса и служит матрицей для синтеза теломерных повторов. Поскольку прямое использование олигонуклеотидов затруднено из-за их нестабильности в клеточной среде и низкой эффективности целевого транспорта, в настоящем проекте предполагается иммобилизовать олигонуклеотиды на наночастицы различного химического состава для стабилизации и адресной доставки в опухолевые клетки, то есть сочетать преимущества ДНК (РНК)-технологий и нанобиотехнологии. На первом этапе исследования был проведен дизайн и синтез набора модифицированных 15-20-звенных олигодезоксирибонуклеотидов, комплементарных участку 251-271 РНК hTERC, который играет структурную роль в образовании теломеразного комплекса. Разработана оригинальная методика введения амино-, меркапто- и алки-

новые групп на 3'-конец ДНК-фрагмента через гексаметиленовый линкер. Показано, что такая модификация существенно повышает устойчивость олигонуклеотидов к нуклеазной деградации и обеспечивает их связывание с наночастицами. Дополнительное введение метокси-заместителей в 2'-положение фрагментов ДНК позволило существенно улучшить их свойства как потенциальных терапевтических агентов. Флуоресцентные группы, введенные на 5'-конец олигонуклеотидных конструкций, облегчили детекцию соединений. В качестве нанотранспортных средств на первом этапе использовали наночастицы золота и серебра. Их синтез, стабилизация и подготовка поверхности осуществлялись по оригинальным методикам, разработанным в авторском коллективе. Физико-химические свойства частиц, их размер и гидродинамический радиус были изучены методами просвечивающей электронной микроскопии, динамического рассеяния света, электронной спектроскопии в видимой области, электронной дифракции. Опробованы три стратегии иммобилизации модифицированных фрагментов ДНК на золотые наночастицы и выявлены их преимущества и ограничения. Разработаны методы тестирования теломеразной активности в клеточных экстрактах и отобраны оптимальные олигонуклеотидные конструкции для иммобилизации на наночастицы. Данная работа будет иметь высокие шансы на внедрение.

Проект № 09-04-12204-офи\_м. В качестве успешного исследования в области разработки новых низкомолекулярных противовирусных препаратов следует привести комплексную разработку потенциальных терапевтических средств против ВИЧ, проводимую под руководством члена-корреспондента РАН С.Н. Кочеткова. Известно, что, несмотря на существенный прогресс в создании лекарственных препаратов против таких опасных вирусов, как вирус иммунодефицита человека (ВИЧ) и вирус герпеса, который часто сопровождает СПИД, вызываемый ВИЧ, многие проблемы остаются нерешенными. Недостатком современных лекарственных препаратов является

их достаточно высокая токсичность, короткое время жизни в организме и неизбежное возникновение резистентных штаммов вируса. Описано несколько подходов для улучшения действия лекарственных препаратов. Одним из них является использование так называемых «коктейлей», содержащих несколько активных компонентов. Второй подход заключается в создании пролекарственных форм (депо форм) активных компонентов. В проекте предлагается новая комбинация активных ингибиторов ВИЧ для «коктейля», содержащего депо формы аналогов нуклеозидов, аналоги пирофосфата и нуклеозидные ингибиторы ВИЧ. За отчетный период авторами были получены следующие оригинальные результаты:

На основе фосфонатных производных были синтезированы депо формы анти-ВИЧ препарата ЗТС (ламивудин). Соединения подавляли репликацию ВИЧ, имели пониженную токсичность и улучшенную фармакокинетику.

Синтезированы негидролизуемые аналоги пирофосфата, подавляющие как синтез ДНК, так и пирофосфоролиз, катализируемые обратной транскриптазой ВИЧ. Наиболее перспективные соединения проверены как ингибиторы репликации ВИЧ в культуре клеток.

Изучены антигерпетические свойства 5'-фосфита ацикловира и проведен мутационный анализ тимидин киназы и ДНК-полимеразы штаммов вирусов герпеса, резистентных к ацикловиру.

Данную работу отличает комплексный подход, предполагающий использование методов органической химии, биохимии и клеточной биологии.

Проект № 09-04-12071-офи\_м. В этом же ряду стоит работа под руководством профессора О.А. Донцовой, посвященная разработке новых низкомолекулярных гормональных препаратов. Работа интересна тем, что уже на основе выполненных исследований подготовлен к выпуску новый лекарственный препарат, обеспечивающий импортозамещение. Проект направлен на разработку фундаментальных основ получения 6-замещенных стероидов, обладающих антиароматазной активностью, с целью создания лекарственных препаратов нового поколения для лечения гормонозависимых форм рака молочной железы.

В течение первого года исследований впервые получены потенциально биоактивные стероиды (6-аминометил- и 6-алкилиден-про-

изводные андростенонов) с применением принципиально нового, междисциплинарного подхода: сочетания оригинальных химических способов функционализации стероидной молекулы по положению 6 и структурной модификации полученных 6-замещенных стероидных производных андростанового ряда с помощью ферментных систем актинобактерий.

Получены приоритетные научные данные о биоконверсии 6-аминометил-, и 6-алкилиден-замещенных стероидов актинобактериями, о влиянии наличия, структуры и типа заместителей в 6-м положении стероидного ядра на реакции 1(2)-дегидрирования 3-кето-4-ен-стероидов во взаимосвязи с сопутствующими реакциями структурной модификации стероидов, осуществляемыми ферментными системами бактериальной клетки. С использованием *Nocardioides simplex* впервые установлена ранее не описанная ни для актинобактерий, ни для других микроорганизмов, дезаминирующая и дезаминометилирующая активность в отношении стероидных соединений (в частности, 6-(N,N-диметиламинометил)-андрост-4-ен-3,17-диона). Впервые показано, что при использовании в качестве субстратов смеси изомеров с различной ориентацией 6-аминометильного заместителя микробиологическому 1-дегидрированию подвергается преимущественно альфа-изомер.

Разработаны оригинальные и эффективные методы химического синтеза ключевых интермедиатов: 6-алкилиден- и 6-аминометил-замещенных стероидов ряда андростана; изучены их физико-химические свойства и влияние на клетки бактериального биокатализатора, исследованы пути комбинированного синтеза противоопухолевых препаратов с антиароматазной активностью, основанные на использовании различных 6-замещенных стероидов. На способы получения 6-метиленадрост-4-ен-3,17-диона из андрост-4-ен-3,17-диона и получения 6-метиленадроста-1,4-диен-3,17-диона (эксеместана) с использованием полученного 6-метиленадрост-4-ен-3,17-диона подана заявка на патент РФ (№ 2010107745/010891 от 04.03.2010).

Отличительной особенностью настоящего конкурса явилась попытка стимулировать исследования, направленные на «выключение генов». Эти работы, к сожалению, в списке отстающих в нашей стране. Здесь уместно упомянуть приоритетные исследования, проводимые

под руководством члена-корреспондента РАН С.А. Недоспасова.

Проект № 09-04-12185-офи\_м. В России до сих пор отсутствует современная технология генетического нокаута или мутагенеза в мышцах, позволяющая планомерно и воспроизводимо получать ценные для биомедицинских исследований линии мышей. В рамках работы по созданию мышинной модели для преклинических испытаний новых лекарств, блокирующих Фактор Некроза Опухолей (ФНО), в нашей лаборатории ранее были получены линии мышей, в которых функциональный ген ФНО мыши заменен геном ФНО человека (чФНО). Известно, что ФНО может передавать сигнал через два вида рецепторов: p55 и p75 (ФНОRр55 и ФНОRр75). Ранее была установлена межвидовая вырожденность взаимодействия человеческого ФНО с мышинным ФНОRр55 (мФНОRр55), но не с мышинным ФНОRр75 (мФНОRр75). Так, биохимический анализ кинетики связывания чФНО с мФНОRр75 показал сниженную способность ФНО связываться и активировать ФНОRр75. Более того, предварительные данные, полученные в нашей лаборатории, свидетельствуют о возможном нарушении функции ФНОRр75 в «гуманизованных» мышцах. Для восстановления полноценной передачи сигнала в «гуманизованных» по ФНО мышцах было необходимо «гуманизовать» ген рецептора ФНОRр75. Именно эта задача была выбрана в качестве научной платформы для налаживания всех этапов нокаутной технологии. Стратегия «гуманизации» гена ФНОRр75 заключается в замене внеклеточной части p75 рецептора мыши на человеческую аминокислотную последовательность, что должно позволить восстановить связывание человеческого лиганда с p75 рецептором в контексте мышинного организма. В течение первого года работы по «гуманизации» гена ФНОRр75 была создана генетическая конструкция для гомологичной рекомбинации в эмбриональных стволовых клетках мыши (ЭСК). Далее была успешно осуществлена трансфекция мутагенизирующей конструкции в ЭСК мыши линии BRUCE4, клоны прошли положительную и отрицательную селекцию. Позитивные клоны без каких-либо признаков дифференцировки были отобраны для следующих этапов скрининга. Далее, анализ ДНК неомицин-устойчивых клонов методом Саузерн-блот гибридизации позволил определить клоны с точной рекомби-

нацией, пригодные для инъекций в бластоцисты C56Bl/6. ЭСК клоны, прошедшие все этапы скрининга, в настоящий момент находятся на стадии инъекций в бластоцисты в лаборатории Питомника Лабораторных Животных филиала ИБХ им. Шемякина и Овчинникова РАН в Пушкино.

Проект № 09-04-12128-офи\_м. Альтернативный подход развит в проекте академика В.В. Власова. Целью настоящего междисциплинарного проекта является исследование образования и функционирования иммунопротеосомы при аутоиммунных патологиях и определение влияния специфических и неспецифических ингибиторов иммунопротеосомы и ее индуцибельных субъединиц на накопление иммунопротеосом в модельных клеточных линиях и развитие аутоиммунного процесса у лабораторных животных. На первом этапе проекта для изучения роли протеосомальных комплексов в патогенезе рассеянного склероза были исследованы паттерны деградации основного белка миелина (ОБМ) под действием очищенной протеосомы и иммунопротеосомы из различных источников. Показано, что в ходе деградации ОБМ протеосомами, выделенными из здоровой мыши линии BALB/C и SJL мыши, развивающей экспериментальный аутоиммунный энцефаломиелит (ЕАЕ), происходит значительное возрастание количественного высщепления пептидного фрагмента MBP ENPVVHFF, являющегося классическим маркерным пептидом, представляемом на МНСI комплексе. Методом иммуноблоттинга было показано, что протеасома в клетках линии NSO содержит большое количество иммуносубъединицы LMP7, а при обработке гамма-интерфероном в этих клетках увеличивается и количество иммуносубъединицы LMP2. Обнаружено, что в гомогенате мозга мышей линии BALB/c иммуносубъединицы протеосомы практически отсутствуют, тогда как в гомогенате мозга мышей линии SJL, предрасположенных к развитию ЕАЕ, количество иммуносубъединиц увеличено. Изучено действие низкомолекулярных ингибиторов на образцы протеосом из различных источников. Показано, что бортезомиб и эпоксомидин вызывает эффективное ингибирование ее функции, тогда как лактактин проявляет низкую активность. Получены siРНК (малые интерферирующие РНК) направленные на мРНК генов LMP2, LMP7 и MECL. Показана их способность эффективно

и селективно подавлять экспрессию индуцибельных субъединиц иммунопротеосомы, данные ингибиторы будут использованы на следующем этапе проекта для разработки новой стратегии лечения аутоиммунных патологий.

Интересное комплексное исследование было представлено учеными из Санкт-Петербурга под руководством члена-корреспондента РАН Г.Н. Можяевой. Проект № 09-04-12035-офи\_м. Этот коллектив направил усилия на разработку инновационных лекарственных средств против нейродегенеративных заболеваний. Депо-управляемый вход кальция в клеточную модель болезни Гентигтона оценивали, используя метод измерения интегральных токов через мембрану целой клетки в условиях фиксации потенциала (метод whole-cell). Анализ проведенных экспериментов показал, что аномальный кальциевый сигнал, наблюдаемый в клетках, затронутых БГ, может быть определен гиперувеличением величины депо-управляемого тока.

Определено, что увеличение депо-управляемого тока в клеточной модели БГ происходит за счет усиления экспрессии каналообразующих белков. Показано, что депо-управляемые каналы, претерпевающие изменения при БГ, имеют в своем составе белок TRPC1 как мажорную субъединицу. Тестирование фармакологических агентов EVP, ранее показанных как протекторы срединных шипиковых нейронов трансгенных YAC128 мышей от гутамат-индуцированного апоптоза, показало, что эти агенты блокируют аномально большой депо-управляемый ток, наблюдаемый в клеточной модели БГ. Можно полагать, что мишенью для EVP служит белок TRPC1.

Анализ работ показал, что, несмотря на высокий уровень разработок, есть еще организационные моменты, мешающие развитию направления. Это в первую очередь организация клинических и доклинических испытаний и трудности при работе с модельными животными.

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ГЕНОМИКИ И ПРОТЕОМИКИ ЭУКАРИОТ**

*Обзор подготовил Николаев Евгений Николаевич*

**Геномика****«Крупномасштабное секвенирование экзонов как фундаментальный подход к поиску генетических причин полигенных заболеваний человека»**

*Руководитель: К.Г. Скрябин, РНЦ  
«Курчатовский институт»*

Проведено психофизиологическое тестирование членов семьи N из Орловской области, в трех поколениях которой прослеживается наследственная форма болезни Альцгеймера. Из восьми человек, прошедших собеседование, у троих были обнаружены признаки расстройства памяти, характерные для болезни Альцгеймера. Еще для двоих человек была обнаружена тенденция к ухудшению долговременной памяти, но пока эти расстройства не могут быть классифицированы как признаки болезни Альцгеймера.

Также за отчетный период коллективом получены результаты по тестированию методики селективного отбора экзонов из генома человека с последующим их секвенированием. В пилотных экспериментах были использованы 60 000 биотинилированных рибоолигонуклеотидов, комплементарных экзонам X-хромосомы человека. Синтез олигонуклеотидов и отбор экзонов проводили по методикам SureSelect компании Agilent. В результате таргетированного секвенирования экзонов восьми образцов ДНК, взятых от членов семьи N Орловской области, было получено не менее 23 млрд нуклеотидов. Анализ последовательностей показал, что во всех восьми образцах происходит существенное (не менее 850 раз) обогащение экзонами X-хромосомы, что приводит к тому, что как минимум 37–40 % всей генерированной в эксперименте генетической информации соответствует экзонам X-хромосомы.

Составлена электронная библиотека рибоолигонуклеотидов, для использования при селективном отборе экзонов 251 гена, вовлеченного в этиологию болезни Альцгеймера. Общая длина селективируемых последовательностей составила 2,43 млн нуклеотидов. Для каждого гена в библиотеку также вошли промоторные области и участки полиаденилирования.

Таким образом, впервые в мире предпринята попытка секвенирования генома членов семьи с наследственной формой болезни Альцгеймера. Проект № 09-04-12206-офи\_м.

**«Структурно-функциональный анализ двенадцатой хромосомы картофеля методами высокопроизводительной геномики»**

*Руководитель: Н.В. Равин, Центр  
«Биоинженерия» РАН*

Расшифровка геномов растений является основой как проведения фундаментальных исследований в области молекулярной биологии и генетики растений, так и создания новых элитных сортов сельскохозяйственных растений. Целью проекта являлось секвенирование 12-ой хромосомы картофеля, имеющей длину около 40 млн нуклеотидов, идентификация структурных генов и регуляторных элементов генома, в том числе поиск генов, определяющих устойчивость к фитопатогенам. Для решения поставленной задачи использован комплекс современных методов высокопроизводительной геномики — параллельного пиросеквенирования и технологий Solexa/Illumina. Важнейшим результатом работ за отчетный период является определение нуклеотидной последовательности около трети 12-ой хромосомы картофеля. В геномных последовательностях идентифицированы гены и предсказаны их функции, найдено три гомолога R-генов устойчивости. Полученные результаты внесут вклад в понимание структуры, функционирования и эволюции генома растений и создадут основу последующих работ в области генетики и селекции картофеля. Проект № 09-04-12275-офи\_м.

**«Исследование эволюционно-консервативной эпигенетической регуляции процессов раннего развития и герминогенного опухолеобразования — путь к терапии герминогенного рака»**

*Руководители: В.А. Гвоздев, Е.Д. Свердлов,  
ИМГ РАН и ИБХ РАН*

Проект был направлен на исследование роли эволюционно-консервативных ядерных

белков PIWI в обеспечении стабильности генома. Белок PIWI у дрозофилы и его ортологи (PIWIL1 и PIWIL2) у млекопитающих участвуют в репрессии транспозонов (подвижных генетических элементов), размножение и перемещение которых приводят к дестабилизации геномов. В результате исследования молекулярной природы новой мутации в гене *piwi* у дрозофилы впервые удалось отнести две главные функции белка PIWI к разным участкам молекулы белка: лишенный N-конца, белок не способен осуществлять репрессию мобильных элементов, поскольку не может войти в ядро. В то же время мутация не сказывается на другой важной функции PIWI, заключающейся в поддержании самообновления стволовых клеток, ответственных за образование герминальных тканей. Впервые показано, что ядерная локализация PIWI непосредственно связана с репрессией ретротранспозонов. Обнаружено, что при образовании герминогенных опухолей человека происходит резкое снижение уровня экспрессии генов *PIWIL1* и *PIWIL2*, что может указывать на их роль в опухолеобразовании и служить маркером образования опухолей. Если у дрозофилы транскрипционная репрессия транспозонов осуществляется благодаря модификации гистонов хроматина, то у млекопитающих дополнительная репрессия достигается метилированием ДНК. Впервые проведен анализ метилирования транспозона L1 в герминогенных опухолях. Обнаружено, что уровень метилирования регуляторной области транспозона L1 коррелирует с уровнем транскрипции генов *PIWIL1* и *PIWIL2*. Показано снижение метилирования L1 ДНК в опухолевой ткани. Разработан интегральный метод анализа уровня метилирования геномной ДНК тканей, на основе которого может быть создан прогностический диагностический тест состояния опухоли у пациента. Проект № 09-04-12101-офи\_м.

**«Структурно-функциональный анализ геномов растений: клонирование и изучение функций генов, контролирующей устойчивость к биотическим и абиотическим стрессовым факторам»**

*Руководитель: С.В. Шестаков, Институт общей генетики РАН*

В результате выполнения проекта у растения арабидопсис открыты новые гены, конт-

ролирующие устойчивость к гербицидам и охлаждению. Расшифрована молекулярная природа мутации, повышающей резистентность к гербициду ацифлуорфену за счет снижения уровня токсичных порфиринов. Исследована мутация, влияющая на экспрессию зависимых от абсцизовой кислоты генов, участвующих в адаптации к холодному стрессу. С помощью инсерционного мутагенеза идентифицирован и клонирован ранее не изученный 5-экзонный ген ICE2, суперэкспрессия которого повышает холодоустойчивость. Впервые у растений выявлена последовательность (в 3-м домене гена ICE2), кодирующая кателицидин-подобный пептид, сходный с антимикробным пептидом млекопитающих. Гомогенаты из трансгенных растений с суперэкспрессией этого гена обладают антимикробной активностью. Осуществлен сайт-направленный мутагенез различных доменов гена, проводится работа по созданию генно-инженерного бактериального штамма-продуцента растительного кателицидина (в целях последующего патентования). Проект № 09-04-12216-офи\_м.

**«Метагеномный анализ сообщества микроорганизмов, ассоциированных с пресноводной диатомовой водорослью *Synedra acus*»**

*Руководитель: М.А. Грачев, ЛИН СО РАН*

Наряду с глобальной экологической значимостью, диатомовые водоросли имеют большой потенциал применения в биотехнологии как источники биологически активных веществ и объектов генной инженерии, чем и определяется актуальность проекта. В природе диатомеи сосуществуют с прокариотическими микроорганизмами. В проекте для анализа альго-бактериального сообщества впервые в мире применен метагеномный анализ с использованием высокопроцессивной платформы секвенирования, позволяющий охарактеризовать сообщество в целом, а не только его культивируемую часть. В качестве объекта исследований выбрано микробное сообщество, ассоциированное с диатомовой водорослью *Synedra acus*, доминирующей в озере Байкал и в отдельные годы составляющей основу весеннего фитопланктона, а также успешно культивируемой участниками проекта в крупном масштабе. В 2009 г. микроско-

пическими и микробиологическими методами охарактеризованы микроорганизмы, сопутствующие *S. acis* при ее культивировании, и определено их влияние на рост водоросли. Методом параллельного пиросеквенирования на геномном анализаторе FS FLX определены нуклеотидные последовательности метагенома альго-бактериального сообщества (около 820 млн п.о.), охарактеризована его таксономическая структура и выявлены фрагменты генов ферментов, деградирующих растительные полисахариды. Результаты метагеномного анализа имеют фундаментальное и прикладное значение не только для выяснения взаимосвязей в сложном про-эукариотическом сообществе и создания новых моделей экологического мониторинга, но и в биотехнологии для получения продуцентов БАВ в фотобиореакторах и поиска новых ферментов. Проект № 09-04-12231-офи\_м.

**«Полногеномный анализ эпигенетического статуса плюрипотентных и генетически репрограммированных клеток человека»**

*Руководитель: М.А. Лагарькова,  
ИОГен РАН*

В проведенном исследовании в рамках проекта из эндотелиальных клеток пупочной вены человека (HUVES) с помощью генетического репрограммирования были впервые получены клетки с индуцированной плюрипотентностью (iPSC). Показано, что морфологически, молекулярно и функционально полученные клетки идентичны эмбриональным стволовым клетками человека. Было впервые продемонстрировано, что при репрограммировании в клетках человека с индуцированной плюрипотентностью происходит существенное изменение состояния хроматина X-хромосомы, инактивированной в женских клетках эндотелия, в сторону ее активации, что свидетельствует о репрограммировании клеток эндотелия и на эпигенетическом уровне. С помощью гибридизации чипа Illumina, содержащего 27000 CpG из 14000 генов человека, был проведен сравнительный анализ метилирования ДНК промоторных районов генов в iPSC, ЭСК и HUVES. Показано, что ДНК плюрипотентных клеток более метилирована, чем ДНК соматических клеток. Проект № 09-04-12231-офи\_м.

**«Анализ геномного распределения вариантов форм гистонов и коммуникаторных белков, поддерживающих взаимодействия между удаленными регуляторными элементами генома»**

*Руководитель: П.Г. Георгиев, ИБГ РАН*

У дрозофилы на данный момент описаны всего три ДНК-связывающих компонента инсуляторных комплексов с «цинковыми пальцами C2H2 типа», два из которых, dCTCF и Su(Hw), взаимодействуют с ВТВ-содержащим белком CP190. Общеизвестной является точка зрения, согласно которой CP190 — ключевой белок, определяющий способность инсуляторов поддерживать дистанционные взаимодействия. В ходе выполнения проекта было впервые показано, что третий инсуляторный белок, Zw5, также взаимодействует с CP190. Впервые были картированы домены в CP190 и инсуляторных белках, отвечающих за данное взаимодействие. И наконец, было найдено 9 новых белков с «цинковыми пальцами C2H2 типа», эффективно взаимодействующих *in vivo* и *in vitro* с CP190. Впервые в мире исследована структура транскрипционного фактора дрозофилы, являющегося гомологом единственного хорошо изученного инсуляторного белка позвоночных CTCF. Показано, что на N-конце белка dCTCF находится домен, способный к мультимеризации. В то же время C-конец белка способен формировать тетрамеры и взаимодействовать с CP190. Наконец, с участком 6-11 «цинковых пальцев» взаимодействует белок E(y)2, необходимый для реализации барьерной активности (способность служить границей между активным и репрессивным хроматином) dCTCF-зависимых инсуляторов.

Высококонсервативный белок E(y)2 входит в состав функционально гомологичных комплексов дрожжей, дрозофилы и человека, участвующих в регуляции процессов транскрипции, процессинга и транспорта мРНК. В ходе выполнения проекта было продемонстрировано, что E(y)2 взаимодействует в дрожжевой двугибридной системе с 22 из 62 протестированных белков, содержащих домен «цинковые пальцы C2H2 типа».

Полученные результаты дают основание предположить, что E(y)2 является рекрутером важных регуляторных белковых комплексов на ДНК за счет своей способности взаимодействовать с цинковыми пальцами многих ДНК-связывающих транскрипционных факторов. Проект № 09-04-12033-офи\_м.

**«Полногеномный анализ форум-доменов — единиц координированного сайленсинга или активации генов эукариот — в геномах дрозофилы и человека»**

*Руководитель: Н.А. Чуриков, ИМБ РАН*

Проведено полногеномное картирование форум-доменов в геноме дрозофилы на полногеномных микроэреях и на политенных хромосомах дрозофилы (FISH).

Проведено изучение концевых областей форум-доменов с помощью репортерных генетических конструкций и обнаружены дистантно действующие полярные и неполярные сайленсеры и активаторы транскрипции.

Получены сиквенсы более 12 тыс. амплифицированных концевых фрагментов форум-доменов с помощью глубокого секвенирования.

Проведены эксперименты по 3C (chromatin conformation capture), свидетельствующие о том, что концевые области доменов образуют хроматиновые петли большой длины и взаимодействуют с промоторами генов.

Впервые получены данные, которые свидетельствуют о том, что хрупкие места в хромосомах эукариот расположены в районах интеркалярного гетерохроматина и часто соответствуют определенному набору мобильных элементов в нем.

Впервые обнаружено, что концевые области форум-доменов способны образовывать хроматиновые петли большой длины, взаимодействуя с удаленными промоторами внутри доменов.

Обнаружен новый тип дистантной регуляции экспрессии генов эукариот — регуляция с помощью островков интеркалярного гетерохроматина.

Эти данные важны для понимания принципов организации хромосом эукариот, а также для прикладных исследований в биоинженерии и генотерапии. Проект № 09-04-12059-офи\_м.

**«Роль мобильных генетических элементов в формировании архитектуры хроматина»**

*Руководитель: Ю.В. Ильин, Институт молекулярной биологии им. В.А. Энгельгардта РАН*

При исследовании эпигенетических механизмов, влияющих на структуру хроматина и функционирование генома, весьма перспективным является изучение роли мобильных

генетических элементов в этих процессах. В рамках проекта было проведено исследование гетерохроматических скоплений мобильных элементов в геноме линии Г32 и выявлен ряд закономерностей, характеризующих перестройки, затрагивающие мобильные элементы, попавшие в гетерохроматин. Практически все исследуемые копии потеряли свою целостность и представлены несколькими фрагментами, разделенными небольшими участками ДНК. Такого рода рекомбинация напоминает рекомбинацию в генах иммуноглобулинов позвоночных, что дает повод говорить о наличии у дрозофилы своеобразного «иммунитета» против мобильных элементов и эндогенных ретровирусов.

Особый интерес представляют две последовательности, содержащие инвертированные повторы, представленные разнонаправленными фрагментами мобильных элементов. Присутствие таких инвертированных кластеров как в геноме линии Г32, так и в геноме, представленном в базе данных Flybase, говорит об их консервативности, что является свидетельством в пользу важности выполняемых ими функций. Дальнейшие исследования, посвященные молекулярным механизмам, вызывающим перестройки мобильных элементов, в том числе образование инвертированных кластеров мобильных элементов, а также изучение участия роли мобильных элементов в формировании структуры хроматина, представляет значительный интерес. Для поиска фрагментированных сильно перестроенных мобильных элементов в базе данных в рамках проекта разработана собственная методика. Проект № 09-04-12172-офи\_м.

**«Разработка геннотерапевтических препаратов и создание прогностических маркеров для терапии рака мочевого пузыря и герминогенных опухолей»**

*Руководитель: А.А. Буздин, ИБХ РАН*

В результате выполнения проекта были созданы генно-терапевтические противораковые конструкции, включающие созданную нами искусственную промоторную последовательность mNUS и поставленные под ее контроль гены цитозиндезаминазы и транспозазы ДНК-транспозона Sleeping Beauty. В экспериментах

in vitro показано, что вышеуказанные конструкции обладают высокой цитотоксичностью для клеток герминального рака яичка, но безопасны для остальных клеточных типов. Ген транспозазы позволяет включать цитотоксические кассеты непосредственно в геном целевых клеток, что повышает цитотоксический эффект.

При помощи разработанного нами метода селективной амплификации гипометилированных фланков геномных повторов (GREM) был впервые получен полногеномный «портрет» гипометилированных локусов нормальной и раковой ткани мочевого пузыря. Используемый для этого метод GREM может применяться для быстрого и недорогого типирования гипометилированных геномных сайтов в любой интересующей ткани человека или, с некоторыми модификациями, и других высших эукариот.

Впервые был зафиксирован ~ девятикратно или более повышенный уровень транскрипции гена *PIWIL1* в около 40 % образцов рака мочевого пузыря (n=34), по сравнению с нормальной тканью. Наблюдаемый аномальный уровень содержания транскриптов является высоким и превышает концентрацию транскриптов маркерного гена бета-актина. Это дает основания считать *PIWIL1* перспективным геном на роль онкомаркера рака мочевого пузыря.

Была создана наиболее полная на сегодняшний день база данных генов, вовлеченных в развитие или подавление прогрессии рака мочевого пузыря (РМП), а также геномных локусов, изменения в которых коррелируют с теми или иными особенностями протекания РМП.

В результате анализа транскриптомов нормальных и раковых тканей яичка, случайно было открыто новое высокоактивное семейство мобильных элементов, специфичное для генома человека. Семейство было образовано абберрантно сплайсированным 1-м экзоном функционального гена *MAST2* и 3'-концевой частью ретротранспозона SVA. Экзон гена содержит фрагмент CpG-островка, что способствовало транскрипционной активации элементов (названы нами CpG-SVA) в герминальных тканях. Геном человека содержит как минимум 82 вставки элементов CpG-SVA. Проект № 09-04-12302-офи\_м.

#### «Семейство генов CYP74 *Zea mays*: структура, экспрессия, роль в липоксигеназном сигнальном каскаде»

Руководитель: А.Н. Гречкин, КИББ КазНЦ РАН

Впервые осуществлено клонирование генов алленоксидсинтазы (AC210800.4\_FGP005) и гидропероксидлиаза (NM\_001111785) *Zea mays*.

Полученные рекомбинантные алленоксидсинтаза и гидропероксидлиаза проявляют высокую активность и некоторые уникальные каталитические свойства, контролируя превращения 13- и 9-гидроперекисей жирных кислот с образованием короткоживущих окиси аллена и полуацетала (соответственно), а также ряда физиологически активных оксипинонов, включая сигнальные медиаторы и антибактериальные соединения.

На основе экспериментальных данных и компьютерного моделирования впервые построена трехмерная модель фермент-субстратного взаимодействия для липоксигеназы-3 кукурузы (*ZmLOX3*). На основе модели с помощью сайт-направленного мутагенеза произведена точечная замена Ala562Gly, которая изменяет региоспецифичность действия фермента при диоксигенировании линолевой и  $\alpha$ -линоленовой кислот с конфигурации (9S) на (13R). Полученные результаты открывают новые возможности для целенаправленного изменения каталитических свойств ферментов методами генной инженерии. Проект № 09-04-12222-офи\_м.

#### «Исследование транскриптомов разных тканей и органов марты *Opisthorchis felineus*»

Руководитель: Н.А. Колчанов, Институт цитологии и генетики СО РАН (ИЦиГ СО РАН)

Впервые в мире проведен детальный гистологический анализ тканей и органов взрослой жизненной формы (марты) паразитической трематоды *Opisthorchis felineus* (тип Плоские черви) с применением высокоразрешающих современных микроскопических, включая флуоресцентные и лазерные сканирующие, методов. Классический гистологический анализ март *O. felineus* включал стандартные процедуры приготовления парафиновых срезов, их гистохимической окраски и исследования препаратов с помощью светлопольной микроскопии

на микроскопе Axioskop 40 и Axioskop 2 Plus (ZEISS, ФРГ).

В результате получено много высококачественных микроскопических изображений взрослых особей *O. felineus* и их отдельных частей, органов и тканей для создания атласа, посвященного описанию структурно-морфологической организации этого паразита. Кроме этого, с помощью приготовления нефиксированных криосрезов аналогичных образцов проведено выявление липидов и углеводсодержащих веществ в тканях и органах мартиты *O. felineus*. Были применены также новые методики исследования трехмерных характеристик объекта с помощью лазерного сканирующего микроскопа LSM510META (ZEISS, ФРГ) и самых новейших устройств оцифрованного ввода данных и обработки изображений. Впервые в мире исследована структурно-функциональная организация набора из 7 хромосом паразитической трематоды *Opisthorchis felineus* (тип Плоские черви). В частности, описано распределение диспергированных повторов, теломерных повторов, определена локализация кластеров генов рибосомальных РНК. Впервые получены хромосомо-специфические зонды для идентификации и исследования тонкой организации хромосом с помощью флуоресцентной *in situ* гибридизации на хромосомах (FISH). Проект № 09-04-12209 -офи\_м.

## Протеомика

### «Фундаментальные подходы для оценки размера протеома человека»

Руководитель: А.И. Арчаков, ИБМХ РАМН.

Основной задачей протеомики является проведение инвентаризации белков и характеристика белков, которые экспрессируются в клетке. В рамках решения данной фундаментальной проблемы важным является определение максимального числа белков (размера протеома), которые присутствуют в плазме крови и в тканях человека.

В ходе выполнения проекта было определено количество белковых молекул (с учетом посттрансляционно модифицированных форм), которые экспрессируются в несинхронизированной

клеточной линии гепатоцеллюлярной карциномы (HepG2). Для этой задачи проводили исследование протеома и полногеномный транскриптомный анализ клеток HepG2. Согласно полученным данным, 10 865 генов экспрессировались в стандартных условиях культивирования клеточной линии. Среди них 179 являлись кодируемыми регионами 18-ой хромосомы.

Протеомные эксперименты проводили с использованием трехмерной хроматографии, совмещенной с тандемным масс-спектрометрическим анализом (3D LC-MS/MS). В ходе протеомного анализа клеточной линии гепатоцитов было идентифицировано более 4100 белков, из которых 91 относятся к 18-й хромосоме.

Описанные выше результаты позволили провести оценку количества разных видов белковых молекул, экспрессируемых в клеточной линии HepG2. Так, с учетом количества экспрессированных генов, равным 10 865, и количеством сплайс вариантов, увеличивающим количество первичных структур на  $10\ 865 \times 0.8 = 8\ 692$  (среднее число сплайс вариантов). Кроме того, 19 557 первичных структур белков могут быть посттрансляционно-модифицированы в 50-ти различных комбинациях, что дает нам приблизительную оценку размера протеома в 997 850 видов белковых молекул.

Таким образом, в результате выполнения проекта впервые была проведена экспериментальная оценка количества индивидуальных видов белков, присутствующих в печеночной клетке человека. Проект № 09-04-12127-офи\_м.

### «Геноцентричная база знаний по 18-й хромосоме человека: структурно-функциональное исследование протеома в связи с социально значимыми заболеваниями»

Руководитель: А.В. Лисица, ФГБУ «ИБМХ» РАМН

В ходе выполнения работы был проведен сравнительный анализ хромосом человека по 10 различным критериям, в числе которых количество белок-кодирующих генов, идентифицированных белков, данные о полиморфизмах, о связи белок-кодирующих генов с развитием заболеваний и степень изученности каждой хромосомы. Информацию для интегральной оценки получали из открытых ресурсов ProteinAtlas, PRIDE, UniProtKB, GeneCards и PubMed.

Универсального критерия, согласно которому одна из хромосом является более важной в медицинском плане или более изученной, выявить не удалось. По степени связанности с заболеваниями и изученности все хромосомы человека находятся примерно на одном уровне. Нормировка на число белок-кодирующих генов позволяет определить наиболее короткую хромосому, обладающую максимальной медицинской значимостью – хромосому № 18. Практически 25 % экспрессируемых белков этой хромосомы связано, по данным ресурса GeneCards, с заболеваниями, в числе которых эритропоэтическая протопорфирия, геморрагическая телеангиоэктазия, болезнь Ниммена-Пика, синдром Пита-Хопкинса, тетрасомия и моносомия по 18-й хромосоме. Проект № 09-04-12175-офи\_м.

**«Структурно-функциональная характеристика пептидома крови человека в норме и при патологии»**

*Руководитель: В.Т. Иванов, ИБХ РАН*

Авторами разработан метод десорбции пептидов с основных белков крови для их последующего анализа времяпролетной МАЛДИ масс-спектрометрией и тандемной масс-спектрометрией с ионизацией электро-распылением, сопряженной с высокоэффективной жидкостной хроматографией. Разработанный метод отличается от аналогичных методов, описанных в мировой литературе, простотой, экономичностью, эффективностью и воспроизводимостью. Этот метод десорбции позволяет на порядок увеличить количество пептидов сыворотки крови, доступных для анализа масс-спектрометрическими методами, что, в свою очередь, увеличивает вероятность выявления и идентификации пептидных биомаркеров социально значимых заболеваний человека. Проект № 09-04-12085-офи\_м.

**«Протеомика и метаболомика хрусталика в процессе катарактогенеза»**

*Руководитель: Р.З. Сагдеев, МТЦ СО РАН*

Разработаны методы выделения белковых фракций хрусталиков крыс, а также анализа этих фракций с использованием методов двумерного электрофореза и масс-спектрометрии. Полу-

чены протеомные карты для хрусталиков крыс линий OXYS (быстро развивающаяся катаракта) и WISTAR (контроль) в зависимости от возраста и степени развития катаракты. Результаты исследований могут способствовать выявлению факторов, влияющих на развитие катаракты. Проведен анализ содержания кинуренина — природного ультрафиолетового фильтра хрусталика — и его метаболитического предшественника триптофана в хрусталиках крыс различного возраста и на разных стадиях катарактогенеза. Проект № 09-04-12135-офи\_м.

**«Сверхчувствительный иммуно-ПЦР тест для ранней сывороточной диагностики рака толстой кишки»**

*Руководитель: С.Ф. Берестень, Учреждение Российской академии наук Институт молекулярной биологии им. В.А. Энгельгардта РАН*

Основные результаты, полученные в ходе выполнения проекта:

1. Разработка нового метода биоинформатического поиска сывороточных маркеров опухолей.
2. Получение высоко-аффинных антител к идентифицированному сывороточному маркеру опухолей толстой кишки (альфа-дефензину б) с использованием усовершенствованного протокола очистки (средняя аффинность антител превышает коммерческие аналоги в десятки раз).
3. Синтез ДНК-репортера с беспрецедентной эффективностью амплификации и его конъюгация к антителам с использованием новой химико-ферментативной технологии.
4. Определение эффективности диагностики опухолей толстой кишки с использованием разработанного сывороточного теста.

*Сравнение с мировым уровнем:*

Ожидается, что чувствительность теста превысит чувствительность имеющихся аналогов в десятки раз. Это откроет широкую область применения теста для анализа биологических образцов в протеомике эукариот, иммунологии и медицинской диагностике социально значимых заболеваний.

По результатам проекта планируется подача патентной заявки РФ «Сверхчувствительный иммуно-ПЦР тест» (правообладатель — ИМБ РАН). Проект № 09-04-12184.

**«Разработка фундаментальных основ детекции единичных молекул белка с помощью АСМ и нанопроводных молекулярных детекторов»**

*Руководитель: Ю.Д. Иванов, ИБМХ РАН*

Основной проблемой протеомики является отсутствие в настоящее время методов регистрации низкокопийных белков (при концентрации  $C < 10^{-15}$  М) в биологическом материале. Это связано с тем, что в протеомике отсутствуют методы размножения белков, подобных методу ПЦР в геномике. Это приводит к тому, что традиционные протеомные методы на основе электрофоретических или хроматографических методов в сочетании с масс-спектрометрией, используемые в настоящее время, не позволяют регистрировать белки при концентрациях ниже  $10^{-12}$ – $10^{-14}$  М. В ходе проекта были разработаны фундаментальные принципы регистрации низкокопийных белков. Было показано, что проблема может быть решена за счет использования технологии необратимого фишинга, скомбинированного с молекулярным детекторованием. Она включает две стадии: 1) необратимый «фишинг» (вылавливание) низко- и ультранизкокопийных белков из объема аналита на маленькую поверхность АСМ-чипа и 2) визуализация и подсчет выловленных белков. Расчеты показали, что использование необратимого фишинга позволяет сконцентрировать молекулы белка в приповерхностном слое АСМ-чипа в  $10^6$ – $10^8$  раз в зависимости от экспериментальных условий фишинга. На второй стадии с помощью АСМ удается подсчитать количество белковых молекул на площади АСМ-чипа. Впервые в мире был достигнут концентрационный предел детекции антигена вируса гепатита С (НСVcore Ag) уровня  $10^{-16}$  М на базе такого подхода, что на 2–4 порядка ниже существующих концентрационных пределов обнаружения протеомными методами. Кроме того, в качестве молекулярного детектора впервые в России был применен отечественный нанопроводный детектор с электрической регистрацией белковых молекул.

Достигнутые в проекте результаты послужат теоретико-практической базой для развития протеомики и медицинской диагностики. Внедрение новых принципов регистрации единичных белков позволит создать высокочувствительные молекулярные детекторы для

регистрации низкокопийных белков в протеоме человека. Проект № 09-04-12113-офи\_м.

**«Нуклеопротеиновые конъюгаты для повышения эффективности протеомного анализа»**

*Руководитель: В.М. Говорун*

Применение антител и их аналогов для аффинного обогащения низкокопийных протеинов ограничено величиной констант диссоциации иммунных комплексов. Проект был посвящен исследованию перспективности повышения чувствительности выявления биомаркеров с помощью искусственных антител нуклеотидной природы, способных к образованию с ними ковалентных связей.

Введение в состав ДНК активных заместителей, необходимых для получения высокоспецифических конъюгатов биомаркеров, искажает параметры связывания. Данные, полученные в рамках проекта, впервые позволили выявить закономерности влияния ряда модификаций на конформацию G-квадруплексной ДНК.

В работе впервые экспериментально показано, что модификация аптамеров, даже не снижающая сродства с молекулой-мишенью, может привести и к утрате их селективности. Анализ активности новых аналогов ДНК-аптамера в плазме крови позволил отобрать перспективные, обладающие антикоагуляционными свойствами структуры (планируется патентная заявка).

Впервые сформулирована имеющая важное прикладное значение гипотеза о влиянии пространственной организации олигомеров, несущих фотоактивные заместители, на кинетику фотолиза.

Полученные результаты имеют важное междисциплинарное значение, они могут быть использованы для развития методов получения модифицированных фрагментов ДНК, структурных исследований белок-нуклеиновых взаимодействий, работ в области стереохимии супрамолекулярных комплексов, для направленного конструирования лекарств нуклеотидной природы, развития аналитических подходов с применением масс-спектрометрии, в области исследования фотоиндуцированных реакций биополимеров. Проект № 09-04-12133-офи\_м.

**«Развитие фундаментальных основ количественных масс-спектрометрических подходов к исследованию среднекопийных белков протеома человека»**

*Руководитель: И.А. Попов, ИНЭПХФ РАН*

Проведены исследования, направленные на развитие масс-спектрометрических методов количественного определения среднекопийных белков в жидкостях и тканях тела, основанных на использовании изотопного мечения пептидов, метода точной массовой метки, а также подхода множественного мониторинга реакций (ММР). Используются новейшие достижения в протеомике (методы разделения белков и пептидов), биохимии (синтез пептидов и изотопное мечение при гидролизе), масс-спектрометрии (новые методы высокоточного измерения масс, новые методы фрагментации биомолекул), биоинформатики (новые методы анализа масс-хроматограмм без использования нормировки по временам удержания). В результате выполнения проекта разработан метод скрининга протеомов с использованием баз данных точных массовых меток и времен хроматографического удержания. Разработан подход к анализу тканей и жидкостей человеческого тела, в т.ч. мочи, слезы, печени. Создана база данных точных массовых меток и времен хроматографического удержания для белков физиологических жидкостей и тканей человеческого тела. Выделены протеотипические пептиды в указанных базах данных. Создана расширенная база данных протеотипических пептидов по протеомам слезы и мочи человека. Разработана методика количественного относительного анализа содержания среднекопийных белков в тканях и физиологических жидкостях человека. Определены пределы чувствительности детектирования среднекопийных белков с протеотипическими пептидами, содержащимися в базе точных массовых меток. Проведен анализ возможностей метода ММР, в том числе при его использовании на гибридных масс-спектрометрах. Проект № 09-04-12130-офи\_м.

**«Разработка технологической платформы исследования протеома для обнаружения мочевых маркеров обмена натрия и его депонирования у здорового человека»**

*Руководитель: И.М. Ларина, ИМБП РАН*

Протеомными методами проведено изучение динамики изменения протеома мочи

в ходе 105-суточной изоляции здоровых добровольцев в гермообъекте. Всего собрано, подготовлено к анализу и исследовано 146 образцов. Выявлены показатели технической, индивидуальной вариабельности MS-пиков при прямом профилировании. Метод точных массовых меток и времени их хроматографического удержания позволил среди более чем 20 тыс. выявленных пептидов обнаружить 690 протеотипических и провести идентификацию около 600 белков мочи. В том числе выявлены белки-участники и потенциальные кандидаты обмена натрия в соединительной ткани. Факт депонирования натрия в неионной форме в организме обследуемых во время изоляции верифицирован балансовыми и химическими методами. С целью физиологической интерпретации протеомных данных и выявления механизма адаптации натриевого обмена организма человека к условиям жизнедеятельности в условиях изоляции, начато построение с помощью компьютерной системы ANDCell ассоциативной сети между белками, генами, низкомолекулярными соединениями. Проект № 09-04-12225-офи\_м.

**«Структурные и энергетические аспекты взаимодействия белков потенциал-зависимых ионных каналов человека с лигандами/блокаторами, перспективными для создания фармакологических препаратов направленного действия»**

*Руководитель: К.В. Шайтан, биологический факультет МГУ*

В результате работ по выполнению проекта впервые был разработан и успешно опробован флуоресцентный метод, позволивший подтвердить корректность предположения о тетрамерной структуре калиевых каналов, а также оценить уровень экспрессии и распределение корректно собранных каналов на поверхности живой клетки. Были подобраны условия для успешной экспрессии изолированных цитоплазматических доменов человеческого канала Kv10.2 и отработана методика их очистки для последующих работ по кристаллизации этих доменов. На том же классе каналов была отработана методика определения вероятной пространственной структуры человеческих калиевых каналов (семейств Kv2, Kv10 и Kv11) по гомологии с эукариотическим калиевым каналом семейства Shaker (Kv1.2), для которого в на-

стоящее время известна молекулярная структура. Методами динамического молекулярного моделирования были определены вероятные структуры комплексов вышперечисленных калиевых каналов человека с аджитоксином из яда скорпиона. Разработанные в проекте методы, сочетающие экспериментальные и теоретические подходы, направлены на установление структуры ионных каналов человека и выявление молекулярных механизмов связывания лигандов и блокаторов с белками ионных каналов в целях направленного создания медицинских препаратов нового поколения. Флуоресцентный метод определения корректности структуры калиевых эукариотических каналов является оригинальной разработкой авторов и может быть запатентован. Проект № 09-04-12146-офи\_м.

**«Протеомно-метаболическое картирование плазмы крови человека в норме и при раке легкого»**

*Руководитель: В.Е. Шевченко, НИИ канцерогенеза РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН*

В результате выполнения проекта создана, унифицирована и апробирована на образцах контрольной группы единая научно-техническая платформа протеомно-метаболического картирования плазмы крови человека методом ESI-MS/MS, LC-MALDI-MS/MS, которая не имеет аналогов в мире. Разработанная методика позволяет в одном образце идентифицировать 890 белков и 1950 метаболитов.

В ходе выполнения текущих задач проекта:

- Создан банк аннотированных проб плазмы крови, полученных от группы контроля (бо-

лее 100) и больных раком легкого I-IV стадии (более 100).

- Проведена пробоподготовка образцов плазмы крови для протеомного и метаболического исследований.
- Для протеомного исследования выполнено истощение образцов плазмы крови по мажорным белкам и фракционирование низкопредставленных белков.
- Полученные фракции сконцентрированы, денатурированы и подвержены трипсинолизу.

Для метаболического анализа плазма депротенинирована путем осаждения белковой фракции метанолом. Фракции, содержащие метаболиты, упарены и перерастворены в подкисленной органической фазе.

Сняты пробные масс-спектры. Проведена экспериментальная оценка эффективности и воспроизводимости протоколов анализа протеома и метаболома плазмы крови. Внесены в протокол необходимые изменения, улучшающие эффективность и воспроизводимость масс-спектрометрических данных.

Пептиды гидролизатов белков перед масс-спектрометрическим анализом разделены и количественно измерены методом LC-MS/MS и LC-MALDI-MS/MS.

Выполнено измерение масс метаболитов крови с высокой точностью, позволяющей однозначно поставить в соответствие измеренной массе идентификатор метаболита из базы данных (т.е. применить метод accurate mass-tag).

Получены согласно протоколу масс-спектры гидролизатов белков и метаболитов образцов плазмы крови контрольной группы. Проект № 09-04-12271-офи\_м.

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЕСУРСНОЙ БАЗЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО СЫРЬЯ (AU, AG, PT, CU, РЕДКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И МЕТАЛЛЫ)

Обзор подготовил Ярмолюк Владимир Викторович

Что бы ни сообщали средства массовой информации об экономических достижениях России, основу ее экономики определяют, прежде всего, ее природные ресурсы. Это прекрасно видно по тем проблемам, которые встают перед государством, когда цена на углеводороды и благородные металлы начинает снижаться. Очевидно, что недра нашей страны будут определять ее экономическое стабильное положение еще достаточно длительное время при условии, что страна будет располагать достаточными ресурсами экспортируемого сырья.

До распада СССР формированием ресурсной базы страны занималось Министерство геологии СССР, в задачи которого входило обеспечение страны запасами по всем видам полезных ископаемых минимум на 20 лет вперед. После распада СССР геологические работы были резко сокращены, поэтому за прошедшие 20 лет не было открыто ни одного крупного месторождения стратегического сырья. Численность геологической службы за эти годы сократилась в 20 раз, что сделало практически невозможным проводить соответствующие работы по тем схемам и методикам поиска и разведки, которые существовали в советское время. Страна жила за счет тех запасов, которые были созданы до начала 90-х годов. К настоящему времени они в значительной степени исчерпались и нуждаются в серьезном приросте. Если исходить из действовавших ранее схем, методов и подходов к прогнозированию, поискам и разведке, то эта задача является неподъемной для сохранившихся сил, средств и кадров Министерства природных ресурсов РФ. Поэтому совершенно очевидно, что возникла острая необходимость в создании современных фундаментальных основ формирования ресурсной базы страны. Таких основ, которые бы соответствовали реалиям нашего времени и учитывали новые методы изучения геологических процессов и новые научные концепции, объясняющие закономерности формирования и размещения месторождений полезных ископаемых. Эта необходимость стала причиной проведения исследований в

рамках конкурса «Фундаментальные основы формирования ресурсной базы стратегического сырья (Au, Ag, Pt, Cu, редкие элементы и металлы)». В рамках конкурса были поставлены две задачи, одна из которых была нацелена на совершенствование фундаментальных основ формирования ресурсной базы стратегического сырья (Au, Ag, Pt, Cu, редкие элементы и металлы) на основе современных достижений в изучении эндогенных и рудообразующих процессов и их связи с геодинамической эволюцией литосферы Земли, а вторая – на создание основ технологий извлечения и концентрирования тяжелых и редких металлов, в том числе, радиоактивных элементов на основе природных и синтетических микропористых материалов с гетерокаркасными структурами.

В конкурсе участвовало 46 заявок. Победителями стали участники 10 проектов, содержание которых в наибольшей степени соответствовало заявленным задачам. Подведены первые итоги работ по проектам. Получен ряд важных результатов, раскрывающих новые аспекты в проблеме теории рудообразования и развивающих теоретические основы формирования и геологических закономерностей размещения месторождений стратегического сырья. Здесь обозначим наиболее важные из них.

### Результаты, полученные в области развития фундаментальных основ металлогенического анализа на современных геодинамических концепциях

*Руководитель: академик Н.Л. Добрецов*

В рамках проекта впервые для территории Евразии дан анализ металлогении областей влияния крупных мантийных плюмов. Этот анализ опирался на результаты изучения Сибирской, Таримской, Эмейшаньской и Центрально-Европейской крупных магматических провинций (LIP), а также на данные теоретических исследований эволюции термохимичес-

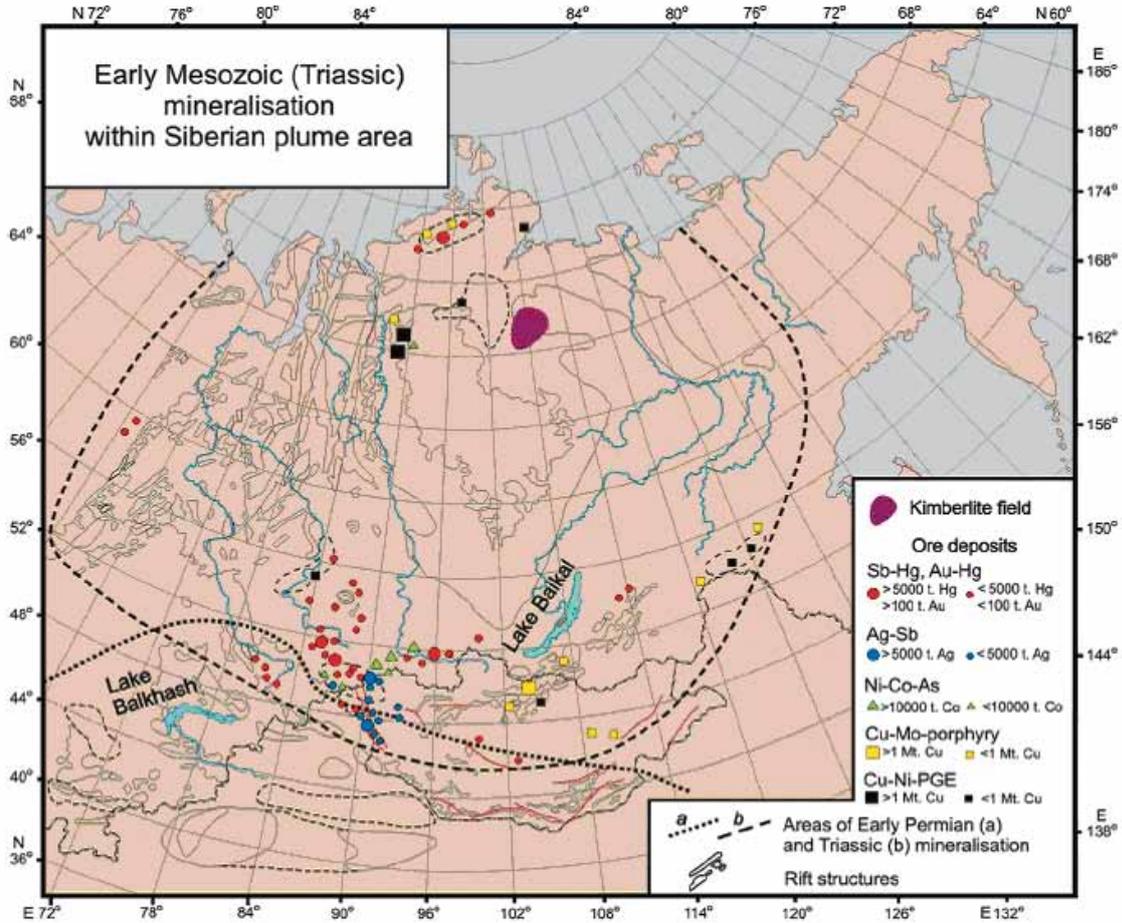


Рис. 1. Размещение рудных систем, связанных с Сибирским мантийным плюмом. Штриховкой показаны области влияния Сибирского и Таримского плюмов.

ких плюмов, отделяющихся от границы ядронижняя мантия (рис. 1, рис. 2).

Показано, что главными чертами, определяющими специфику металлогении ареалов LIP, являются:

- развитие своеобразного комплекса оруденения, включающего магматическое Cu-Ni-Pt и Fe-Pt; гидротермальное Ni-Co-As (+/- Ag, U, Au), Au-As, Ag-Sb, Au-Hg, Sb-Hg и стратиформное Cu (медистые песчаники и сланцы, обогащенные Co, Ni, Ag, Pt);
- ареально-очаговый характер размещения оруденения (в отличие от линейно-поясового для субдукционных, островодужных и рифтогенных обстановок);
- зональное распределение разных типов оруденения относительно центров LIP: преимущественная локализация Cu-Ni-Pt, Fe-Pt и стратиформного Cu в центральных их зонах, а гидротермального – в периферических частях LIP;
- высокая синхронизация формирования каждого из типов оруденения в ареалах крупных

магматических провинций, а также временная сопряженность Cu-Ni-Pt, Ni-Co-As и Au-As, локализованных в разных зонах LIP;

- корреляция разных типов оруденения с определенными этапами проявления базитового, щелочно-базитового и гранитоидного магматизма;
- единая последовательность формирования разных типов оруденения;
- зависимость масштабов развития оруденения от объемов LIP и мощности плюмов.

Выявленные в ходе выполнения проекта особенности эволюции рудно-магматических систем LIP послужили основой для разработки комплекса геологических, магматических, литологических и геохимических критериев прогноза и оценки перспектив выявления новых промышленных объектов в ареалах LIP на территории России. Предложенные подходы позволяют прогнозировать пропущенные промышленные типы оруденения в зоне влияния разновозрастных глубинных плюмов. В частности, обоснованы перспективы выявления

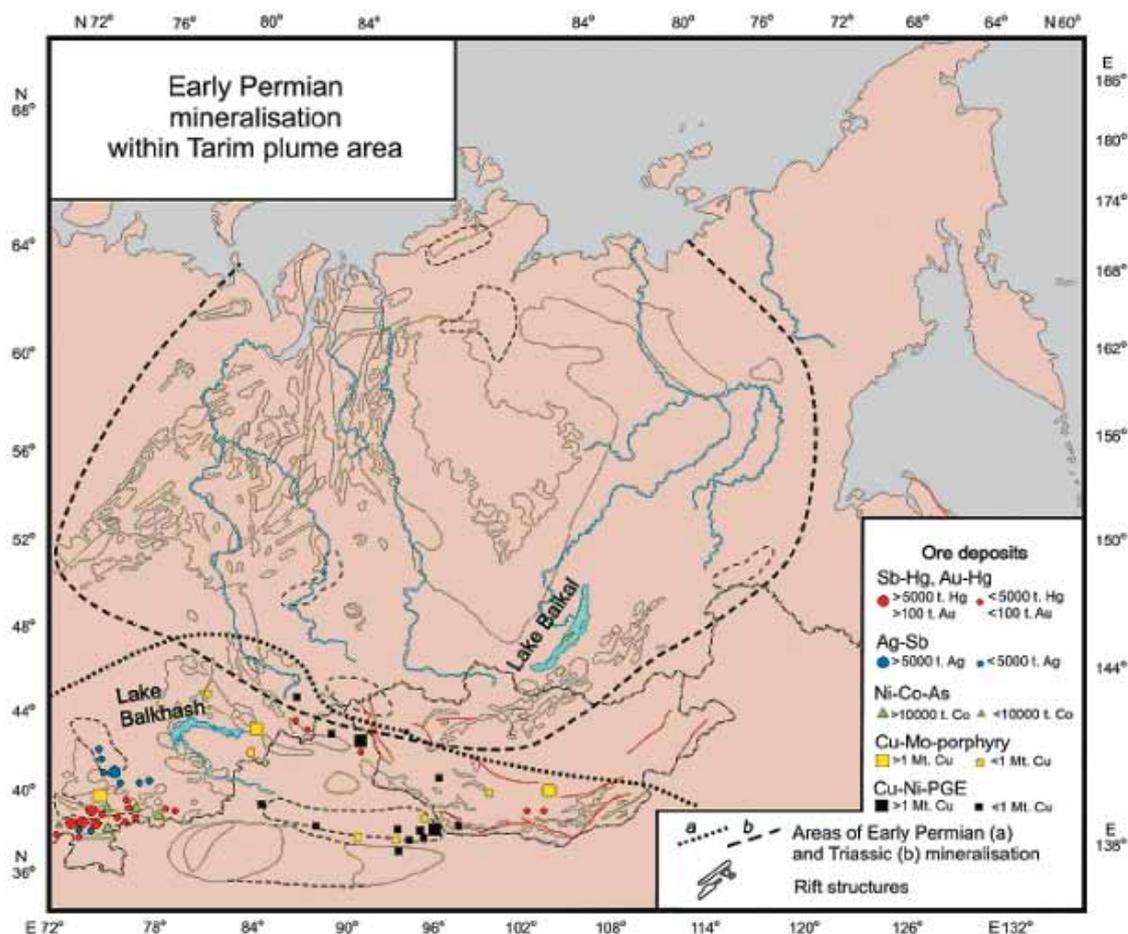


Рис. 2. Распределение рудных систем, связанных с Таримским мантийным плюмом.

промышленных объектов Au-As (золото-сульфидного) типа в некоторых районах в Колывань-Томской складчатой зоне, в Харальском районе в Восточной Туве и других. Проект № 09-05-12015-офи\_м.

#### Результаты, полученные в области фундаментальных основ создания моделей формирования конкретных уникальных месторождений стратегического сырья

*Руководители: академик Н.С. Бортников, академик В.И. Коваленко и академик А.И. Ханчук*

В проекте на основе комплексных исследований ряда крупнейших месторождений стратегического сырья получены следующие результаты:

- на основе комплекса современных геологических, геохронологических, изотопно-геохимических и термобарогеохимических исследований определены главные граничные условия для разработки геодинамических
- и петрологических моделей формирования уникальных месторождений: Ермаковского бериллиевого (Прибайкалье) и Халдзан-Бурегтейского комплексного Zr-Nb-TR (Монгольский Алтай). Получены данные о возрасте оруденения и ассоциирующих с ними магматических пород, получена информация об источниках магм и геодинамических обстановках их формирования и, наконец, изучены состав и состояние рудообразующих сред. Полученные данные уже сейчас позволяют обосновать выделение новых металлогенических эпох и провинций. Не вызывает сомнений, что дальнейшие исследования в этом направлении позволят вплотную приблизиться к созданию интегрированных моделей образования магматических редкометальных месторождений в складчатом обрамлении Сибирской платформы.
- для гидротермальных месторождений оценены главные физико-химические параметры формирования месторождений:

температуры, давления, солености, плотности. Для месторождений золота и серебра Верхоянского складчатого пояса разработаны предварительные модели формирования и оценены параметры минералообразования.

На примере месторождений золота Дарасунского рудного поля (рис. 3) выявлены три различных уровня глубинности формирования в составе однотипной флюидно-магматической рудообразующей системы. Под-

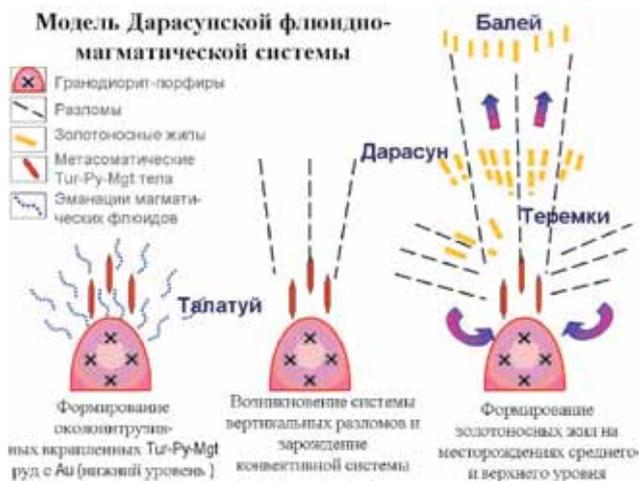


Рис. 3. Модель Дарасунской флюидно-магматической системы.

тверждено наличие магматического источника рудообразующего флюида и смешение его в рудообразующем процессе с метеорными водами. Полученные результаты являются основой для переоценки перспектив месторождений подобного типа.

Работы по проекту позволили обосновать новый тип нетрадиционного минерального сырья (Au, элементов платиновой группы (ЭПГ)) в графитизированных породах юга Дальнего Востока. Разработана методика экспрессного анализа высокоуглеродистых пород, благодаря которой оценены масштабы распространения повышенных концентраций Au и ЭПГ в породах комплекса. Изучены выделения самородного золота и ЭПГ, что позволило установить последовательность этапов в формировании благороднометалльных руд. Проведены экспериментальные работы по комплексному обогащению этих сложных рудных объектов. Проект № 09-05-12037-офи\_м, № 09-05-12060-офи\_м.

### Результаты, полученные в области изучения возраста и источников рудных компонентов рудоносных магматических и метаморфических комплексов

Руководители: член-корреспондент РАН В.А. Глебовицкий, академик Ф.П. Митрованов

Прогнозирование месторождений и выявление металлогенических эпох и соответствующих им провинций в значительной степени связаны с определением времени проявления рудного процесса и оценкой состава источников оруденения. Это направление исследований было отражено практически во всех выполняемых проектах.

Работами по проекту была разработана методика U-Pb геохронологических исследований минералов группы колумбита-танталита и на примере крупного Вишняковского месторождения редкометалльных пегматитов продемонстрирована возможность использования танталита в качестве минерала-геохронометра. Эта методика открывает принципиально новые возможности для прямого изотопного датирования процессов формирования редкометалльных гранитоидов и пегматитов и соответственно для разработки геодинамических и петрологических моделей их формирования, которые являются необходимой основой для проведения прогнозно-оценочных работ на редкие металлы.

Этим же коллективом исследователей получены новые данные о возрасте целого ряда уникальных редкометалльных месторождений Восточной Сибири и, в том числе, проведены U-Pb геохронологические исследования реперных магматических ассоциаций, с которыми связаны Ингилийское и Томторское месторождения редких элементов. Установлено, что возраст магматических пород, вмещающих Ингилийское месторождение, составляет  $654 \pm 7$  млн лет. Для магматических пород Томторского месторождения получены оценки возраста  $689 \pm 5$  и  $643 \pm 16$  млн лет, а для рудных тел –  $394 \pm 7$  млн лет, что указывает на полихронность этого месторождения.

Работы проекта были нацелены на разработку изотопно-геохимических критериев потенциальной рудоносности интрузивов норильско-талнахского типа. В результате впервые показано:

- сходство начального изотопного состава Nd и Sr в породах, начального изотопного состава Hf в цирконе и начального изотопного состава Os в сульфидных рудах для промышленно-рудноносных и рудоносных интрузивов;
- контрастное отличие по данным параметрам для промышленно-рудноносных и слаборудоносных интрузивов;
- контрастное отличие изотопов Sr сульфидного и силикатного вещества для промышленно-рудноносных и рудоносных интрузивов;
- контрастное отличие изотопов S и Cu сульфидного вещества для промышленно-рудноносных интрузивов;
- изотопное отличие сульфидного вещества по изотопному составу S и Os для различно рудоносных интрузивов.

Это дало возможность уточнить известные и выявить дополнительные критерии, позволяющие оценить перспективы выявления рудоносных интрузивов. Проект № 09-05-12053-офи\_м, № 09-05-12028-офи\_м.

**Результаты, полученные в области изучения флюидного режима формирования рудоносных магматических и метаморфических комплексов и связанных с ними месторождений стратегического сырья**

*Руководитель: академик Ф.А. Летников, академик Л.Н. Козарко*

На основании детальных исследований состава породообразующих минералов и термодинамических расчетов на примере Черниговского комплекса охарактеризован окислительный потенциал графитсодержащих карбонатитов. При этом экстраполяция значений летучести кислорода, оцененных для Черниговского комплекса, в область мантийных давлений показала, что в подобных породах могут формироваться алмазы. Исходя из полученных данных, предложен новый критерий потенциальной алмазности карбонатитов, основанный на присутствии графита в этих породах.

Создан электронный банк флюидно-геохимических данных метаморфических пород в возрастном диапазоне от архея до позднего фанерозоя. Выполнены оценки ресурсного потенциала подземных соленых вод и рассолов Сибирской платформы.

Для территории Иркутской области установлена приуроченность литиевых рассолов в подсолевой формации. Оцененные ресурсы составляют более 50 тыс. т. металла. Показано, что большим потенциалом обладают дренажные воды кимберлитовых трубок. Проект № 09-05-12004-офи\_м, № 09-05-12026-офи\_м.

**Результаты, полученные в области разработки природных и синтетических микропористых материалов с гетерокаркасными структурами и их использования для извлечения и концентрирования тяжелых, редких и радиоактивных элементов**

*Руководитель: дхн Н.В. Чуканов*

Синтезированы новые матрицы для иммобилизации долгоживущих радионуклидов РЗЭ-актинидной фракции. Исследована емкость фаз со структурами пирохлора и мураита в отношении элементов отходов (лантаниды, Zr, актиниды); изготовлены образцы пирохлора с короткоживущим изотопом  $^{244}\text{Cm}$ ; начаты исследования по возможности изоляции изотопа Tc-99 в пирохлоровые матрицы. Радиус  $\text{Tc}^{4+}$  (0,65Å) находится между размерами  $\text{Ti}^{4+}$  (0,61) и  $\text{Zr}^{4+}$  (0,72 Å), что определяет его вхождение в титанатно-цирконатные пирохлоры. Получены данные по радиационной и коррозионной устойчивости пирохлора в зависимости от характера замещений в разных структурных позициях. На основании этого определены матрицы с высокими изоляционными свойствами в отношении актинидов. Самораспространяющимся высокотемпературным синтезом изготовлена пористая керамика – потенциальная матрица для трансмутации актинидов – и начато ее изучение (рис. 4).

Впервые получены количественные данные для процессов ионообмена в природных силикатах с гетерополиэдрическими каркасами: изучены кинетика (методом динамической калориметрии) и определены тепловые эффекты катионообменных реакций с водными растворами солей Cs, K, Sr, Cu для ситинакита, пенквилксита, зорита, терскита, гейдоннеита, кузьменкоита, цирфесита. Показано, что природно-аморфизованный терскит обладает способностью связывать и прочно удерживать Cs, U и Th. С помощью рентгеноструктурного анализа, в том числе методом Ритвельда,

а также электронной микроскопии, локального рентгеноспектрального анализа, ИК-спектроскопии (включая оригинальный метод полнопрофильного ИКС-анализа) детально исследованы структурные трансформации, сопровождающие процессы катионного обмена и термической дегидратации природных титано-, ниобо- и цирконосиликатов. Получены новые данные и выполнены обобщающие работы по кристаллохимии гетерокаркасных и квазикаркасных минералов групп ловозерита, эвдиалита, дельхайелита, родицита. Проект № 09-05-12001-офи\_м.

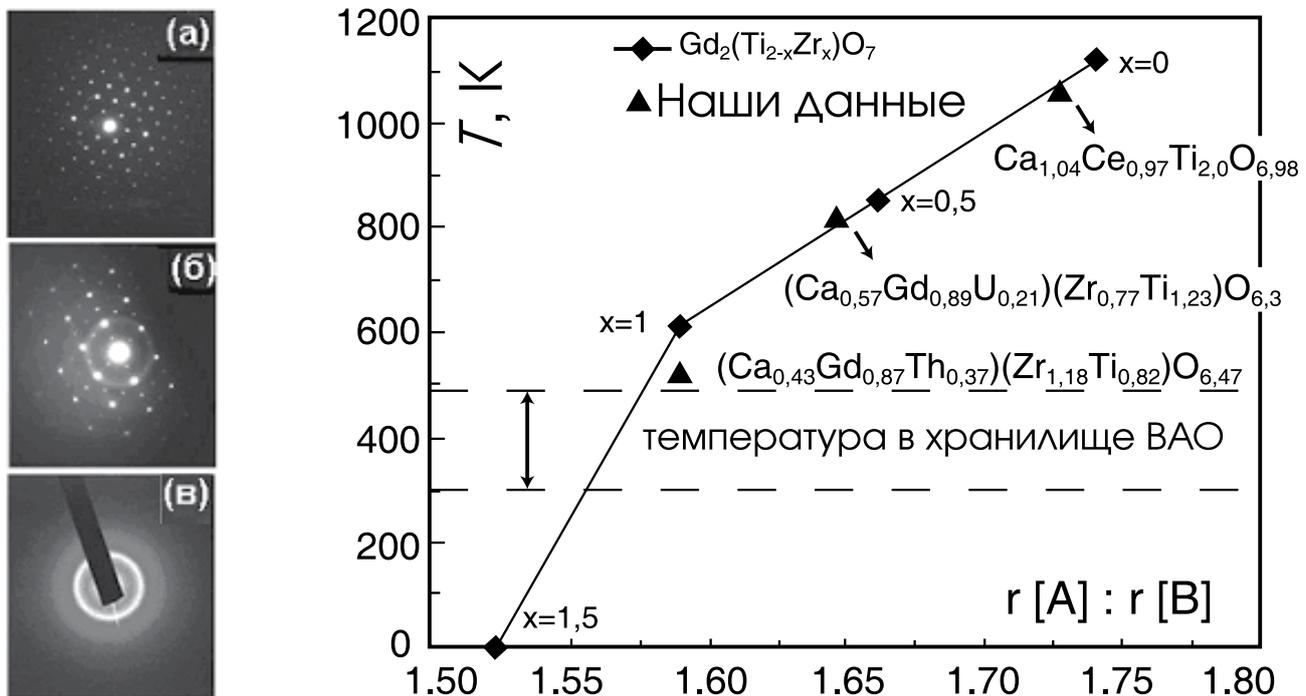
#### По результатам работ было отмечено:

1. Представленные результаты вносят важный вклад в развитие фундаментальных основ формирования ресурсной базы стратегического сырья. Эти результаты соответствуют современным достижениям в изучении рудообразующих процессов, источников рудного вещества, а также в исследовании механизмов формирования и закономерностей размещения рудных месторождений.

2. Результаты работ опубликованы или подготовлены к печати в большой серии статей и доложены на Российских и международных конференциях.

3. По результатам работ подготовить отчетную тематическую монографию «Фундаментальные основы формирования ресурсной базы стратегического сырья (Au, Ag, Pt, Cu, редкие элементы и металлы)».

4. Обратить внимание руководства Фонда на то, что предложенные сроки выполнения проектов (2 года) являются явно недостаточными для выполнения серьезной научной работы, тем более такого огромного масштаба, как разработка современных научных основ формирования ресурсной базы страны. Ведь эти исследования должны не только учесть мировой опыт, но и продемонстрировать его применимость к реалиям геологического строения нашей страны, в том числе к конкретным месторождениям, как традиционных, так и новых для России генетических типов. Такие задачи за два года не решаются.



**Рис. 4.** Слева: дифракция электронов для пирохлора  $Ca_{1,04}Ce_{0,97}Ti_2O_{6,98}$  до (а) и после (б, в) его облучения ионами  $Kr^+$  до получения дозы в 0,1 (б) и 0,2 смещений на атом (в)  $T=300K$ . Справа: зависимость температуры аморфизации ( $T$ , шкала Кельвина) от отношения радиусов ионов в разных структурных позициях пирохлора. Чем меньше величина  $T$ , тем устойчивее матрица к облучению. Показан вероятный интервал температур в подземном хранилище. Проект № 09-08-12000-офи\_м, руководитель Н.П. Лаверов.

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУПЕР-ЭВМ ПЕТАФЛОПНОГО КЛАССА ДЛЯ ДЕТАЛЬНОГО ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

*Обзор подготовил Владимир Борисович Бетелин*

Всего по направлению «Фундаментальные проблемы использования супер-ЭВМ петафлопного класса для детального предсказательного моделирования в научных и инженерных исследованиях» было выделено 20 грантов.

По проекту № 09-01-12022 «Методы решения многомерных фундаментальных и прикладных задач механики сплошной среды на суперкомпьютерах с гибридной архитектурой» (Институт математического моделирования РАН, руководитель проекта Б.Н. Четверушкин) докладывал ответственный исполнитель М.В. Якововский.

В рамках проекта разработаны новые численные методы и параллельные алгоритмы решения на суперкомпьютерах ряда актуальных задач аэродинамики, аэроакустики, радиационной газовой динамики, наноэлектроники и динамики заводнения нефтяных месторождений. Использование единых подходов обеспечивает возможность успешного применения создаваемых методик и программных комплексов для решения значительно более широкого круга задач, чем исследуется в проекте. Создание параллельных алгоритмов, основанных на применении неструктурированных и адаптивных сеток, открывает возможности существенного повышения эффективности использования вычислительной мощности суперкомпьютеров. Тем самым расширяется спектр их применения в самых различных областях, в том числе междисциплинарных.

Предложены и реализованы различные методы построения контрольных объемов на гибридных сетках. Разработана библиотека подпрограмм генерации ортогональных динамически адаптивных сеток, сгущающихся в областях высоких градиентов решения. Созданы параллельные версии алгоритмов и программ для вычислительных систем с общей памятью.

Разработано альтернативное ядро программной среды GIMM. Оно предназначено для моделирования с помощью суперкомпьютеров задач механики сплошной среды с учетом различных физических процессов. Новое ядро позволяет объединять такие разнородные приложения, как классические CFD-симуляторы, РГД-симуляторы, комплексы для решения за-

дач тепло- и массопереноса с учетом химических реакций, симуляторы электродинамических и квантовых транспортных процессов в твердых телах и вакууме.

Проведены модельные расчеты обтекания спускаемого космического аппарата в случае двух- и трехмерной геометрии на треугольных и тетраэдральных сетках. Результаты расчетов сравнивались с известными расчетными данными и показали отличие порядка 10 %.

Разработана, реализована и протестирована новая методика выполнения крупномасштабных расчетов задач гидродинамики и аэроакустики на суперкомпьютерах. Методика разработана в целях достижения высокой эффективности распараллеливания на большом числе процессоров (до нескольких тысяч). В основе методики лежит гибридная схема распараллеливания, использующая интерфейсы MPI и OpenMP. На основе реконструкции переменных с помощью квадратичных полиномов разработана схема третьего порядка точности для неструктурированных треугольных сеток.

Определена физическая конфигурация и сформулирована предварительная математическая модель для описания эмиссии с поверхности углеродных нанотрубок. Разработана и протестирована первая версия комплекса MICRO\_2D/3D для моделирования электронной эмиссии с поверхности наноструктур. Программный комплекс прошел предварительные испытания на системе СКИФ-ГРИД и показал высокую эффективность использования вычислительной мощности.

На основе кинетического подхода разработана новая модель течения жидкостей в пористых средах с учетом сжимаемости жидкостей, капиллярных и гравитационных сил. Для аппроксимации предложена трехслойная явная разностная схема с достаточно мягким условием устойчивости. Модель обобщена на случай течения двухфазных жидкостей. Разработан вычислительный алгоритм явного типа, поддающийся эффективной реализации на МВС гибридной архитектуры. Проведены тестовые расчеты задач о притоке жидкости к нефтедобывающим скважинам,

о просачивании загрязняющих веществ в почву и о заводнении нефтяного пласта при наличии пассивной примеси для различных конфигураций системы скважин.

По проекту № 09-01-12073 «Разработка математических моделей, параллельных алгоритмов и создание программного комплекса проектного предсказательного моделирования многофазных процессов в импульсных тепловых машинах на супер-ЭВМ петафлопного класса» (руководитель О.М. Белоцерковский) докладывал исполнитель П.С. Уткин.

В рамках выполнения проекта в течение 2009 г. авторами сформулированы математические модели для квазиодномерной, двумерной осесимметричной и трехмерной постановок для описания многофазных рабочих процессов в импульсных тепловых машинах. На основе анализа и уточнения отдельных известных моделей межфазного взаимодействия были учтены газоприход при горении дисперсной фазы, межфазное силовое и тепловое взаимодействие газовой и дисперсной фаз. Разработаны численные методы для решения задач внутренней баллистики в квазиодномерной и двумерной постановках, основанные на схеме расчета потоков методом типа Годунова, явной схеме интегрирования по времени и методе конечных объемов. Построены алгоритмы параллельных вычислений с ориентацией на использование супер-ЭВМ петафлопного класса. Авторами разработан новый, не имеющий аналогов, программный комплекс, позволяющий решать многомерные задачи внутренней баллистики. Авторы уделяют значительное внимание вопросам сравнения результатов вычислительных и натуральных экспериментов. В частности, результаты опытов с различным порядком воспламенения элементов метательного заряда получены с использованием системы микроволнового инициирования, не имеющей аналогов в мире и позволяющей размещать точку первоначального воспламенения произвольным образом в объеме заряда, что существенно расширяет базу для проведения натуральных экспериментов. Успех применения современных многопроцессорных систем во многом обусловлен примененным авторами иерархическим подходом к декомпозиции вычислительной задачи. Используются возможности вариантного счета при выполнении параметрических расчетов на широком поле начальных данных. Расчетный алгоритм распараллелен для использования на многопроцессорных ЭВМ с распределенной

памятью. Для распараллеливания используется динамический метод декомпозиции области с балансировкой нагрузки между процессорными ядрами в процессе вычислений, оказавшийся существенно эффективнее статического. В методе динамической балансировки перераспределение нагрузки происходило на основе анализа времен, которые затрачивались на расчет и обмен данными. Расчеты выполнены на СК МВС-100k Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН и СК СКИФ МГУ «Чебышев».

По проекту № 09-01-12089 «Разработка вычислительных методов и компьютерных программ для математического моделирования динамики взаимодействующих частиц на больших временных отрезках» выступал руководитель проекта – Г.Г. Еленин.

В рамках выполнения проекта в течение 2009 г. авторами предложен новый подход для определения возможности существования симметрично-симплектических методов, сохраняющих полную энергию. С помощью этого подхода проведен сравнительный анализ вычислительных методов и предложен новый двухстадийный симметрично-симплектический метод, сохраняющий полную энергию почти всюду. Создан блок «Постановка задачи» с дружественным интерфейсом для комплекса компьютерных программ «Динамика», предназначенных для широкого класса междисциплинарных исследований в рамках приближения классической молекулярной динамики. Результаты исследования консервативности симметрично-симплектических методов являются новыми. На их основе предложен оригинальный адаптивный симметрично-симплектический метод, сохраняющий полную энергию почти всюду. В ходе выполнения проекта подготовлено пять публикаций, в том числе две статьи в авторитетных рецензируемых профильных журналах и два препринта.

По проекту № 09-01-12097 «Создание комплекса математических методов, алгоритмов и программ для компьютеризации разработки лекарственных средств нового поколения» (руководитель В.А. Садовничий.) выступал исполнитель В.Б. Сулимов. В рамках выполнения проекта в течение 2009 г. авторами проведена разработка основных блоков комплекса и подтверждена реализуемость заявленной программы. Разработан ряд новых математических методов исследования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, регуляризации решения системы линейных алгебраических уравнений,

оптимального кодирования функций многих переменных. Созданные методы были применены для решения конкретных проблем, возникающих в области разработки новых лекарственных препаратов. Разработка новых ингибиторов для заданных белков-мишеней является начальной стадией разработки лекарств. Эффективность выполнения этой стадии во многом определяют не только продолжительность и затраты на всех последующих стадиях, но и саму возможность разработки нового лекарства. В настоящее время этап разработки новых ингибиторов занимает примерно 50 % от общей длительности разработки лекарства, и связано это с тем, что такие разработки ведутся в основном экспериментальным методом проб и ошибок. Применение методов молекулярного моделирования и суперкомпьютеров при разработке новых ингибиторов могут существенно сократить время и материальные затраты и, тем самым, повысить ее эффективность. Ключевой программой разработки ингибиторов является программа докинга, которая позволяет позиционировать молекулы-кандидаты в ингибиторы (лиганды) – в активном центре заданного белка-мишени и оценить энергию их связывания с белком. Чем больше энергия связывания, тем лучше ингибитор и тем эффективнее лекарство. Авторами подготовлен Интернет-ресурс, содержащий развернутое описание результатов валидации программы SOL, подтверждающий ее высокое качество по сравнению с лучшими известными в мире программами докинга и ее способность находить ингибиторы заданных белков-мишеней среди большого количества неактивных соединений. Новые принципы, заложенные в оригинальную программу докинга SOL, позволяют эффективно находить активные соединения среди большого количества неактивных соединений. В том числе, это обусловлено главным принципом: проводить докинг и расчет констант ингибирования максимально аккуратно без использования упрощений, которые делаются во многих зарубежных аналогах. Проигрыш во времени расчетов одного лиганда на одном процессоре, обусловленный этим подходом, с лихвой компенсируется применением многопроцессорных вычислений на суперкомпьютерах.

По проекту № 09-03-12323 «Методы и алгоритмы построения предсказательных детальных, редуцированных и глобальных физико-химических механизмов горения с помощью высокопроизводительных вычислительных систем» вы-

ступал с отчетом руководитель – М.А. Деминский.

В работе на этапе 2009 г. проведена разработка редуцированных механизмов химической кинетики и оценка их эффективности путем сравнения с расчетами, использующими детальные кинетические схемы. Работа выполнена на высоком уровне. По отчету сделано замечание руководителю о необходимости подготовки результатов к публикации.

По проекту № 09-05-12054 «Массивно-параллельные вычисления в задачах моделирования климатической системы» (руководитель В.П. Дымников) выступал исполнитель М.А. Толстых.

Работа посвящена решению фундаментальной проблемы создания и анализа пригодности моделей атмосферы или океана и численных методов их параллельной реализации на тысячах процессоров, что обуславливает междисциплинарный характер исследований и полученных результатов. В рамках выполнения проекта в течение 2009 г. авторами выявлены основные причины снижения эффективности параллельной реализации атмосферной компоненты модели климатической системы ИВМ РАН, предложен и реализован в программном комплексе полулагранжевой модели атмосферы новый оригинальный алгоритм восстановления горизонтальных компонент скорости ветра, проведена работа по модернизации алгоритма решения уравнений конечно-объемной модели общей циркуляции океана с целью эффективного применения двумерной декомпозиции расчетной области. Проведена серия численных экспериментов по тестированию вычислительных характеристик модели для расчетной области Мирового океана. Эксперименты показали удовлетворительную масштабируемость программного кода при расчете на 700 вычислительных ядрах. Решена задача эффективного ввода и вывода информации при больших объемах массивов. В ходе выполнения проекта подготовлено две публикации, в рамках которых показано параллельное ускорение глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды ПЛАВ на вычислительной системе SGI Altix 4700 при количестве процессоров до 480.

По проекту № 09-08-12131 «Трехмерное математическое моделирование на супер-ЭВМ тепло-гидродинамических процессов и циклической прочности элементов транспортных ядерных реакторов в режиме качания» (руководитель

Н.Н. Смирнов) выступал исполнитель М.Н. Загуменный.

В рамках выполнения проекта в течение 2009 г. авторами выполнены фундаментальные исследования, в результате которых создана и апробирована прогностическая модель для концептуального общего вида ядерной энергетической установки без привязки к конкретному объекту, которая учитывает колебательное движение объекта (поступательное и вращательное, вплоть до полного переворота установки). Результаты носят междисциплинарный характер, т.к. объединяют методы теплофизических исследований течений в сложных технических устройствах с подходами математического высокопроизводительного моделирования на супер-ЭВМ. Новизна работы заключается в численном исследовании сложных физических процессов, протекающих в ЯЭУ транспортного типа в условиях качания с большой амплитудой с помощью современных трехмерных расчетных программ, обеспечивающих возможность исследования индуцированных колебаний неоднородностей температуры, а также сопряженных задач циклической прочности в условиях неоднородного нагрева по пространству и времени.

По проекту № 09-01-12062 «Разработка иерархической модели описания процесса динамического разрушения металлов в режиме мгновенного объемного разогрева с целью включения в математические коды высокопроизводительных супер-ЭВМ» (руководитель В.Т. Пунин) выступал сам руководитель, а также исполнитель А.Я. Учаев.

В рамках проекта в 2009 г. разработаны математические программы для описания процессов динамического разрушения металлов при тепловом ударе. Разработаны уравнения состояния и кинетические соотношения для включения в коды параллельных вычислений.

По проекту № 09-08-12161 «Решение фундаментальных проблем эффективного использования высокопроизводительных вычислительных систем при молекулярно-динамическом моделировании в инженерных науках, физике, химии, биохимии и нанотехнологиях» (руководитель Г.Э. Норманн) выступал сам научный руководитель, а также присутствовавший исполнитель В.В. Стегайлов.

Работа направлена на развитие междисциплинарных методов атомистического моделирования (молекулярной динамики, функционала электронной плотности, многомасштабные

подходы) на супер-ЭВМ петафлопного класса. Рассматриваются применения к исследованию неравновесных процессов в конденсированных средах, включая наноструктуры, и их свойств:

- пластической деформации и разрушения, фазовых и структурных превращений в объеме материала и на поверхности, формирования и распада двойного электрического слоя в суперконденсаторах;
- кинетики неидеальной плазмы;
- электронные возбуждения в металлах и активных центрах молекул белков.

В рамках фундаментальных проблем эффективного использования для этих целей высокопроизводительных вычислительных систем с тысячами и десятками тысяч вычислительных ядер, создаются методы, алгоритмы и программные средства для:

- а) формирования атомно-молекулярных структур с числом частиц от тысяч до миллиардов;
- б) диагностики распределений напряжения и других свойств с пространственным и временным разрешением;
- в) развития многомасштабных подходов для сопряжения (1) молекулярно-динамические модели квантово-механического и классического уровня, (2) молекулярно-динамических моделей с методами сплошной среды;
- г) стандартов требований к расчету релаксации и равновесных свойств;
- д) определения оптимальных соотношений между количеством атомов в изучаемой системе и числом используемых ядер.

В процессе выполнения проекта было проведено молекулярно-динамическое моделирование задач о движении дислокаций в металлах при растяжении, задач о влиянии атомов примесных соединений и других нановключений на диффузию и дрейф дислокаций, что позволяет перейти к моделированию зарождения разрушений. Проведено исследование понижения коэффициента эффективности распараллеливания при подключении дополнительных процессоров. По докладу были высказаны пожелания о переходе на большие масштабы, которые могли бы позволить проведение прямого моделирования зарождения повреждений и разрушения.

По проекту № 09-01-12056 «Комплексные исследования и разработка моделей импульсных газодинамических устройств нового поколения с использованием супер-ЭВМ» (руководитель В.А. Левин) докладывал исполнитель А.Е. Луцкий.

Проведены расчеты течений в каналах в режимах переноса тока электронами и ионами. Исследованы особенности приэлектродных процессов и определены режимы оптимальной подачи плазмы через проницаемые электроды. Разработан вариант модели разрушения при приложении к предварительно нагруженному телу динамического воздействия. Модель учитывает наличие в теле конечных деформаций и их перераспределение при дополнительном внешнем воздействии на тело. Разработан первый вариант программы для современных высокопроизводительных вычислительных систем на основе GPU и Multi-GPU.

По проекту № 09-01-12110 «Воздействие ультракоротких сверхмощных лазерных импульсов на материалы: математическое моделирование, эксперимент» (руководитель В.И. Мажукин) выступал сам руководитель проекта.

Одним из важнейших аспектов проекта была проблема лазерной фемтосекундной абляции, являющейся одним из наиболее перспективных способов генерации наночастиц и наноструктур. Возможности экспериментальных исследований в данной области весьма ограничены, так как лазерная фемтосекундная абляция протекает в очень коротких временных и пространственных масштабах и основным инструментом исследований становятся методы математического моделирования. Постановка результативных вычислительных экспериментов связана с рассмотрением взаимообусловленных оптических, термодинамических и кинетических процессов, связанных с тепло- и массопереносом в областях очень высоких температур и давлений, при которых теплофизические и механические свойства вещества вообще неизвестны. На основе классических и квантово-механических подходов авторами проекта были предложены простые аналитические выражения для неравновесных термодинамических, теплофизических и кинетических характеристик фонного и вырожденного электронного Ферми-газа для произвольной температуры. На основе квантового кинетического уравнения был предложен подход к определению оптических характеристик металлов для произвольных частот и температур. Для моделирования лазерной фемтосекундной абляции была разработана математическая модель неравновесного гидродинамического варианта задачи Стефана, для численной реализации которой применялся конечно-разностный метод динамической адаптации, позволяющий произ-

водить расчеты с явным выделением межфазных границ и ударных волн. Выполненное моделирование позволило определить основные механизмы фемтосекундной абляции.

Вторым важным аспектом исследований была проблема распространения интенсивного лазерного излучения в прозрачной газовой среде или прозрачном диэлектрике. Моделирование осуществлялось на основе численного решения обобщенного нелинейного уравнения Шредингера (ОНУШ) с учетом дифракции, пространственно-временной фокусировки, дисперсии среды, мгновенного и запаздывающего нелинейного отклика среды, эффекта самоукручения, фотоионизации и лавинной ионизации. Типичная размерность задачи составляет  $3+1$ , т. е. три пространственные координаты и время. Пространственная сетка размером  $2^8 \cdot 2^8 \cdot 10000$  точек по осям  $x, y, z$  соответственно, и  $2^{11}$  точек по времени необходима для расчета распространения лазерного импульса в области пространственных размеров около  $0,5 \cdot 0,5 \cdot 55$  см и временного окна около 1,3 пс (которому соответствует спектральное окно около 1600 ТГц при числе точек по времени  $2^{11}$ ). Таким образом, полное число вычислительных точек пространственно-временной сетки составляет около  $2^{40}$ . Расчетная программа написана на языке C++, расчет произведен на суперкомпьютере СКИФ МГУ «Чебышев» пиковой производительности 60 Тфлоп/с с использованием 64 из 5 000 вычислительных ядер за промежуток времени около 7 ч.

По разработанной модели выполнено математическое моделирование аттосекундной динамики электронного туннелирования в поле мощных сверхкоротких лазерных импульсов. Моделирование показало, что процессы сверхбыстрого электронного туннелирования приводят к изменению временной и спектральной динамики сверхкоротких импульсов в ионизируемых лазерным полем средах.

С помощью математического моделирования выполнен анализ генерации аттосекундных импульсов рентгеновского излучения при облучении мощными сверхкороткими лазерными импульсами сверхтонких твердотельных пленок. Определены оптимальные режимы взаимодействия мощных сверхкоротких лазерных импульсов с нанопленками. Показано, что ключевым параметром, определяющим эффективность генерации аттосекундных импульсов рентгеновского излучения при взаимодействии мощных лазерных импульсов с нанопленками, является ускорение электронов.

По проекту № 09-01-12024 «Математическое, численное и экспериментальное моделирование процессов кристаллизации с использованием супер-ЭВМ петафлопного класса» (руководитель А.И. Аптекарев) выступал исполнитель Ю.Г. Рыков.

В рамках проекта предложен вариационный принцип определения средней плотности распределения собственных значений случайных матриц с ангармоническим потенциалом и внешним источником. Данная задача ляжет в основу одномерной статистической модели декристаллизации и анализа предельных траекторий броуновских мостов. Строго вычислена величина математического ожидания радиус-вектора и момента D-мерных водородоподобных состояний Ридберга (т.е. состояний, где электрон обладает большим гиперквантовым числом  $n$ ). Проведен сравнительный анализ двух моделей кристаллизации двухкомпонентных сплавов: системы фазового поля и модификации модели Кана-Хилларда с конвекцией в пористой среде. Для радиально-симметричной модели равноосной кристаллизации построено асимптотическое решение, описывающее в главном полосчатую (периодическую) структуру в зоне неустойчивости расплава, что качественно согласуется с экспериментом.

Разработана и численно реализована одномерная модель процесса кристаллизации на основе модифицированной модели Кана-Хилларда с конвекцией в пористой среде. Для одномерной модели с помощью численного эксперимента определен набор параметров, при которых не происходит потери гиперболичности в модели Био пористой среды и получаются физически осмысленные результаты.

Двумерный вариант модели реализован на многопроцессорном комплексе высокой производительности МВС-1000. Проведены предварительные расчеты для не очень больших временных промежутков.

В результате численных расчетов установлена структура зоны неустойчивости перед фронтом кристаллизации в случае инициирования этого процесса развитием неустойчивости по механизму спиноподобного распада. Оказалось, что продолжительное существование зоны неустойчивости становится возможным при образовании структур между фазами. Эти структуры затем поглощаются фронтом при наличии эффективной силы тяжести, которая является стабилизирующим фактором. Проведен асимптотический

анализ подобных структур в рамках концепции системы фазового поля.

При разработке вычислительной технологии моделирования процессов кристаллизации построены алгоритмы, допускающие эффективное распараллеливание. На данном этапе используется сеточный параллелизм, основанный на разбиении области на подобласти по числу процессорных узлов МВС-1000. Многопроцессорная система МВС-1000 состоит из 64 вычислительных 2-х процессорных узлов AMD Opteron (2,2 GHz) с памятью 2 Gb каждый.

По проекту № 09-01-12063 «Асимптотическое компьютерное моделирование сложных волновых процессов в сплошных средах» (руководитель В.П. Маслов) выступил исполнитель Д.С. Миненков. Было рассказано о моделировании свойств сред в окрестности критических состояний.

По проекту № 09-01-12096 «Разработка технологий моделирования динамических процессов в конденсированном веществе на различных масштабных уровнях с использованием супер-ЭВМ петафлопного класса» (руководитель А.М. Кривцов) выступал исполнитель В.А. Кузькин.

В рамках выполнения проекта осуществлена дальнейшая доработка метода динамики частиц и его применение для описания механических процессов в конденсированном веществе на различных масштабных уровнях: наноуровень (описание наномеханических систем методом молекулярной динамики), мезоуровень (деформирование и разрушение твердых тел с микроструктурой) и макроуровень (моделирование астрофизических процессов). Обсуждался выбор моделей частиц и законов их взаимодействия в зависимости от специфики решаемой задачи, разработана методика расчетов на многопроцессорных вычислительных системах. Сформулированы основные положения, позволяющие установить связь между микроскопическими параметрами моделирования и макроскопическими параметрами моделируемого объекта. Рассмотрено приложение данной методики к решению прикладных задач для нужд различных отраслей промышленности.

В качестве примера рассматривается приложение метода динамики частиц к моделированию процессов вибрационного сверления твердых горных пород и откольного разрушения при высокоскоростном ударном взаимодействии. Показано, что характеристики внутренней структуры существенно влияют на свойства материала

лов на макроуровне и должны учитываться при моделировании деформирования и разрушения материалов и конструкций.

По проекту № 09-02-12332 «Моделирование формирования и физических свойств одномерных полупроводниковых наноструктур с использованием супер-ЭВМ» (руководитель И.А. Куянов) выступал руководителем.

В рамках проекта развиты методы предсказательного моделирования полупроводниковых наноструктур с целью получения структур с заданными свойствами.

По проекту № 09-07-12020 «Развитие программно-аппаратного комплекса виртуальной реальности и визуализации результатов предсказательного моделирования в научных исследованиях» (руководитель Н.Н. Шабров) ввиду отсутствия представителей гранта сообщение по материалам, присланным руководителем гранта, сделал М.В. Яковлевский.

В рамках выполнения проекта в течение 2009 г. основное внимание уделено развитию и интеграции собственного специализированного программного обеспечения (in-house software), ориентированного на решение экстраординарных задач из области прорывных технологий. Разработаны компоненты программного обеспечения для интерактивной стерео визуализации в системе CAVE 3D результатов моделирования сложных процессов в механике систем деформируемых тел. Выполнена интеграция технологий 3D-сканирования поверхностей с последующей реконструкцией объемов тел, выполнением моделирования процессов и визуализацией результатов в системе CAVE 3D. Разработаны и реализованы алгоритмы многопроцессорной обработки данных, построения и визуализации изоповерхностей на сверхбольших расчетных сетках. Разработан ряд алгоритмов, ориентированных на использование мощности гибридных вычислительных узлов, оснащенных графическими ускорителями. Обращает на себя внимание привлечение методов динамической балансировки загрузки на уровне алгоритмического параллелизма, что создает основу для существенного увеличения эффективности использования гетерогенных узлов. Актуальность темы исследований, междисциплинарный характер исследований и полученных результатов не вызывает сомнений.

Развитие методов изучения результатов предсказательного моделирования является одним из ключевых факторов, определяющих эффек-

тивность применения суперкомпьютеров в научных исследованиях и промышленных приложениях. Авторами создан и развивается первый в российских вузах программно-аппаратный комплекс виртуальной реальности CAVE 3D с тремя просветными экранами, шестью проекторами, оптической трекинг-системой, высокопроизводительным видеокластером и оборудованием видеоконференцсвязи с удаленными исследовательскими группами. Созданные в рамках проекта компоненты plug-in для базового программного обеспечения COVISE дают возможность пользователям визуализировать результаты предсказательного моделирования, полученные на основе собственных (не коммерческих) программных систем. Дополнение базового программного обеспечения COVISE было интегрировано с работой некоммерческого программного обеспечения по моделированию нелинейной динамики трехмерных деформируемых тел и моделированию процессов газодинамики турбомашин. Разработан уникальный алгоритм на основе параллельных компьютерных технологий построения и визуализации в системе CAVE 3D изоповерхностей на сверхбольших сетках с числом узлов до миллиарда точек.

По проекту № 09-07-12068 «Разработка алгоритмов и программ для эффективного предсказательного моделирования “из первых принципов” реальных процессов в наноэлектронике и в плазме управляемого термоядерного синтеза с использованием петафлопных вычислительных систем» (руководитель А.М. Попов) выступил руководителем.

В рамках выполнения проекта в течение 2009 г. авторами исследована проблема эффективного использования супер-ЭВМ петафлопного класса для расчетов в наноэлектронике и магнитной гидродинамике термоядерной плазмы, разработаны новые подходы к распараллеливанию вычислений для многомерных нелинейных задач магнитной гидродинамики термоядерной плазмы, разработана многомасштабная модель переключения проводимости в молекулярных наносистемах, найдены оптимальные структуры распараллеливания для достижения высокой производительности программ моделирования. Благодаря использованию новых разработанных параллельных алгоритмов получен механизм реакции водородной изомеризации и предложена новая многомасштабная модель молекулярного переключателя, нанопамати, транспортных процессов в молекулярных наноструктурах, что не

могло быть достигнуто без использования супер-ЭВМ.

По проекту № 09-07-12073 «Применение супер-ЭВМ петафлопного класса для разработки электронных устройств нанометрового масштаба на основе дезоксирибонуклеиновых кислот и биополимеров» (руководитель В.Д. Лахно) выступил руководитель.

За отчетный период были получены следующие результаты:

1. Разработана структура ячейки трехмерного электронного нанобиочипа на основе ДНК. Структура ячейки смоделирована на компьютере и проверена возможность существования такой структуры, исходя из стереохимических ограничений. Предложен алгоритм подбора нуклеотидных последовательностей, которые должны обеспечить самосборку в проектируемую структуру.
2. Для моделирования переноса заряда в ДНК при заданной температуре разработана двухуровневая схема: естественное распараллеливание с выполнением каждой реализации на отдельном узле и распараллеливание на узле, содержащем многоядерные процессоры, при расчете каждой реализации с использованием общей памяти. Написаны программы на Си с использованием MPI и openMP. Программы протестированы на суперкомпьютере МСЦ РАН mvs-100k. Эффективность распараллеливания по реализациям почти 100 %. Ускорение счета одной реализации на 4-ядерном узле для полинуклеотидов в 3,3 раза.
3. Проведены компьютерные расчеты изменения кондуктанса при образовании из одноцепочечного фрагмента ДНК его дуплекса для ряда олигонуклеотидов. Для реализации нанобиочипа из исследованного множества олигонуклеотидов были выбраны олигонуклеотиды, во-первых, позволяющие по их нуклеотидной последовательности провести однозначную идентификацию гена, и, во-вторых, представляющие наибольшие изменения проводимости при гибридизации.
4. Проведена разработка методической базы для измерения проводимости молекул ДНК: разработка наноэлектродной системы; выравнивание молекул ДНК в потоке жидкости для нанесения молекул ДНК между электродами; а также АСМ-исследование наноструктур ДНК, образующих миникольца (гексагональные формы). Данные миникольца могут слу-

жить базовыми элементами для сборки более сложных молекулярных конструкций.

По проекту № 09-08-12033 «Численное моделирование процессов межфазных переходов при лазерном селективном спекании металлических порошков» (руководитель В.Г. Низьев) выступал руководитель.

Работа посвящена решению фундаментальной проблемы физики взаимодействия лазерного излучения с полидисперсной конденсированной системой. В рамках выполнения проекта в течение 2009 г. авторами предложены и развиты двумерные численные модели плавления твердых тел переменной плотности под воздействием неподвижного и сканирующего лазерного пучков. На их основе разработаны вычислительные алгоритмы, создано и верифицировано комплексное программное обеспечение для суперкомпьютеров. Разработаны физико-математическая модель, конечно-разностный численный метод, вычислительный алгоритм и программный комплекс для совместного решения задач гидродинамики и теплопереноса и кинетики для описания прямого лазерного спекания одно- и двухкомпонентных металлических порошков. Применение суперкомпьютеров для решения поставленных в проекте задач позволило исследовать физически более полные модели процессов, проанализировать большое количество вариантов режимов и наборов параметров обработки материалов, определить оптимальные режимы лазерной обработки дисперсных и пористых конденсированных сред.

В результате численного эксперимента впервые установлены эффекты расщепления эволюционного фронта плавления двухкомпонентных порошковых смесей, опережающего критического пористо-гравитационно-капиллярного просачивания жидкой легкоплавкой компоненты, аномального уплотнения твердой легкоплавкой фазы.

### Заключение

В целом выполнение проектов по данному направлению идет успешно. Анализ текущего состояния показывает, что из двух составляющих: математической модели и эффективной вычислительной схемы, — в каждом проекте одна из составляющих развивается больше, чем другая. Совет рекомендовал руководителям обратить внимание на сбалансированное развитие обеих составляющих.

## РАЗВИТИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ, АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Обзор подготовил Серебряков Владимир Алексеевич

### «Развитие моделей и вычислительных методов интеллектуального анализа неполных частично-противоречивых данных и их адаптация в неорганической химии»

Руководитель: Ю.И. Журавлев

В проекте выдвинута новая фундаментальная проблема создания нейросетевой методологии поиска логических закономерностей, возникающая в связи с необходимостью решения прикладной проблемы конструирования новых неорганических соединений с заданными свойствами. Проект носит междисциплинарный характер, поскольку сформулированные в нем задачи требуют как развития методологии теоретической информатики, так и использования методов материаловедения неорганических веществ. В процессе выполнения программы первого этапа исследований разработан новый оригинальный и универсальный подход к проблеме восстановления нелинейных регрессий, основанный на решении специальных задач распознавания. Данный подход позволяет переложить проблемы, связанные с разнотипными признаками или неполнотой описаний, на уровень решения задач распознавания, где в настоящее время созданы и используются эффективные и корректные алгоритмы распознавания. Построенный алгоритм восстановления кусочно-линейных регрессий основан на комбинации метода наименьших квадратов, динамического программирования и некоторых новых результатов в теории распознавания, в чем состоит его оригинальность. В целом разработанные и построенные в ходе первого этапа алгоритмы и методы распознавания, прогнозирования и восстановления зависимостей открывают новые возможности как в теоретической информатике, так и в материаловедении неорганических соединений. Исследования по проекту следует обязательно продолжить. Проект № 09-01-12060-офи\_м.

### «Разработка и интеграция в сервис-ориентированную геоинформационную систему инструментария для совместного анализа спутниковых и натуральных данных в рамках логико-вероятностного подхода»

Руководитель: Ю.И. Шокин

В проекте сформулирована фундаментальная проблема развития методологии комбинирования разнородной информации для создания геоинформационной системы совместного анализа спутниковых и натуральных данных. В результате первого года исследований впервые предложен метод обнаружения логических закономерностей на основе анализа коротких временных рядов, а также метод согласования вероятностных логических высказываний экспертов для решения задач распознавания и прогнозирования. Эти методы не имеют аналогов в мировой литературе. Определяемая ими форма представления результатов на едином языке дает возможность совместной обработки статистической и экспертной информации. Создаваемая в ходе выполнения проекта сервис-ориентированная геоинформационная система является уникальным программным инструментарием для поддержки междисциплинарных исследований. Исследования по проекту надо обязательно продолжить. Проект № 09-07-12087-офи\_м.

### «Новые методы распознавания структур и функций белков на основе алгебраических мультиалгоритмических конструкций»

Руководитель: К.В. Рудаков

В проекте сформулирована новая фундаментальная проблема создания нового поколения вычислительных алгоритмов интеллектуального анализа данных, ориентированных на решение прикладных задач распознавания структур и функций белков на основе анализа представляющих их аминокислотных последовательностей. Междисциплинарный характер проекта определяется необходимостью формулировки и решения

новых задач в области теоретической информатики, продиктованных нуждами биоинформатики. В ходе выполнения исследований по программе первого года создано программное обеспечение для проведения обработки массивов реальных данных с целью выявления в них кластерных структур, впервые разработана методология теоретического анализа моделей алгоритмических операторов, необходимых для решения задач анализа сходства в массивах символьных последовательностей. Поставленные на данный период задачи выполнены полностью. Подготовлена заявка на регистрацию программного комплекса. Исследования по проекту следует обязательно продолжить. Проект № 09-07-12098-офи\_м.

**«Средства построения аналитических приложений над коллекциями текстовых документов»**

*Руководитель: С.Д. Кузнецов*

В проекте сформулирована фундаментальная проблема семантического обогащения больших массивов текстовых документов на основе эталонных текстовых коллекций с известной семантической структурой с целью создания интеллектуальных аналитических приложений, в частности, баз знаний над ценными коллекциями текстовых документов, содержащихся в корпоративных репозиториях и в публично доступных хранилищах Internet. В результате исследований в отчетном году разработаны основные средства построения базы знаний на основе эталонной коллекции текстовых документов и семантического обогащения целевых текстовых коллекций. В частности, разработана методология построения баз знаний из ресурсов сети Интернет на примере Википедии. Созданы методы устранения лексической многозначности и извлечения ключевых слов с использованием построенной базы знаний. Разработанные методы являются новыми и перспективными. Результаты находятся на мировом уровне. Выполнение проекта следует продолжить. Проект № 09-07-12119-офи\_м.

**«Методы и инструментальные средства динамического мониторинга инвестиционных портфелей»**

*Руководитель: О.В. Красоткина*

Прикладной целью данного проекта является создание методологии и программно-ал-

горитмического комплекса для мониторинга скрытой динамики инвестиционных портфелей на длительных интервалах времени на основе анализа многомерных временных рядов доходностей, с одной стороны, анализируемого портфеля и, с другой стороны, активов, из которых он может быть составлен. Междисциплинарный характер проекта определяется тем, что динамическое обобщение задачи мониторинга скрытой структуры инвестиционного портфеля приводит к методологическим вопросам, которые превращают изначально прикладную задачу анализа стиля инвестиций в фундаментальную задачу статистики случайных процессов и интеллектуального анализа данных. Фундаментальной целью проекта является создание методов регуляризации обучаемых алгоритмов анализа нестационарных временных рядов, без которого невозможно создание методологического и алгоритмического обеспечения динамического мониторинга инвестиционных портфелей. Впервые разработана математическая модель зависимости наблюдаемой доходности портфеля от динамики доходностей составляющих его активов, допускающую покупку и продажу активов внутри интервала наблюдения. Впервые рассмотрена задача оценивания нестационарной регрессии при наличии ограничений типа неравенств, характерных для паевых инвестиционных фондов. Впервые сформулирована проблема неизбежной необходимости выбора степени «жесткости» априорной математической модели нестационарной регрессии, в частности, модели динамики инвестиционного портфеля, и тем более впервые выдвинуты идеи выбора значения этого структурного параметра модели по принципу скользящего контроля и по критерию Акаике. Впервые сформулирована и решается проблема обнаружения быстрых событий в составе портфеля (биржевых интервенций). Исследование по проекту следует продолжить. Проект № 09-01-12085-офи\_м.

**«Разработка интеграционного центра распределенных данных на основе OWL-технологий и онтологий предметной области (пилотная реализация для геоданных)»**

*Руководитель: В.А. Серебряков*

С целью интеграции разнородных распределенных геоданных и приложений разработана

концепция портала «Геомета» и пилотный набор сервисов на основе OWL-технологий для формирования интегрированных метаданных различных распределенных географических, геологических, инженерных, социологических и др. карт и картосхем, а также приложений на базе геоданных для решения исследовательских, инженерных, прогностических и др. задач.

При этом особое внимание уделено оформлению метаданных, онтологий предметных областей и обменных форматов геоданных и приложений в соответствии со стандартами ISO-19115 и ISO-19139. После представительного тестирования и обсуждения результатов научной общественностью данная разработка может стать основой организации распределенной системы накопления, хранения и обработки геоданных в масштабе Российской академии наук. Проект № 09-07-12065-офи\_м.

#### **«Методы поиска, построения запросов и семантической разметки распределенных научных электронных коллекций, основанные на онтологиях»**

*Руководитель: А.М. Елизаров*

Работа посвящена созданию технологии семантического поиска в множестве специально размеченных математических текстов.

Технология включает:

- хранилище данных размеченных математических публикаций на примере архива электронного журнала;
- сервисы разметки текстов и формирования метаданных с использованием прикладных онтологий;
- сервисы анализа запросов на поиск, формируемых на языке, близком к естественному;
- набор прикладных онтологий, связанных с онтологией верхнего уровня (метаонтологией);
- сервис поиска текстов, релевантных семантическим запросам с визуализацией найденных текстов.

В качестве языка разметки принят формат OMDOC, расширяющий язык TeX. Разработана специальная онтология и ряд эвристических алгоритмов формализации структуры математических текстов. Для оформления хранимых текстов применены язык и технология MathML, рекомендованная консорциумом

W3C, и разработан конвертор TeX-файлов в MathML.

Данная разработка может рассматриваться как технология, дополняющая технологии предыдущего проекта в направлении интеграции описательных сведений к геоданным. Проект № 09-07-12059-офи\_м.

#### **«Проведение теоретических и экспериментальных исследований в интересах создания комплекса современных высокоразрешающих вибрационных геотехнологий активного мониторинга геодинамических процессов в Земной коре»**

*Руководитель: М.С. Хайретдинов*

Разработан ряд методов и технических средств для создания комплекса высокоразрешающих вибрационных геотехнологий активного мониторинга геодинамических процессов в земной коре, а именно:

- алгоритмический метод выделения и измерения параметров сейсмических колебаний нанометрового уровня на фоне превосходящих шумов, основанный на накоплении по времени и множеству повторяющихся актов зондирования среды с использованием алгоритма дискретной оптимизации, обеспечивающего синхронность сложения волновых форм по критерию среднеквадратического приближения и по критерию максимума правдоподобия (есть ссылка на публикацию, это за пределами моей компетенции);
- технология сейсмического мониторинга зон назревающих природных катастроф на больших базах зондирования с применением метода обеспечения инвариантности результатов мониторинга по отношению к сезонным факторам распространения сейсмических колебаний;
- методика детального инженерно-сейсмологического обследования зданий и сооружений на основе использования вибраторов как источников прецизионных колебаний;
- технология параллельных вычислений при моделировании процессов распространения упругих волн в различных средах с целью изучения динамических картин формирования волнового поля и некоторые другие.

Разработка может рассматриваться как одно из важных приложений обработки геоданных. Проект № 09-07-12075-офи\_м.

**«Разработка сетевой геоинформационной технологии исследования геофизических пространственно-временных процессов в Земной коре»**

*Руководитель: В.Г. Гитис*

- В работах 2009 г. представлен некоторый этап развития ГеоТайм-2.0, системы сеточного анализа и визуализации пространственно-локализованных временных рядов на примере анализа таких рядов на основе данных Бишкекского полигона станций GPS.
- Изложены основы метода и программного модуля для оценивания параметров пространственно-временных аномалий по данным мониторинга движений Земной коры, но нет сведений по программной реализации и тестированию метода.
- Разработан алгоритм параллельных вычислений при анализе пространственно-локализованных временных рядов и метод удаленного запуска задач на вычислительном кластере. Приведены данные по затратам времени на решение задачи на ПК и кластере. Достигнуто ускорение до 50 раз.

Данная работа является важным приложением решения практических прогностических задач на базе геоданных. Проект № 09-07-12077-офи\_м.

**«Фундаментальный подход к разработке междисциплинарной универсальной концепции и моделей интеллекта для информационных технологий новых поколений»**

*Руководитель: В.В. Суворов*

- Разработана концепция интеллекта, включающая формулировку определения интеллекта, и ряд моделей, которые являются конструктивной основой для моделирования интеллекта.
- Произведена формализация содержательной формулировки определения интеллекта в терминах универсальной алгебраической системы.
- Даны примеры реализации математической интерпретации интеллекта в программно-вычислительной среде и построения инструментальной основы для решения прикладных задач.
- Разработаны модели, конкретизирующие атрибуты и аспекты представления интеллекта.
- Разработаны методы полиморфного кодирования для алгебраического представления многомерных кубических структур в виде моноида.

- Введены операции, позволяющие вычислять метрические и топологические характеристики таких структур.
- Проводилось моделирование мышления в среде искусственных нейросетей, например, в постгеномных исследованиях.

Выполняемая фундаментальная работа является одним из важных этапов в разработке интеллектуализированных информационных технологий нового поколения. Проект № 09-07-12135-офи\_м.

**«Новые вычислительные алгоритмы для решения задач вариационной ассимиляции данных наблюдений и разработка Информационно-вычислительных систем на высокопроизводительных вычислительных комплексах»**

*Руководитель: Г.И. Марчук*

Проект посвящен проведению фундаментальных исследований с целью обобщения и развития научных результатов коллектива исполнителей, связанных с разработкой Информационно-вычислительных систем (ИВС) вариационной ассимиляции данных наблюдений.

В 2009 г. получены следующие результаты:

- а) Создана и исследована новая математическая модель гидротермодинамики Мирового океана в произвольной ортогональной криволинейной системе координат «со смещенными полюсами» и в «сигма-системе» координат.
  - б) Разработаны новые алгоритмы, схемы расщепления и разностные схемы для реализации модели динамики Мирового океана. Созданы специальные алгоритмы для реализации численных моделей на высокопроизводительных вычислительных комплексах («кластерах»), допускающие «параллельные вычисления».
  - в) Разработаны и исследованы новые алгоритмы интерполяции и экстраполяции геофизической информации, получаемой с Международной глобальной системы буев ARGO с целью проверки и подготовки данных о профилях температур и солености с буев ARGO для последующего применения их в задаче ассимиляции данных на расчетной сетке модели.
- Полученные результаты относятся к междисциплинарным. Для выполнения поставленных задач привлекались специалисты по математи-

ческому моделированию в области задач геофизической гидродинамики (ИВМ РАН и ИО РАН), специалисты в области вычислительной математики (ИВМ РАН), специалисты в области информационного обеспечения решения обратных задач и задач вариационной ассимиляции данных наблюдений, баз данных и обработки геофизической информации (ИВМ РАН, ИКИ РАН, ГЦ РАН). Полученные результаты — вклад в развитие междисциплинарных научных направлений, к которым относятся исследования задач вариационной ассимиляции данных наблюдений и разработка информационно-вычислительных систем на высокопроизводительных вычислительных комплексах. Проект № 09-01-12029-офи\_м.

**«Разработка программных комплексов на базе адаптивных сеток для эффективного моделирования прикладных задач»**

*Руководитель: В.Д. Лисейкин*

Проект посвящен получению новых, более совершенных формул управляющих метрик в обращенных уравнениях Бельтрами и диффузии, усовершенствованию схем аппроксимации и алгоритмов генерации сеток, а также осуществлению параллельной реализации этих алгоритмов.

В 2009 г. получены следующие результаты:

- а) Получены новые фундаментальные теоретические результаты по формулировке управляющих метрик в уравнениях Бельтрами и диффузии. Эти метрики дают возможность построения сеток со следующими свойствами адаптации, требуемыми при расчетах прикладных задач: сгущение узлов в зонах больших градиентов физических функций, сгущение узлов в зонах выбранных значений функций, а также согласованность граней ячеек сеток с векторными полями.
- б) Получены практические результаты в виде разработанных компьютерных программ построения трехмерных разностных сеток в областях и на поверхностях.
- в) Данные компьютерные программы использованы для построения многоблочных адаптивных призматических и гексаэдральных сеток в трехмерных областях между лопатками турбин, при численных расчетах двумерных и трехмерных сингулярно возмущенных

задач диффузии и задач двухфазных течений, при исследовании трехмерной задачи моделирования распространения пассивной примеси в атмосфере от подвижного точечного источника.

- г) Проведено математическое моделирование процесса формирования и движения аэрозольного облака нанодисперсных частиц порошкового огнетушителя, возникающего при работе импульсной аэрозольной системы пожаротушения.

Полученные результаты относятся к междисциплинарным: для выполнения поставленных задач привлекались специалисты из разных областей знаний, фундаментальные исследования применялись для решения практических задач. Проект № 09-01-12023-офи\_м.

**«Разработка высокопроизводительных вычислительных алгоритмов для моделирования супрамолекулярных комплексов на графических процессорах»**

*Руководитель: А.С. Холодов*

Проект посвящен реализации генератора псевдослучайных чисел на базе графических процессоров, оценке вычислительной точности молекулярных симуляций на базе ГП и разработке эффективных численных методов для интегрирования уравнений молекулярной динамики на базе ГП.

В 2009 г. получены следующие результаты:

- а) На основе проведенных исследований выбраны два подхода, реализующие генерацию случайных чисел на графических процессорах (ГПУ) непосредственно в процессе расчетов. Оба подхода были использованы при реализации алгоритмов Ran2, Hybrid Taus и Lagged Fibonacci на ГПУ.
- б) Впервые осуществлена численная реализация динамики Ланжевена поведения белков на базе графических процессоров, что существенно ускорило процесс получения решения.
- в) Выяснено, что на ГП параллельное вычисление потенциалов воздействия сил для всех частиц приводит примерно к 30-ти кратному ускорению времени расчета относительно существующей оптимизированной ЦПУ версии.
- г) Оценка ГП версии программы показала, что ее можно использовать при сквозном расче-

те множества различных процессов в биологических системах, таких как малые белки, крупные белковые волокна и большие белковые комплексы.

Полученные результаты относятся к междисциплинарным: для выполнения поставленных задач привлекались специалисты из разных областей знаний, фундаментальные исследования применялись для решения практических задач. Проект № 09-07-12132-офи\_м.

#### **«Численное моделирование в пространствах высокой размерности»**

*Руководитель: Е.Е. Тартышников*

Проект посвящен разработке основ «тензорной вычислительной математики», в которой впервые тензоры используются не только как средство описания интересующих нас объектов, но и как метод построения эффективных методов вычислений, в том числе и во вполне классических ситуациях.

В 2009 г. получены следующие результаты:

- а) Разработаны и протестированы эффективные алгоритмы для базовых тензорных операций в ТТ-формате (перепроксимация, сумма, произведение, свертка). Разработаны прототипы соответствующих параллельных алгоритмов для вычислительного кластера.
- б) Построены методы приближенной факторизации матриц специального вида с логарифмической зависимостью числа операций от порядка матрицы.
- в) Разработан метод  $d$ -мерного интегрирования на основе ТТ-разложения и предложено его применение в численных методах для модели Блэйка-Шоула в задачах финансовой математики.
- г) Разработан метод приближенной факторизации дискретных аналогов оператора Лапласа и общих операторов эллиптического типа в  $d$ -мерном случае при  $d$  порядка нескольких сотен.

Междисциплинарный характер исследований подтверждается тем, что они открывают новые направления исследований в целом ряде областей: тензорные методы интерполяции функций, тензорные методы вычисления многомерных интегралов, тензорные методы сжатия и фильтрации изображений, тензорные методы выполнения матричных операций и др. Проект № 09-01-12058-офи\_м.

#### **«Создание и верификация пакета программ для высокопроизводительных ЭВМ с целью исследований плотной импульсной плазмы на основе радиационно-магнитогидродинамических моделей неравновесных течений»**

*Руководитель: В.А. Гислов*

Проект посвящен созданию на основе приближения радиационной магнитной гидродинамики проблемно-ориентированной физико-математической модели плотного пинча, формируемого в сильноточных наносекундных  $Z$ -пинчевых установках, и соответствующего этой модели компьютерного кода.

В 2009 г. получены следующие результаты:

- а) Создана рабочая версия программного комплекса, предназначенного для 3D моделирования процессов в высокотемпературной излучающей плазме. Созданный код является расширяемым, цельным, технологичным, документированным научно-техническим программным продуктом с широкой областью приложений.
- б) Получены новые результаты фундаментального характера, такие как алгоритмы ввода и обработки данных на основе подходов конструктивной геометрии и теории клеточных геометрических комплексов, алгоритмы и программные средства представления поверхностей, алгоритмы и программы построения блочных и неструктурированных сеток смешанных типов (состоящие из ячеек в форме тетраэдров, гексаэдров и призм), в том числе алгоритмы параллельной обработки входных данных, гибридные конечно-объемные/конечно-элементные схемы повышенного порядка аппроксимации для расчета высокотемпературных течений плазмы и лучистого переноса энергии на неструктурированных сетках.
- в) Численно промоделировано формирование  $Z$ -пинчей на основе многопроволочных вольфрамовых и алюминиевых сборок в трехмерных постановках задач РМГД.
- г) Рассмотрена задача о трехмерном протекании тока в режиме сильного эффекта Холла через плазму с неоднородной концентрацией.
- д) Проведены эксперименты на установке Ангара-5-1, подтвердившие результаты математического моделирования сжатия конусных сборок в том, что использование конусных

сборок позволяет контролировать направление зипперинга плазмы, регулировать пространственно-временные и энергетические характеристики рентгеновской эмиссии пинча, в частности, менять выход жесткого рентгеновского излучения.

Полученные результаты относятся к междисциплинарным: для выполнения поставленных задач привлекались специалисты разных направлений, разработанный комплекс программ может быть использован для решения широкого круга практически важных задач. Проект № 09-01-12109-офи\_м.

**«Решение задач оптимального управления и конечномерной оптимизации большой размерности в распределенной вычислительной среде»**

*Руководитель: А.П. Афанасьев*

Проект был нацелен на разработку новых подходов к решению сложных оптимизационных задач и их применений к конкретным практическим проблемам. Исследования велись в двух направлениях. Первое направление заключалось в разработке и программной реализации методов типа ветвей и границ и стохастических методов для решения задач глобальной оптимизации большой размерности, причем, в методах типа ветвей и границ существенным образом использовались интервальные и нижние липшицевы оценки минимизируемой функции. Методы реализованы на параллельных системах с распределенной памятью, при этом эксперименты проводились в распределенных вычислительных средах, состоящих из нескольких суперкомпьютеров, с суммарным числом задействованных вычислительных ядер от 1000 до 5000. Была решена очень важная с практической точки зрения задача конфигурации атомных кластеров, возникающая при изучении энергетических свойств химических соединений. Другим важным направлением исследований была разработка методов решения задач оптимального управления. Была исследована задача оптимального управления нелинейными системами с квадратичным критерием качества, для которой показано, что стабилизация такой системы дается законом управления с обратной связью. Предложен метод последовательных приближений, позволяющий вычислить закон управления.

Проведен также анализ периодических и близких к ним решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений, являющихся ситуациями общего положения. Проведена их классификация и введено понятие обобщенных периодических решений. Для неавтономного дифференциального включения с периодической правой частью показано, что из существования ограниченного решения следует существование обобщенного периодического решения и обратно. Полученные результаты исследований опубликованы. Их отличительной чертой является то обстоятельство, что они не ограничены только математическими постановками, но и применены для решения весьма сложной практической задачи из области конструирования молекул. Проект № 09-07-12076-офи\_м.

**«Информационно-аналитическая система поддержки сопровождения научных исследований природных ресурсов (на примере Республики Карелия)»**

*Руководитель: А.Ф. Тиов*

1. Степень выполнения задач, поставленных в проекте, на первом этапе.  
Важнейшие результаты, полученные за отчетный период:
  - созданная интегрированная база научных данных по природным ресурсам Карелии, включающая картографические материалы, атрибутивные базы данных, электронные научные публикации и коллекции;
  - прототип комплексной онтологии по естественным наукам, которая разработана совместно со специалистами-предметниками из научных учреждений (биологии, водных проблем Севера, геологии, леса и прикладных математических исследований) КарНЦ РАН;
2. Степень новизны полученных результатов и соответствие мировому уровню.  
Полученные результаты корреспондируются с аналогичными разработками в смежных областях, выполненными и выполняемыми в рамках соответствующих программ Президиума РАН, в частности, в СО РАН. Полученные результаты соответствуют мировому уровню.
3. Уровень междисциплинарности полученных результатов.

Применение при создании ИАС (наряду с современными ГИС и веб-технологиями) методов онтологического моделирования будет способствовать интеграции разнородной научной информации в единую информационную систему поддержки и сопровождения междисциплинарных исследований природных ресурсов как ученых КарНЦ РАН, так и их российских и зарубежных коллег.

4. Возможность достижения всех поставленных целей на следующем этапе.

Результаты, полученные на первом этапе, свидетельствуют о возможности успешного завершения проекта в соответствии с принятым планом работ.

5. Замечания и пожелания.

Необходимо повысить уровень публикаций по результатам проекта. Проект № 09-07-12074-офи\_м.

**«Разработка и сопровождение интегрированной информационно-поисковой системы на основе электронных архивов российской научной периодики в области математических и смежных наук»**

*Руководитель: А.Б. Жижченко*

1. Степень выполнения задач, поставленных в проекте, на первом этапе.

Важнейшие результаты, полученные за отчетный период:

- развитие Общероссийского математического портала MathNet.Ru;
- разработка программного обеспечения, позволившего редакциям журналов, участвующим в проекте, наладить электронный документооборот, связанный с работой по подготовке статей к печати в соответствующем издании;
- создание базы данных по основным российским математическим журналам, выходящим на русском языке, а также ряду журналов, издающихся на русском и английском языках в странах СНГ, и российским журналам, издающимся только на английском языке.

2. Степень новизны полученных результатов и соответствие мировому уровню.

Полученные результаты соответствуют мировому уровню, являются для России уникальными и корреспондируются с аналогичными разработками Европейского математического союза.

3. Уровень междисциплинарности полученных результатов.

Осуществлялось взаимодействие с проектом Google-Scholar, индексирующим научные публикации и представляющим такие сервисы, как список цитирующих статей и полный список всех публикаций автора.

4. Возможность достижения всех поставленных целей на следующем этапе.

Результаты, полученные на первом этапе, свидетельствуют о возможности успешного завершения проекта в соответствии с принятым планом работ.

5. Замечания и пожелания.

Необходимо увеличить количество публикаций по результатам проекта.

Целесообразно скоординировать работы по проекту с работами, проводимыми Научной электронной библиотекой E-library.ru. Проект № 09-07-12085-офи\_м.

**«Методы и алгоритмы решения задач глобальной и многокритериальной оптимизации и их реализация на высокопроизводительных вычислительных системах»**

*Руководитель: Ю.Г. Евтушенко*

Работа над проектом протекает успешно. В поле зрения проекта находятся несколько важных классов задач конечномерной оптимизации, таких как глобальная и многокритериальная оптимизация и близкие к ним. Возможность погружения этих задач в среду параллельных и распределенных вычислений создает серьезные перспективы для заметного увеличения размерности решаемых задач. Однако, в свою очередь, это налагает требования на методы решения задачи и используемые алгоритмы. Все эти вопросы в проекте изучаются как с теоретической, так и вычислительной позиций. Междисциплинарность проекта определяется сочетанием методов решения задач математического программирования и технологий построения высокопроизводительной вычислительной среды. Задачи и цели первого этапа проекта соответствуют общим целям проекта и успешно выполнены. Проект № 09-07-12098-офи\_м.

**«Разработка математических методов, вычислительных алгоритмов и программных средств для решения задач моделирования информационно-вычислительных и телекоммуникационных систем»**

*Руководитель: И.А. Соколов*

Работа над проектом протекает успешно. Активное развитие информационно-вычислительных и телекоммуникационных систем влечет за собой задачу их анализа и моделирования. Если принять во внимание неоднородную, а зачастую и хаотическую природу этих систем, то оказывается, что в основу методов их изучения целесообразно положить стохастический подход. Авторы проекта в совершенстве владеют методами теории случайных процессов и успешно их применяют при исследовании функционирования современных информационно-вычислительных и телекоммуникационных систем. Отчет по первому этапу подготовлен очень обстоятельно и полно. Междисциплинарность проекта определяется применением методов теории случайных процессов к такому нестандартному объекту, как информационно-вычислительные и телекоммуникационные системы. Можно заключить, что задачи и цели первого этапа проекта соответствуют общим целям проекта и успешно выполнены. Проект № 09-07-12032-офи\_м.

**«Оптимальные методы трехмерной реконструкции нейробиологических структур по данным высокоразрешающей электронной микроскопии»**

*Руководитель: В.Г. Жадан*

Работа над проектом протекает успешно. Проект посвящен теоретическим и алгоритмическим проблемам восстановления поверхностей по данным измерений. Класс изучаемых поверхностей определяется синаптическими структурами центральной нервной системы, а данные измерений формируются по серийным ультратонким срезам.

Разработан и реализован новый алгоритм, основанный на построении плоских триангуляций Делоне для проекции пар смежных срезов на плоскость и последующем натягивании плоских сеток в виде мембраны между двумя наборами сечений. Проведены вычислительные эксперименты. Междисциплинарность проекта определяется сочетанием методов вы-

числительной геометрии и методов изучения и измерения синаптических структур центральной нервной системы. В целом можно заключить, что задачи и цели первого этапа проекта соответствуют общим целям проекта и успешно выполнены. Проект № 09-01-12106-офи\_м.

**«Распределенные информационно-вычислительные системы: развитие фундаментальных основ, создание алгоритмического и программного обеспечения и параллельное моделирование сложных физических сред»**

*Руководитель: В.Г. Хорошевский*

Разработаны алгоритмический и программный инструментарий организации эффективного функционирования распределенных информационно-вычислительных и GRID систем в мультипрограммных режимах и средства параллельного моделирования сложных физических сред. Созданы алгоритмы и программы формирования расписаний выполнения параллельных программ с нефиксированными параметрами на распределенных информационно-вычислительных системах (ИВС). В алгоритмах учитываются пользовательские предпочтения на выбор параметров для решения задач.

Предложены модели и эвристические алгоритмы вложения в распределенные ИВС параллельных программ с целью минимизации времени реализации межмашинных обменов. Алгоритмы обладают полиномиальной трудоемкостью и ориентированы на использование в системах параллельного программирования и библиотеках стандарта MPI (Message Passing Interface).

Разработаны алгоритмы (само)контроля состояния распределенных ИВС и программные компоненты восстановления из контрольных точек (checkpoint) ветвей параллельной программы с сохранением родительских связей между ними.

Развиты стохастическая модель и методы расчета показателей живучести распределенных ИВС. Полученные формулы позволяют осуществлять анализ функционирования ИВС как в стационарном, так и в переходном режимах.

В области параллельного моделирования физических процессов развиты методы молекулярной динамики и подвижных клеточных автоматов. Разработаны алгоритмы и прог-

раммные средства анализа структурных изменений в нагруженных кристаллитах, в том числе зарождения пластической деформации. Параллельное моделирование методом молекулярной динамики позволило получить новые данные о возможности формирования разориентированной наноблочной структуры в зонах локализации атомных смещений при релаксации нагруженного материала, а также зарождения пластической деформации в моделируемых кристаллитах титана при динамическом нагружении. Методом подвижных клеточных автоматов изучены закономерности процессов, происходящих на уровне пятна контакта, на динамику формирования слоя трения и закономерности генерации акустических колебаний при контактном взаимодействии. Кроме того, на основе этого метода разработаны структурные модели основных типов границ раздела фрагментов горного массива, характеризующихся различными механическими, в том числе реологическими параметрами при сдвиговом нагружении. Проведен анализ влияния степени неравноосности сжатия, что позволило выявить смену доминирующего механизма деформации и впервые предложить параметр напряженного состояния, контролирующей данный эффект.

Создана действующая конфигурация пространственно-распределенной мультикластерной ИВС (GRID-модель) для параллельного моделирования сложных физических сред. Проект № 09-07-12016-офи\_м.

**«Методы и модели поддержки принятия решений при оказании экстренной помощи в чрезвычайных ситуациях»**

*Руководитель: А.Б. Петровский*

Разработана концептуальная модель интеграции автономных ресурсов открытой информационной среды во временную сеть ресурсов в соответствии с текущей целью поддержки принятия решений в чрезвычайных ситуациях. Разработана модель ресурса открытой информационной среды, ориентированная на стандарты открытых систем и сред и обеспечивающая однородность представления информации автономными ресурсами среды. Разработана прикладная онтология проблемной области «управление чрезвычайными ситуациями». Определены критерии эффективности сети

Web-сервисов, используемых для описания функций ресурсов открытой информационной среды. Разработана сценарная модель формирования сети Web-сервисов, позволяющая выбирать ресурсы открытой информационной среды в соответствии с критериями эффективности. Проект № 09-07-12111-офи\_м.

**«Разработка и внедрение информационных систем для проведения дистанционных научно-образовательных занятий по теоретической физике и математике»**

*Руководитель: А.С. Лосев*

Главным результатом работы за прошедший период было создание дешевого транслятора видео высокой четкости и проведение с его помощью интерактивных видеотрансляций высокой четкости с интенсива профессора Н.Берковица «Чистые спиноры в суперструнах и М-теории» (с вводными лекциями и сопровождаемыми семинарами А.Лосева).

Информационная поддержка курса осуществлялась сайтом Физматклуба ПОМИ (под руководством Н.Мнева), и материалы курса (в том числе и видеоматериалы) выложены на сайте Физматклуба ПОМИ: <http://club.pdmi.ras.ru/moodle/course/view.php?id=38>.

Многоканальная ретрансляция в интернет проводилась Научно-Образовательным Центром ОИЯИ под руководством С.Пакуляка.

Технические данные разработанного транслятора видео высокой четкости:

1. Передача аудио- и видеосигнала в реальном времени в разрешении не меньшем, чем 1920x1080 с частотой 25 кадров в секунду по Интернету при допустимом трафике не более 1,2–1,5 mbps.
2. Цена транслятора порядка 60 000 руб., что примерно в пять раз дешевле аналогов бизнес-класса, типа Танберг.
3. Транслятор реализован на программных продуктах с открытым кодом.

Создание устройства эконом-класса и первые опыты его практического применения открывают дорогу к созданию научно-образовательной среды, интегрирующей массовое использование видео высокой четкости и современную текстовую и графическую формы представления материала.

Разработано техническое задание для этой среды. Проект № 09-07-12136-офи\_м.

**«Развивающиеся во времени научные публикации в Интернете»**

*Руководитель: М.М. Горбунов-Посадов*

Разработан проект опытной версии среды развивающихся во времени («живых») публикаций и начата ее реализация. В качестве первого шага разработана поддержка развивающихся во времени персональных веб-страниц научных сотрудников. Информация на персональной странице научного сотрудника составлена из двух частей. Первая, официальная часть включает ФИО, должность, степень, звание, государственные награды и т.д. За поддержку официальной части страницы в актуальном состоянии отвечает отдел кадров. Вторая часть включает телефонные номера, электронные адреса, фотографию, научную биографию, научные интересы, разрабатываемые проекты, основные публикации. Эта часть персональной страницы создается и оперативно обновляется самим научным сотрудником. В настоящее время реализованная среда поддержки персональных страниц обслуживает сотрудников ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Почему реализация проекта началась с персональной страницы? Дело в том, что именно здесь состоится первое знакомство автора со средой живых публикаций, здесь он приобретает первый опыт самостоятельного размещения в свободном доступе и оперативной коррекции своих материалов. Впоследствии каждая живая публикация, разумеется, снабжается ссылкой на персональную страницу автора, отсюда читатель сможет, в частности, познакомиться со списком его избранных трудов. Наконец, сведения из персональной страницы необходимы для проведения наукометрических исследований новой формы издания. Тем самым персональная страница является одним из основных базисных элементов среды живых публикаций. Проект № 09-01-12081-офи\_м.

**«Декларативные спецификации способов представления информации в файлах и базах данных, алгоритмы их применения для информационного обмена и интеграции разнородных междисциплинарных данных»**

*Руководитель: И.В. Бычков*

В соответствии с поставленными целями на 2009 г. и планом работ получены следующие оригинальные результаты, направленные на

автоматизацию разработки программного обеспечения, ориентированного на организацию информационного обмена, структурирование и обработку разнородной информации при выполнении междисциплинарных исследований:

1. Для поддержки одновременного отображения информации из нескольких БД в системе ГеоАРМ, позволяющей автоматизировать создание АРМов для просмотра и редактирования информации по спецификациям структур БД, разработана оригинальная технология импорта информации из одной спецификации структуры БД в другую. Расширен используемый в системе ГеоАРМ механизм привязки записей БД к объектам карт, позволяющий оперативно создавать тематические карты по информации из БД: поддержана возможность включения в спецификации информации об уже существующих таблицах, содержащих коды объектов карты. Реализованный механизм, с одной стороны, позволяет избежать дублирования информации при наличии в структуре БД информации о привязке к карте, а с другой стороны, позволяет работать с несколькими таблицами связей при интеграции различных научных БД. Для записей подчиненных таблиц, отображаемых в системе ГеоАРМ на форме для редактирования отдельной записи главной таблицы, реализован механизм поиска по задаваемому пользователем условию. Ранее подобный механизм поддерживался только для записей главной таблицы. Технология использования спецификаций структур БД активно применяется для формирования интегрированных информационных междисциплинарных научных ресурсов в ИНЦ СО РАН, разработанные механизмы позволяют создавать комплексные информационные системы за счет интеграции разнородных БД.
2. Для организации информационного обмена научными данными разработан ряд новых алгоритмов, основанных на применении декларативных спецификаций форматов бинарных файлов. В частности, для спецификаций форматов данных на языке FlexT разработан механизм генерации кода чтения данных на языке Object Pascal для спецификаций форматов данных, не использующих условную компиляцию. Предложенные алгоритмы позволяют автоматизировать значительную часть работы, связанную с созданием программ для конвертации данных.

3. Разработаны актуальные методы, системы и технологии извлечения табличной информации из научных документов, а также ее преобразования к требуемому электронному виду, например, к отношениям в реляционных базах данных. В проекте предложена новая технология извлечения табличной информации, представленной в виде машиночитаемого текста в электронных документах разных форматов (материалы статистической отчетности, научные отчеты, статьи и т.д.), которая ориентирована на структуру и особенности статистических таблиц. Реализован автоматизированный ввод в БД информации из статистических таблиц. Данная технология позволяет существенно снизить затраты и повысить качество формирования тематических баз данных междисциплинарных исследований.
4. Создана оригинальная база знаний процедуры трансформации (модель программно-аппаратной платформы обработки информации) платформонезависимой модели информационной системы, представленная в виде сети логических объектов языка программирования LogTalk, что обеспечивает, в частности, инкапсуляцию разделов базы знаний внутри объектов, наследование знания между модулями, представление сценария трансформации в виде сети взаимодействующих модулей. Применение процедуры трансформации позволяет существенно снизить трудозатраты на разработку программного обеспечения.
5. Предложена информационная модель документа, применимая в системах автоматизации документооборота и позволяющая расширить класс решаемых задач за счет оперирования документом как структурированным набором данных. Модель документа содержит информацию об отображении структуры документа и исходных данных, на основе которой возможна автоматически генерация пользовательского интерфейса ввода и редактирования. Проект № 09-07-12017-офи\_м.

## ИСКУССТВЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРИРОДНУЮ ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ СРЕДУ

Обзор подготовил Шорс Юрий Григорьевич

### «Изучение основных структур литосферы Северного Ледовитого океана электромагнитными методами»

Целью и основной задачей проекта являлась оценка возможностей различных электромагнитных методов для решения проблемы картирования структур литосферы Северного Ледовитого океана. Конкретными задачами этапа 2009 г. были:

- моделирование типовых структур Северного Ледовитого океана и их ансамблей;
- выбор оптимального способа сопоставления натуральных и модельных данных;
- расчет полей и функций отклика при различной геометрии источников естественного поля и выбор наиболее адекватной геометрии характеру фактических магнитных индукционных векторов;
- построение стартовой приближенной геоэлектрической модели центральной части Северного Ледовитого океана на основе всей имеющейся априорной информации.

В результате работы было выполнено систематическое геоэлектрическое трехмерное моделирование структур литосферы Северного Ледовитого океана, начиная с элементарных типовых структур (горст, грабен, разломы, элементы рельефа) и их ансамблей, и заканчивая конкретными основными структурами — хребтами Гаккеля, Ломоносова, Менделеева и поднятия Альфа, расположенными на блоках как океанической, так и материковой коры и в переходной зоне предполагаемой геологической границы шельфа. Моделировались результаты магнитотеллурического зондирования (МТЗ), магнитовариационного профилирования (МВП) в диапазоне периодов от секунды до суток и зондирования с помощью низкочастотных искусственных источников, выполняемых как на поверхности льда, так и на дне в диапазоне периодов 1–100 с.

По результатам трехмерного моделирования структур литосферы Северного Ледовитого океана количественно оценены возможности и ограничения различных методов и вариантов

их реализации с точки зрения определения типа коры, картирования структур и выбора между конкурирующими геологическими гипотезами их глубинного строения. Обнаружено, что, несмотря на низкую разрешающую способность в традиционном ледовом варианте МТЗ, тип коры надежно определяется. Разрешающая способность этого варианта повышается над океанической корой, но в целом для достоверного картирования структур пригоден только донный вариант. Возможности применения низкочастотных искусственных источников с реалистичными параметрами оказались значительно хуже ожидаемых даже при расположении передатчика и приемников на дне за счет преобладающего влияния мощного океанского водного слоя, приводящего к падению напряженности поля ниже порога чувствительности современной аппаратуры уже на малом горизонтальном расстоянии.

Разработана методика вычисления модельных магнитных индукционных векторов, характеризующихся четырьмя параметрами, и их сопоставления с натурными данными, выраженными в форме таких же векторов. Проведены расчеты магнитного поля и магнитных индукционных векторов для различных вариантов упрощенной модели хребта Ломоносова в диапазоне периодов 2–24 часа. Получены результаты сравнения расчетов на вариантах типовой модели с реальными данными и оценена степень применимости на практике представления первичного поля в виде плоской волны. С этой целью выполнен расчет полей и функций отклика как для плоской волны, так и при моделировании ионосферных источников естественного поля удаленными токовыми нитями.

При моделировании результатов МВП обнаружен эффект индукционного взаимодействия в ансамблях структур, в том числе второго порядка, за счет которых структура поля значительно меняется. В результате структуры второго порядка могут создавать эффект первого порядка в наблюдаемом поле и ими нельзя пренебрегать уже в стартовых геоэлектрических моделях. В частности, обнаружено,

что при расположении разлома на дне океана параллельно материковому склону, аномалия, вызванная склоном (нормальный береговой эффект), оказывается сильно подавленной. Особенно важным результатом моделирования ансамблей является то, что расслоение единой разломной зоны на серию параллельных разломов может многократно увеличить магнитный индукционный вектор.

Выполненное трехмерное математическое моделирование распределения всех четырех параметров магнитных индукционных векторов в районе хребта Ломоносова с различными типами возбуждения первичного поля показало, что имеющиеся экспериментальные данные — карты магнитных индукционных векторов по акватории Северного Ледовитого океана, которые обрисовывают крупномасштабные проводящие структуры литосферы, — демонстрируют величины этих векторов значительно больше полученных в первых результатах моделирования на упрощенных моделях. Использование удаленных линейных источников первичного поля, отличных от плоской волны, позволяет увеличить большие оси магнитных индукционных векторов только на 20 %, что недостаточно для объяснения экспериментальных данных. Поэтому обнаруженный эффект индукционного взаимодействия в ансамблях структур важен для интерпретации данных МВП.

На основе всей имеющейся априорной информации и с учетом предыдущих результатов построена оригинальная подробная стартовая геоэлектрическая модель центральной части Северного Ледовитого океана и окрестностей предполагаемой геологической границы шельфа. Особенностью модели являются предусмотренный учет вариантов ансамблей структур второго порядка, которые могут оказать влияние на наблюдаемую структуру поля в первом порядке. Проект № 09-05-12003-офи\_м.

**«Исследование электромагнитного поля, возбуждаемого в неоднородной среде мощным источником крайне низкочастотного (КНЧ) диапазона, и его интерпретация на основе современных методов решения трехмерных задач электромагнитного зондирования»**

Целями и основными задачами проекта являлись разработка на основе экспериментальных

наблюдений требования к аппаратуре, обеспечивающей эффективное электромагнитное зондирование, и оценка эффективности использования мощных искусственных источников электромагнитного поля КНЧ-диапазона для электромагнитного зондирования геологических структур; отработка схемы моделирования трехмерной задачи реконструкции геологических неоднородностей среды на основе подхода к решению трехмерных интегральных уравнений, предложенного М.С. Ждановым, применительно к мощному источнику в КНЧ-диапазоне в сложных геологических условиях; моделирование на основе разработанных в ходе выполнения проекта методов и подходов задачи поиска полезных ископаемых.

В результате работы для проведения экспериментальных исследований электромагнитного поля в неоднородных средах создана аппаратура в составе мощного источника электромагнитного излучения экстремально низкочастотного диапазона (0,001–200 Гц), системы регистрации тока в передающей антенне с привязкой ко времени UT по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, мобильного приемного измерительного комплекса на базе автомобиля для измерения магнитной составляющей электромагнитного поля в заданных точках с привязкой ко времени UT по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Разработана и изготовлена аппаратура для измерения разности фаз между током источника и каждой компонентой магнитного поля в точке приема.

На Кольском полуострове получены результаты экспериментальных измерений трех составляющих напряженности магнитного поля в ближней зоне стационарного источника экстремально низкочастотного диапазона в восьми равномерно распределенных точках протяженной трассы, ориентированной практически параллельно источнику поля. Впервые в данной работе измерены как амплитуды, так и абсолютные фазы каждой из составляющих магнитного поля. В отдельных точках измерений были отмечены аномально высокие значения вертикальной составляющей напряженности магнитного поля Hz, которые нельзя объяснить, исходя из существующих представлений о глубинной структуре земной коры исследуемой области. В целом результаты измерений показали, что разработанная и изготовленная аппаратура для генерации и измерения электромаг-

нитных полей экстремально низкочастотного диапазона с точной привязкой ко времени UT по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS позволяет получать экспериментальные данные для сопоставления с результатами математического моделирования при решении трехмерных задач электромагнитного зондирования.

Выполнено трехмерное моделирование КНЧ электромагнитного поля, возбуждаемого мощным протяженным источником в средней части Кольского полуострова. Сопоставление с натурными данными измерений магнитного поля на профиле, параллельном передающей антенне (в ближней зоне) показало, что главную роль в формировании поля играет разломная тектоника. Однако основной проблемой оказалось модельное объяснение необычно больших экспериментально зарегистрированных амплитуд вертикальной компоненты магнитного поля. Оказалось, эти амплитуды не могут быть объяснены ни пересечением профиля местными разломами, ни какими-либо иными локальными неоднородностями. Обнаружено, что единственно возможным объяснением является циркуляция тока по крупномасштабной региональной сети разломов в области размером порядка 100 км, причем, часть тока замыкается через Баренцево море. Такая гальваническая связь моря с континентом по узким проводящим каналам является новым, ранее не известным проявлением берегового эффекта. Моделирование крупномасштабной сетки разломов позволило количественно весьма точно воспроизвести наиболее интенсивную наблюдаемую аномалию вертикальной компоненты. Произведена оценка влияния моря, показавшая, что ток замыкания концентрируется в достаточно узкой прибрежной полосе. Выполнена также оценка влияния гидрографии суши (озер и речной сети), показавшая, что в отличие от разломов, влияние гидрографии ограничивается ближней зоной. Оказалось, что помимо сети разломов для объяснения наблюдаемой структуры поля требуется наличие к северу от восточной части профиля и простирающегося на восток низкоомного тела, отождествляемого с фрагментом зеленокаменного пояса.

На основе отработанной на Кольском полуострове методики решена задача моделирования диагностики газоконденсата в море при помощи мощного КНЧ-источника на примере хорошо изученного Штокмановского место-

рождения. Наиболее эффективен источник в виде донного электрического биполя, радиальная поляризация этого источника и измерения вертикальной электрической компоненты. Но каждая из возможных поляризаций источника (кроме вертикальной), каждая из измеряемых компонент (кроме вертикальной магнитной) имеют в своих сочетаниях особую эффективность. Это позволяет создать внутриметодическую избыточность, необходимую для ответственного вывода о продуктивности структуры. При ограниченных условиях натурных исследований следует предпочесть радиальную поляризацию. Самой информативной оказалась наиболее экзотическая для современной практики вертикальная компонента электрического поля. Неожиданным результатом оказалось также то, что при многослойной залежи наибольшую реакцию в электромагнитном поле вызывает не самый верхний из продуктивных слоев, а более глубокий, с большим горизонтальным размером. Проект № 09-05-12012-офи\_м.

**«Разработка новых математических моделей и вычислительных методов моделирования электромагнитного зондирования с использованием мощных источников электромагнитного поля»**

Целями проекта была: оценка влияния ионосферы на поле удаленного источника по асимптотическим разложениям электромагнитного поля в дальней зоне; оценка влияния берегового эффекта на измерения электромагнитного поля в океане и разработка метода компенсации этого влияния; развитие импедансного подхода обработки измерений электромагнитного поля в океане с целью исключения влияния распределенного источника поля; а также оценка влияния магнитотеллурического поля на результаты измерений электромагнитного поля мощного удаленного источника.

В результате работы был разработан асимптотический метод исследования электромагнитного поля от удаленных источников. С помощью этого метода исследовано влияние ионосферы на поле магнитного диполя. Показано, что влияние ионосферы начинает сказываться при удалении от источника на расстояние более 150 км. На больших расстояниях ионосфера способствует более быстрому убыванию поля. Так, например, на расстоянии в 300 км влияние ионосферы приводит к убыванию поля в 30 раз.

В двумерном приближении был исследован береговой эффект, т.е. концентрация тока вдоль береговой линии за счет бокового скин-эффекта. На основе метода интегральных уравнений разработана программа расчета электромагнитного поля в море, включая морское дно, при возбуждении поля плоской волной и кабелем. Проведена оценка расстояния, на котором не сказывается береговой эффект. Показано, что на этом расстоянии импеданс, полученный на морском дне, равен импедансу слоистой среды. Кроме того, исследован островной эффект, когда в центре острова находится магнитный диполь. В этом случае возникает аналог берегового эффекта (вокруг острова концентрируется ток). Создана соответствующая программа расчета поля в море.

Разработан импедансный подход к решению обратных задач морских электромагнитных зондирований. Дело в том, что из-за неоднородностей электропроводности контролируемый источник возбуждает вокруг себя токи достаточно сложной конфигурации, учет которых при решении обратных задач затруднен. Однако, на расстояниях много больше размеров области, неоднородности поля зависят только от эффективного источника. Тогда при определении импеданса (отношения электрического поля к магнитному) ток эффективного источника сокращается, и мы получаем характеристику поля, не зависящую от источника поля, что позволяет легко решать обратную задачу электромагнитного зондирования морского дна.

Была проведена оценка влияния магнитотеллурического поля на результаты измерений поля удаленного источника. При достаточно большом удалении от источника магнитотеллурическое поле существенно влияет на измеряемое поле. Исключить это влияние можно только при импедансном подходе. Дело в том, что величина источника постоянна, а амплитуда и поляризация магнитотеллурического поля меняются во времени. Проводя многократные измерения, можно из линейных соотношений электрического и магнитного полей исключить влияние магнитотеллурического поля.

Кроме того, в задел для будущего была разработана программа расчета аномального электромагнитного поля от трехмерной неоднородности на морском дне. В настоящее время эта программа переносится на супер-ЭВМ с параллельными вычислениями, что позволит про-

водить масштабное моделирование морских зондирований. Проект № 09-05-12016-офи\_м.

#### **«Инициирование и накопление деформаций в блочной геофизической среде в результате электромагнитных и механических воздействий»**

*Руководитель: Г.Г. Кочарян*

Проводились работы по созданию модели инициирования и накопления деформаций в блочной геофизической среде в результате электромагнитных и механических воздействий.

Проведены лабораторные и численные эксперименты, деформометрические, сейсмометрические и гидрогеологические полевые наблюдения, исследовались структурные модели разломных зон и данные сейсмического мониторинга областей динамического влияния разломов. Проводились расчеты параметров возможного электромагнитного воздействия на разломные зоны, а также теоретические проработки возможных методов электромагнитного воздействия на горный массив.

В качестве методологической основы исследований использовалось разделение геомеханической модели явления на механическую и структурную составляющие. Механическая модель создается на базе развиваемых в ходе выполнения проекта представлений о закономерностях деформирования блочной среды. Структурная модель разрабатывается на основе результатов многолетних исследований, проводимых участниками проекта в Байкальской рифтовой зоне и других регионах.

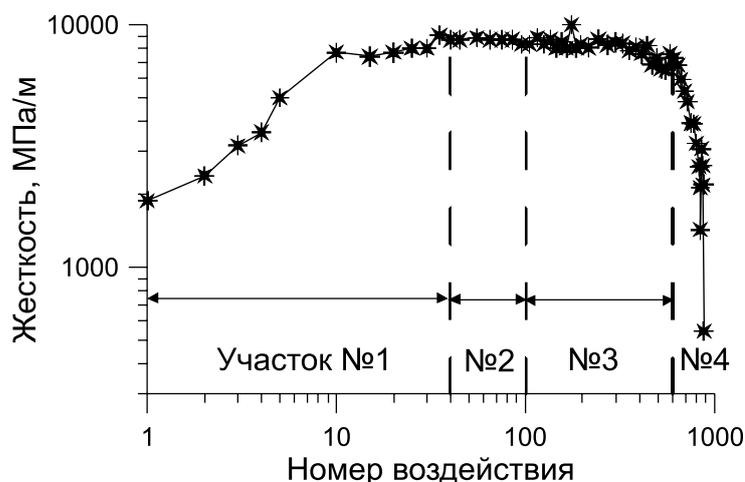
С целью создания геомеханической модели реакции активной разломной зоны на низкоамплитудные механические и электромагнитные воздействия выполнены лабораторные и полевые эксперименты, в которых детально исследована динамика формирования остаточных деформаций и возникновения неустойчивости на напряженном контакте (рис. 1), реакция флюидных систем на вибрационное и электромагнитное воздействие.

На основе результатов лабораторных и полевых экспериментов разработана расчетная модель динамического воздействия на напряженный фрагмент разлома и создана ее численная реализация. Показано, что асимметрия нагружения и разгрузки приводят к возможности накопления остаточных перемещений на межблоковом контакте даже при весьма малых по-

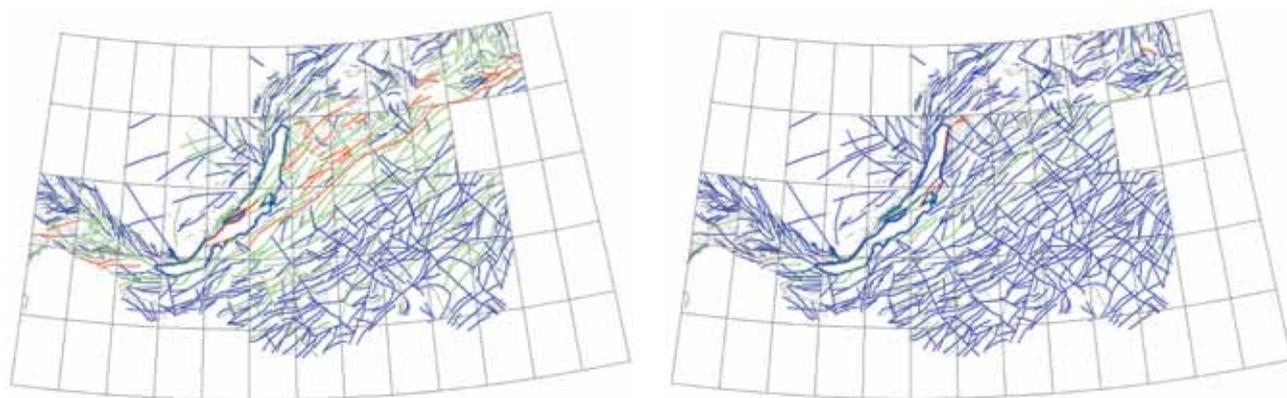
сравнению с прочностью геоматериала амплитудах динамического воздействия.

По результатам публикаций и собственным данным созданы базы данных, содержащие сведения о проявлениях триггерных эффектов в геосистемах и результаты инструментальных измерений параметров блоковых движений при подземных взрывах. На основе обработки данных по наведенной сейсмичности установлено, что существуют локальные области, значительно более чувствительные к сейсмическому воздействию, чем в среднем по массиву.

Разработаны алгоритм и программный комплекс для определения количественного индекса сейсмической активности. Выполнена апробация метода на примере исследований вариации пространственно-временной активности разломов Байкальской рифтовой системы. Расчеты позволили выявить в Байкальской рифтовой системе группу активных за последние 40 лет разломов и классифицировать их по интенсивности сейсмических событий, а также определить квазипериодичность их активизации (рис. 2).



**Рис. 1.** Иллюстрация процесса формирования динамической неустойчивости на модельном межблоковом контакте при многократном динамическом воздействии. В достаточной мере условно можно выделить 4 этапа деформирования. На первом участке жесткость трещины при повторных воздействиях постепенно возрастает, однако по мере приближения кумулятивного межблокового перемещения к предельному значению  $u_p$ , скорость этого процесса снижается. На втором участке процессы упрочнения и разупрочнения контакта примерно компенсируют друг друга, однако, по мере накопления перемещения текущая прочность контакта начинает постепенно снижаться, что приводит к превалированию разупрочнения, которое становится очевидным на участке 3. На четвертом участке наступает режим скоростного разупрочнения, что приводит к катастрофическому снижению жесткости и динамической неустойчивости.



**Рис. 2.** Классификация разломов Байкальской рифтовой зоны на основе количественного индекса сейсмической активности в период 1966–1970 гг. (слева) и 1996–2000 гг. (справа). Красные линии  $\xi \geq 1$  (высокая активность); зеленые  $1 > \xi > 0,1$  (средняя активность); синие  $0,1 \geq \xi > 0$  (низкая активность).

Разработана методика оценки структурных характеристик отдельной разломной зоны по результатам измерений параметров микросейсмичности.

С помощью 3D модели рассчитаны плотности тока, генерируемые в земной коре, электрическим диполем МГД-генератора для геологических условий Бишкекского геодинамического полигона. Результаты расчетов сопоставлены с аналитическими оценками. Проект № 09-05-12023-офи\_м.

**«Новые технологии поиска и разведки углеводородов электромагнитными методами на шельфе северных морей и прилегающих территориях (теоретико-вычислительные исследования)»**

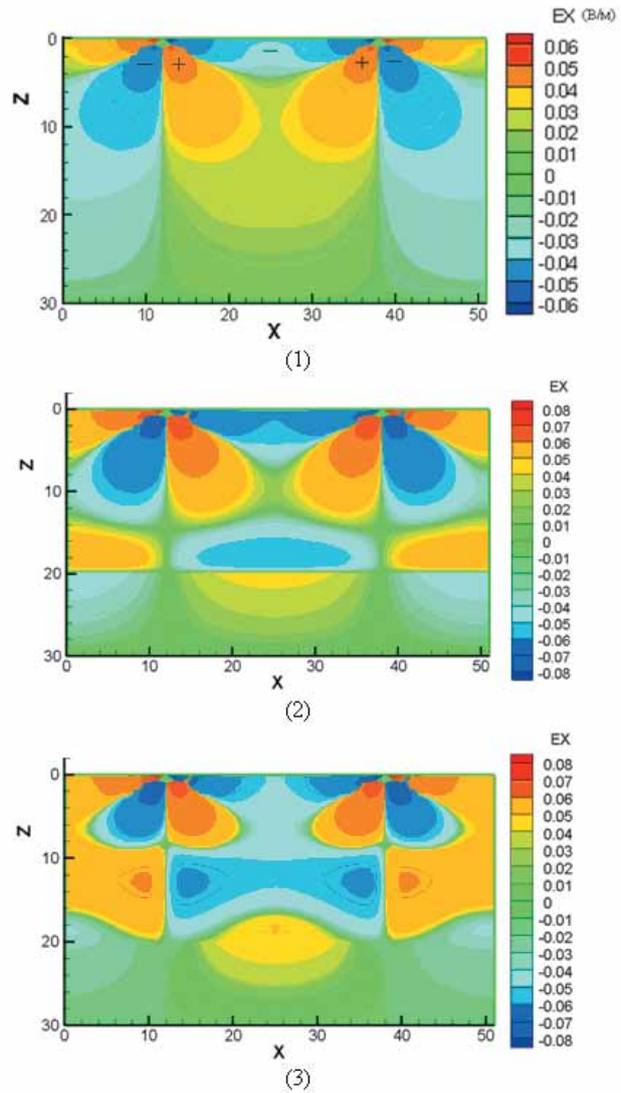
*Руководитель: М.И. Эпов*

В настоящее время особенно актуальны исследования континентального шельфа и транзитных зон северных морей, где имеются хорошие перспективы для поисков новых месторождений углеводородов. По предварительным оценкам, только на шельфе Северного Ледовитого океана содержится 25 % мировых запасов нефти и газа. В морской геофизической разведке широко используются электромагнитные методы, для которых первоочередной задачей является разработка новых теоретически обоснованных технологий. В ходе реализации проекта разработаны новые методы и подходы к решению задач морской геоэлектрики, основанные на незамеченном исследователями ранее градиенте электропроводности морской воды.

В результате исследования были разработаны и реализованы в виде программного комплекса алгоритмы решения прямых задач трехмерного моделирования монохроматических и нестационарных электромагнитных полей на базе векторного метода конечных элементов на тетраэдральной сетках.

Впервые выполнено трехмерное моделирование монохроматических электромагнитных полей в средах, где электропроводность морской воды изменяется с глубиной.

Наличие градиента электропроводности в морской воде подчеркивает влияние антиклинальных структур. Наличие объемных зарядов существенно изменяет характеристики геометрического затухания электрического поля и



**Рис. 3.** Распределение компоненты  $E_x^{re}$  напряженности электрического поля в морской воде, создаваемого двумя электродами на поверхности воды, при различных представлениях коэффициента электропроводности  $\sigma$  от глубины.  $z \in [ 0,20 ]$  – морская вода,  $z \in [ 20,30 ]$  – подстилающая среда с  $\sigma = 0,1$  См/м.

Электропроводность морской воды:

- 1)  $\sigma = 6$ ;
- 2)  $\sigma(z) = \frac{z}{10} + 5$ ; 3)  $\sigma(z) = -\frac{4}{400}z^2 + \frac{6}{20}z + 5$ .

открывает новые возможности для проектирования установок, сигнал в которых слабо зависит от шунтирующего влияния морской воды. Однородность морской толщи открывает возможность применения высокоэффективных установок с геометрической и частотной фокусировкой. Энергетические характеристики судовых генераторов позволяют получить достаточный для измерения сигнал даже в дифференциальных установках.

Вычислительные схемы базируются на векторном методе конечных элементов, дискретизация области моделирования — тетраэдральная неструктурированная сетка с локальными сгущениями, локализованными у источников электромагнитного поля: электроды, соленоидальные токовые катушки, тороидальные катушки.

В качестве базисных функций использовались иерархические векторные базисные функции вплоть до третьего полного порядка, обеспечивающие непрерывность тангенциальных компонент напряженности электрического (магнитного) поля и скачок нормальных компонент на межфрагментарных границах, разделяющих подобласти с различными коэффициентами электропроводности, диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости, что является необходимым условием выполнения закона сохранения заряда. Кроме того, реализованные алгоритмы обеспечивают процессы моделирования электромагнитного поля в областях, во фрагментах которых коэффициенты электропроводности, диэлектрической проницаемости являются функциями глубины или любой другой пространственной координаты. Дискретные аналоги вариационных формулировок — системы линейных алгебраических уравнений большой размерности, матрицы которых имеют разреженную структуру, — решались специальным многоуровневым алгоритмом, обеспечивающим быструю и устойчивую сходимость и в дальнейшем позво-

ляющим реализовать эффективные процедуры распараллеливания.

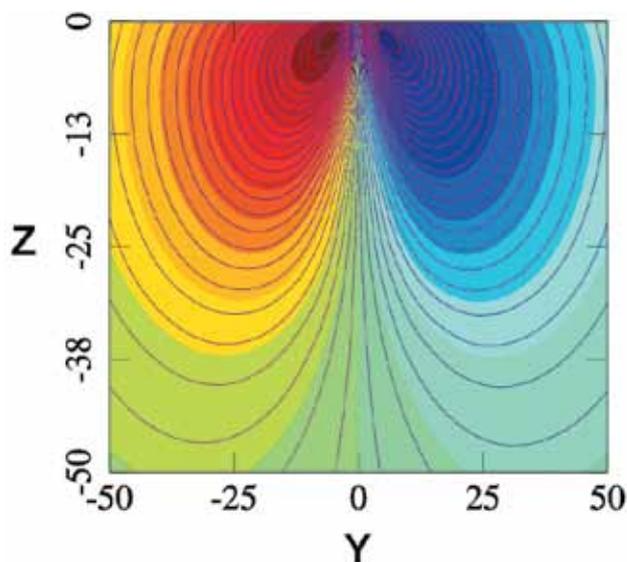
Результаты моделирования для двух вариантов возбуждения электромагнитного поля приведены на рис. 3–5: электроды, соленоидальная и тороидальная катушки.

Проведен полномасштабный натурный эксперимент на соленом озере Яровое (Алтайский край). Геоэлектрический разрез озера и осадочного чехла с большой степенью подобия повторяет объекты шельфа северных морей. Получены кондиционные материалы разрабатываемыми и адаптируемыми в проекте методами морской электроразведки, термометрии и гидрогеохимии. В настоящее время выполняется обработка и интерпретация материалов.

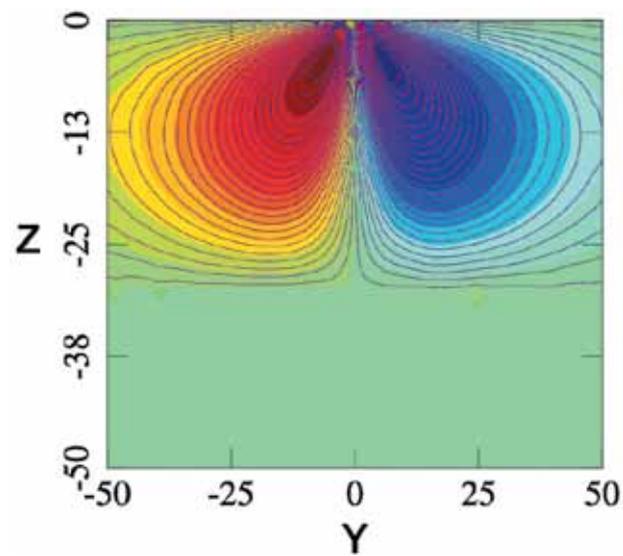
Озеро расположено в Кулундинской степи Алтайского края. Общая площадь озера составляет 90 кв. км, средняя глубина 6–8 м. Работы проведены в зимнее время 2010 г. при толщине ледового покрова в 60–70 см.

Целью этих исследований являлась оценка эффективности систем «возбуждения-регистрации» на основе многокомпонентных измерений ЗСБ в береговой зоне и на акватории водоема с повышенной концентрацией солей.

В первоочередные задачи входило: моделирование процессов «возбуждения-регистрации» электромагнитных полей методом ЗСБ с использованием контролируемых источников в условиях, приближенных к транзитным и шельфовым зонам; определение технических



**Рис. 4.** Распределение компоненты  $E_x^{im}$  напряженности электрического поля в среде с  $\sigma = 5$  См/м, создаваемого соленоидальной катушкой, ток 1 А, частота 100 Гц.



**Рис. 5.** Распределение компоненты  $H_x^{im}$  напряженности магнитного поля в среде с  $\sigma = 5$  См/м, создаваемого тороидальной катушкой, ток 1 А, частота 100 Гц.

требований к аппаратуре, предназначенной для этих электроразведочных наблюдений; выработка методических рекомендаций по выбору оптимальных установок для высокопроизводительных профильных и площадных измерений; а также построение геоэлектрической модели исследуемого участка.

В процессе полевых работ был произведен комплекс измерений на траверзе берег-акватория методом ЗСБ, в различных модификациях:

- соосные зондирования с различными моментами генераторных и измерительных контуров;
- многоразносные зондирования от закрепленного источника (генераторного контура);
- многоразносные зондирования от закрепленного источника (электрическая линия АВ).

При этом были использованы две системы регистрации сигнала: «Импульс» (ФГУП СНИИГГиМС, г. Новосибирск) и «Байкал», (Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск). Небольшие габариты и масса полевых модулей обеспечивают мобильность размещения пунктов регистрации для профильных и площадных работ с высокой пространственно-временной плотностью. Полоса регистрации (расстояния от геометрического центра генераторной установки) определяется только энергетическими параметрами генераторной установки.

В результате экспресс-интерпретации полевых данных получены предварительные геоэлектрические разрезы. На рис. 6–7 представлены геоэлектрические разрезы, построенные

по данным ЗСБ с использованием различных систем измерений. Начальные геоэлектрические модели были выбраны с использованием имеющихся геологических априорных данных в программных комплексах моделирования и инверсии, разработанных в ИНГГ СО РАН (комплексы ЭРА, EMS). Далее модели и разрезы будут уточнены и дополнены на основе углубленной интерпретации полученных данных.

В результате работы получен полный геоэлектрический разрез осадочного чехла и верхней части фундамента береговой зоны и акватории озера. Присутствие слоя соленой воды влияет на глубинность исследований при использовании генераторной линии АВ и установки Q-q.

Были сделаны методические выводы о возможности наиболее экономичной площадной съемки в транзитных зонах по технологии площадных многоразносных зондирований ЗСБ от мощного закрепленного источника электромагнитного поля:

- генераторная петля на берегу, измерения на акватории локальными приемными установками с линейными размерами 5x5÷10x10 метров, с эквивалентным моментом регистрации 200x200÷600x600 м<sup>2</sup>;
- генераторная петля в акватории, измерения на суше локальными приемными установками с линейными размерами 5x5÷10x10 метров, с эквивалентным моментом регистрации 200x200÷600x600 м<sup>2</sup>.
- Определены технические требования к регистрирующей аппаратуре; выявлены возмож-

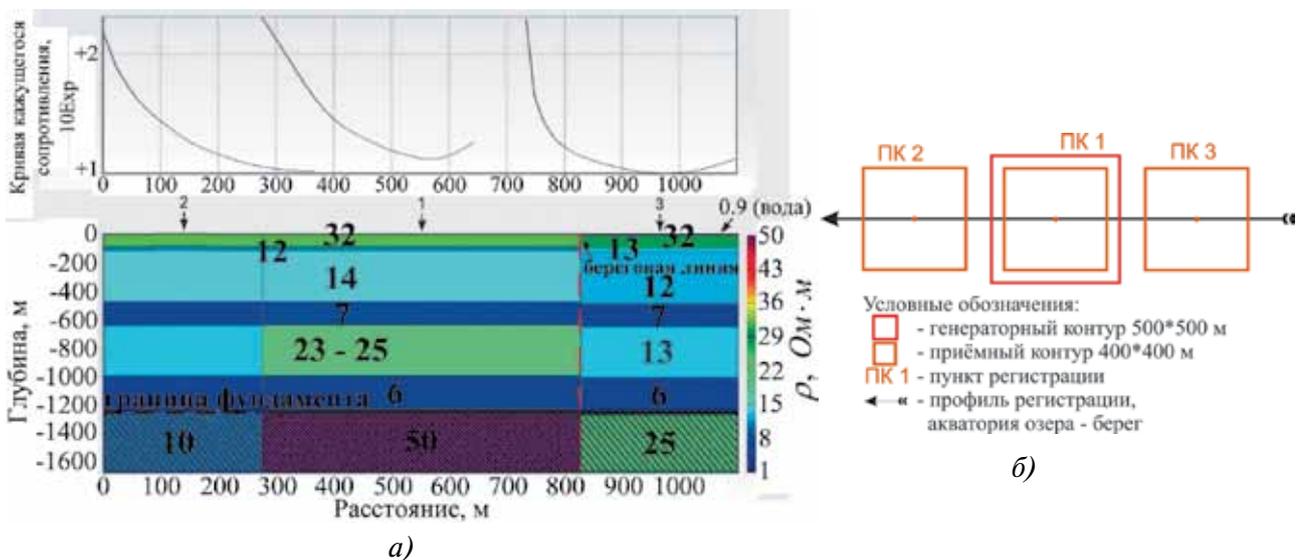


Рис. 6. а) полевые кривые ЗСБ и глубинный геоэлектрический разрез по траверзу берег-акватория озера, б) система наблюдений.

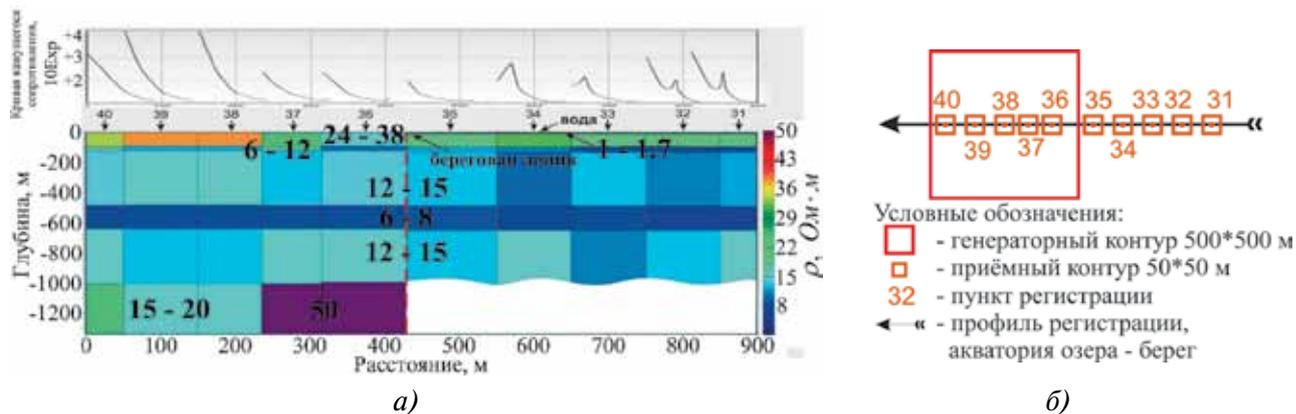


Рис. 7. а) полевые кривые ЗСБ, многоканальные зондирования от закрепленного магнитного диполя и геоэлектрический разрез с выходом на акваторию озера; б) система наблюдений.

ности использования регистрирующей аппаратуры «Байкал» для профильной и площадной съемки. Проект № 09-05-12047-офи\_м.

#### «Разработка физических основ искусственного электромагнитного воздействия на деформационные процессы в земной коре»

Уменьшение последствий сильных землетрясений представляет собой сложную научно-техническую проблему, имеющую большое социальное и экономическое значение. Обширные территории России и многих стран СНГ характеризуются высоким уровнем сейсмичности. За последние 50 лет сильные землетрясения унесли здесь около 200 тыс. жизней, а материальный ущерб составил десятки миллиардов рублей. В мире ущерб от землетрясений, по оценкам ЮНЕСКО, ежегодно исчисляется миллиардами долларов.

В последние десятилетия в разных странах накоплен обширный экспериментальный материал по наблюдениям предвестников землетрясений. Установлено, что подготовка землетрясений сопровождается аномальными изменениями обычно слабой сейсмичности, электрических, магнитных свойств пород, деформаций и наклонов земной поверхности, уровня подземных вод, их химического состава и другими необычными явлениями природы. Однако осуществленные в разных странах попытки создать на основе выявленных предвестниковых аномалий геофизических полей методику прогноза землетрясений пока не дали желаемого результата.

Развитие науки и техники в конце XX в. указало на возможность нового подхода к проблеме

уменьшения последствий сильных землетрясений, а именно воздействия физическими полями на структуры в земной коре для искусственной разрядки избыточных тектонических напряжений и снижения сейсмической опасности.

По мере изучения прогноза землетрясений и систематизации их предвестников обнаружилось, что землетрясения могут быть инициированы физическими воздействиями как природного: сильные землетрясения, сильные лунные приливы, магнитные бури и др., — так и техногенного происхождения: заполнение плотинных водохранилищ, ядерные взрывы, промышленные взрывы, разработка полезных ископаемых шахтным способом и в огромных открытых карьерах, бурение многочисленных добывающих и нагнетательных скважин на месторождениях нефти и газа и др. Заметное влияние на сейсмический режим оказывают и воздействия сильными акустическими полями, осуществляемые посредством мощных вибросейсмических источников, и электромагнитные воздействия, возникающие при пусках мощного импульсного источника — МГД-генератора.

Эти исследования показали, что мощное воздействие на земную кору приводит к уменьшению числа сравнительно более сильных землетрясений и увеличению числа сравнительно более слабых, то есть вызывает разрядку накопленных в коре напряжений. Было выяснено, что динамические воздействия перераспределяют сейсмичность, уменьшая число сильных землетрясений за счет увеличения суммарной энергии слабых сейсмических событий. Возникает основание надеяться, что можно предотвратить сильные землетрясения или понизить их магнитуду до безопасного уровня, если сво-

евременно произвести соответствующую обработку земной коры в регионе готовящегося сейсмического события.

В результате работы был выполнен анализ каталогов региональной сейсмичности Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий в периоды до, во время и после пусков МГД-генератора и долговременного эксперимента с электроимпульсной установкой ЭРГУ-600. Для последующих исследований сформированы рабочие базы каталогов землетрясений, очищенные от ошибок формата и дублированных записей. Исследована эволюция представительности каталогов землетрясений в пространстве и времени. Установлено, что представительными (регистрируемыми без пропусков) на площадке Бишкекского геодинимического полигона для детального каталога и каталога KNET являются землетрясения с энергетическим классом  $K \geq 7,0$  за весь период наблюдений каждого из каталогов.

Выполнен обзор существующих методов анализа временных рядов наблюдений, их развитости, обоснованности, практики использования, который позволил выбрать в качестве базового метода для решения задачи выявления отклика сейсмического режима на энерговоздействие метод Грассбергера–Прокаччия. Найдено, что метод Грассбергера–Прокаччия позволяет судить о появлении на фоне белого шума гармонического сигнала с постоянной или спадающей по экспоненте амплитудой, если отношение сигнал/шум не ниже 0,1–0,3. Анализ сейсмических каталогов позволил выявить диапазон событий представительного энергетического класса. На основе каталогов землетрясений созданы временные ряды изменения сейсмической активности, к которым применяется метод Грассбергера–Прокаччия. Разработано программное обеспечение для обработки сейсмических каталогов при помощи методов нелинейной динамики. С использованием метода Грассбергера–Прокаччия реконструкции аттракторов проведен анализ сейсмического каталога сети KNET за 1994–2008 гг., который был разбит на периоды 1994–1999 гг. и 2000–2005 гг. (до и после пусков ЭРГУ-600). Показано, что эти два периода существенно отличаются значениями корреляционной размерности и размерности пространства вложения, что свидетельствует о влиянии пусков ЭРГУ-600 на региональную сейсмичность (область  $200 \times 200$  км<sup>2</sup> вокруг излучающего диполя).

С целью выявления влияния природных факторов на сейсмический режим выполнен корреляционный анализ вариаций геомагнитных данных, солнечных вспышек и лунно-солнечных приливов с региональной сейсмичностью. Предварительный анализ данных геомагнитных наблюдений позволил установить значительные изменения абсолютных амплитуд SQ-вариаций во времени. Во временных рядах присутствуют ярко выраженные частотные компоненты, в том числе и компоненты, которые коррелируют с лунными приливами. Предварительное сопоставление с сейсмической активностью региона позволило установить совпадение периодов сейсмической активизации с максимальными значениями мощности лунно-месячной компоненты геомагнитного процесса. Отмечено, что при наличии в разрезе земной коры высокопроводящих горизонтов задача воздействия магнитного поля на напряженно-деформационные процессы в коре сводится, как и в случае с электрическим возбуждением (ЭРГУ-600 с электрическим диполем), к взаимодействию электрического тока с геологическими структурами, находящимися в напряженно-деформированном состоянии. Проведен анализ среднеквадратического отклонения (СКО) сейсмического шума от среднего значения в период крупных солнечных вспышек, произошедших в 2000–2006 гг. и сопровождаемых магнитными бурями. Отражением этих явлений стало повышение значений СКО сейсмического шума. Увеличение СКО сейсмического шума обнаруживает более устойчивую корреляцию с магнитной бурей, чем с предшествующей ей солнечной вспышкой. По кумулятивным графикам также отмечен прирост СКО и некоторая активизация сейсмических событий, происходящая с задержкой после дня совмещенных вспышек. Магнитные бури начинаются раньше сейсмической активизации, причем, интервал времени между приростом сейсмичности и началом магнитных бурь согласуется с результатами других исследователей о соответствующих задержках.

Проведены эксперименты на модельных образцах при последовательном сочетании циклов упругого нагружения с этапами квазистатического деформирования (КСД). Установлена кинетика процесса релаксации, обусловленная накопленной энергией при упругом нагружении и структурой электромагнитного поля воздействия. Кинетика релаксации и искомые

изменения  $\sigma$  при энерговоздействии на этапах КСД позволили выбирать уровни энергообмена в процессе развития механической неустойчивости образцов. Установлены количественные соотношения параметров энерговоздействия и индуцированного акустоэмиссионного отклика, отражающие процесс релаксации при развитии механической неустойчивости. При достижении в образце критического упрочнения, на нелинейном участке развития неустойчивости, электромагнитное воздействие инициирует ускорение процесса макроразрушения. Это означает, что в геофизической среде, в условиях постоянно действующих эндо- и экзогенных факторов, проведение на нелинейном этапе управляемого энерговоздействия как способа снижения рисков макроразрушения практически невыполнимо. Эксперименты на образцах проведены на программно-аппаратном измерительном комплексе. Система позволяет обрабатывать записи волновых форм сигналов акустической эмиссии в потоковом режиме и дает информацию об энергии, амплитуде, длительности, спектрах сигналов. Сформирован целевой информационный банк данных по кинетике релаксационного процесса. В банк включены также материалы обработки индуцированного акустоэмиссионного отклика.

Создана установка для лабораторных исследований сейсмоэлектрических и электросейсмических эффектов на образцах природных горных пород и искусственных материалов. Разработаны программное обеспечение и методика физического моделирования сейсмоэлектрических и электросейсмических эффектов 1-го и 2-го рода. Проведено физическое моделирование эффектов на 150 образцах. Выявлены качественные зависимости эффектов от петрофизических характеристик образцов.

Выполнен расчетный анализ плотностей токов наводимых в земной коре при пусках МГД-генератора (ток в диполе 1,5–2,0 кА) и электроимпульсной установки ЭРГУ-600 (ток в диполе 0,6 кА) на Бишкекском геодинамическом полигоне с использованием 3D модели земной коры. Показано, что плотность тока изменяется от  $10^{-3}$ – $10^{-7}$  А/м<sup>2</sup> под диполем до  $10^{-11}$  А/м<sup>2</sup> на расстоянии 500 км от диполя. Непосредственно под диполем плотность тока существенно зависит от глубины. При изменении глубины от 0 до 20 км плотность тока изменяется от  $10^{-3}$  до  $10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>. С увеличением расстояния от диполя по горизонтали зависимость плотности

тока от глубины уменьшается. На расстоянии более 30–50 км плотность тока практически не зависит от глубины. На основе полученных результатов выполнены расчетные исследования одного из возможных механизмов электрического воздействия на сейсмический режим — повышения внутривязного давления вследствие джоулевого тепловыделения при протекании тока в горных породах. Предложен механизм и разработана модель роста давления в ближней зоне действия мощного тока. Показано, что расчет импульса механического давления при протекании электрического тока в пористой двухфазной среде может быть выполнен, в пренебрежении теплопроводностью, посредством решения нестационарного уравнения пьезопроводности с джоулевым тепловыделением. На основе полученных результатов сделана оценка возможного метода электрического воздействия на разломную зону для формирования трещин и реализации подвижек по разлому с целью разрядки тектонических напряжений.

Теоретически обобщены результаты о влиянии электромагнитных полей искусственного и естественного происхождения на деформационные процессы в земной коре для выработки физических принципов технологий снижения сейсмической опасности путем искусственной частичной разрядки тектонических напряжений. Проект № 09-05-12059-офи\_м.

**«Иерархически-интегрированный комплексный мониторинг напряженно-деформированного состояния (НДС) во взаимосвязи с природными и техногенными процессами в интенсивно изменяемой геологической среде природно-технических систем (ПТС)»**

*Руководитель: А.А. Козырев*

В результате выполнения работы разработана концепция иерархически-интегрированной системы активного междисциплинарного мониторинга напряженно-деформированного состояния в верхних слоях земной коры во взаимосвязи с природными и техногенными процессами в интенсивно изменяемой геологической среде и поиск информативных предвестников сейсмодинамических процессов (рис. 8).

Она предусматривает согласование разноплановых факторов и типов данных в единую

систему сбора, контроля, анализа и управления состоянием крупных природно-технических систем (ПТС). Реализация проекта осуществляется на междисциплинарных принципах и сотрудничестве многих научных и производственных организаций и специалистов в различных областях знаний и техники.

Применительно к Ковдорской ПТС на основе этой концепции был организован полигон, на котором впервые отработаны методика, научно-практические подходы, технические и технологические аспекты и практическое взаимодействие участников при построении и эксплуатации иерархически-интегрированной системы активного междисциплинарного мониторинга.

Выявлены и ранжированы основные природные и техногенные факторы воздействия на напряженно-деформированное состояние геологической и геомеханической сред ПТС Кольского региона.

В первом приближении реконструирована эволюция палеонапряжений Ковдорской ПТС массива, начиная с протектонической

(постмагматической) стадии. Принципиально новым является прослеживание последовательности и установление взаимосвязей между отдельными этапами тектонических (сейсμοдинамических) событий, что дает надежные основания для обоснования тенденций и прогнозов дальнейшего развития ПТС.

Изучены и сопоставлены глобальные и региональные вариации электромагнитного поля, а также региональной и локальной сейсмичности в рамках Ковдорской, Хибинской и Ловозерской ПТС.

Установлено, что природная сейсмичность в Кольском регионе не обнаруживает прямой корреляции между частотой событий и величиной их энерговыделения, в связи с чем не отмечается контрастного расчленения в графике суммарного энерговыделения по годам (график сглажен); графики частоты сейсмособытий и суммарного энерговыделения обнаруживают две периодичности: 2–3-летнюю и 9–10-летнюю (незначительно рассогласованные между собой); сейсмичность в Хибинской, Ловозерской и Ковдорской ПТС имеет существенные

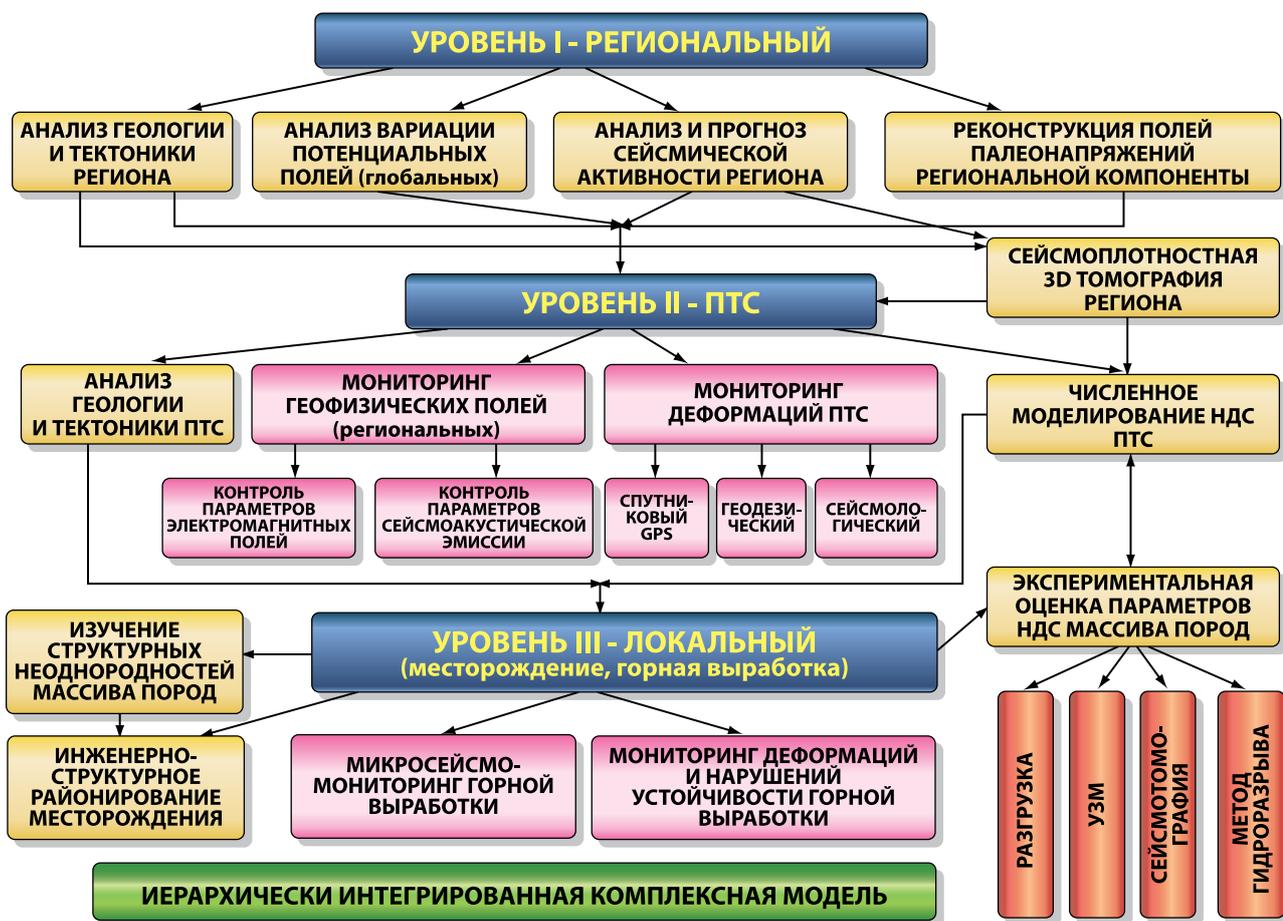


Рис. 8. Блок-схема иерархически-интегрированного комплексного мониторинга.

различия в их частоте проявления и энергетических характеристиках как в многолетних, так и в сезонных временных рядах, и рассогласованы между собой, что свидетельствует, в первую очередь, об автономной природе главных сейсмогенерирующих факторов; четко выраженной корреляции между глобальными/региональными вариациями электромагнитного поля (ЭМП) и региональной/локальной сейсмичностью не установлено, однако на более тонком уровне такие связи вероятны и требуются дополнительные исследования; в проанализированных многолетних рядах наиболее проявлены периодичность ЭМП с  $T \sim 66$  мес. и сейсмичность с  $T \sim 72$  мес.

Разработана методика прогноза параметров самообрушений массива пород на основе выявления растягивающих деформаций и ориентировки их площадок в подработанном массиве.

Средствами микросейсмического мониторинга выявлены и подтверждены результатами численного моделирования сейсмоактивные зоны в массиве горных пород в районе карьера рудника «Железный» ОАО Ковдорский ГОК.

Разработаны научно-методические основы геоинформационного обеспечения безопасной и эффективной отработки месторождений полезных ископаемых открытым способом в условиях тектонически-напряженных массивов пород, заключающиеся в поэтапном построении частных моделей массива пород в иерархическом ряду от рассматриваемой области верхней части земной коры до конкретного участка карьера и комплексном мониторинге устойчивости элементов открытой системы разработки с использованием методов контроля, адекватных масштабу рассматриваемых участков массива пород. Проект № 09-05-12064-офи\_м.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДООСНАЩЕНИЕ ТЕЛЕСКОПА РТТ-150 ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ КОСМОЛОГИИ И ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ СО СВЕРХВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ<sup>1</sup>

Сазонов С.Ю., Буренин Р.А.<sup>2</sup>

### Automatization and modernization of the RTT-150 telescope for application to observational cosmology and studies of astrophysical objects with ultra-high temporal resolution

При поддержке РФФИ проводятся работы по улучшению характеристик российско-турецкого 1,5-метрового телескопа (РТТ-150) и его фокальных приборов с целью обеспечить возможность проведения исследований в области наблюдательной космологии и изучения сверхбыстрых процессов, происходящих в астрофизических объектах. В результате установки новой быстрой ПЗС-матрицы появилась возможность строить оптические изображения вплоть до времен экспозиции около 3 мсек практически без шума считывания. По завершении работ по автоматизации и дооснащению телескопа эффективность спектроскопических наблюдений вырастет настолько, что можно будет снимать спектры нескольких тысяч объектов за год. Это позволит эффективно использовать телескоп РТТ-150 для оптической поддержки будущего рентгеновского обзора всего неба орбитальной обсерваторией «Спектр-Рентген-Гамма».

**Ключевые слова:** космология, рентгеновская астрономия, оптическая астрономия, скопления галактик, черные дыры, нейтронные звезды.

With support from the RFBR, efforts are undertaken to enhance the capabilities of the Russian-Turkish 1.5-m telescope (RTT-150) and its focal instruments to enable observational cosmology studies and exploration of ultrafast processes in astrophysical objects. The installation of a new fast CCD has made it possible to build optical images using exposures as short as 3 milliseconds without readout noise. Upon completion of automatization and modernization activities at the telescope, the efficiency of spectroscopic observations will increase so that several thousand spectra can be obtained per year. This will make RTT-150 an efficient instrument for the optical support of the future all-sky X-ray survey performed by the Spectrum-Roentgen-Gamma orbital observatory.

**Keywords:** cosmology, X-ray astronomy, optical astronomy, clusters of galaxies, black holes, neutron stars.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-12384-офи\_м).

<sup>2</sup> Сергей Юрьевич Сазонов, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт космических исследований РАН, e-mail: sazonov@iki.rssi.ru.



Родион Анатольевич Буренин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт космических исследований РАН, e-mail: rodion@hea.iki.rssi.ru.



## Введение

Российско-турецкий 1,5-метровый телескоп (РТТ-150) — один из лучших оптических телескопов, принадлежащих России. Он установлен в месте с хорошим астрономическим климатом (в Государственной обсерватории Турции, в 60 км от г. Анталя, на высоте 2500 м), имеет прекрасную оптику, изготовленную на предприятии ЛОМО, и укомплектован современными научными приборами. Наблюдательное время телескопа делится в следующей пропорции: 45 % — Казанский государственный университет (КГУ), 15 % — Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 40 % — различные университеты Турции.

Сам по себе 1,5-метровый телескоп является, по современным меркам, небольшим. Однако существенная доля наблюдательного времени телескопа используется для наблюдений космических источников рентгеновского излучения. Таким образом достигается объединение двух направлений наблюдательной астрофизики. Основной задачей телескопа является наземная поддержка крупных космических проектов в области астрофизики высоких энергий, в первую очередь — обсерватории гамма-лучей INTEGRAL и будущей рентгеновской обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма».

## Цели проекта, поддержанного РФФИ

При поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-02-12384-офи\_м), начиная с 2009 г., проводятся работы по улучшению характеристик РТТ-150, в результате которых наблюдения на телескопе можно будет эффективно использовать для решения следующих фундаментальных задач астрофизики и космологии.

## Строение и эволюция Вселенной

Одним из методов определения космологических параметров является наблюдение за образованием скоплений галактик в ходе расширения Вселенной. Необходимые для этого выборки близких и далеких скоплений галактик получают с помощью обзоров неба в рентгеновском диапазоне энергий. Так, например, по данным рентгеновского телескопа РОСАТ нашей группой был получен самый большой

каталог (около 100) далеких массивных скопленных галактик (обзор площадью 400 кв. град.; Буренин Р.А. и др., 2007 г. [2]). По данным этого обзора было выполнено наиболее точное на сегодняшний день измерение уравнения состояния темной энергии (Вихлинин А.А. и др. 2009 г. [3]).

Многочисленные факты свидетельствуют о том, что образование и эволюция галактик сопровождалась ростом сверхмассивных черных дыр в их ядрах. В т.н. активных ядрах галактик (АЯГ) мы можем наблюдать за тем, как центральная черная дыра выделяет огромное количество энергии в результате аккреции на нее межзвездного газа. Аналогично скоплениям галактик, наиболее полные выборки АЯГ получают с помощью обзоров неба в рентгеновском диапазоне энергий. Так, по данным жесткого рентгеновского обзора всего неба европейской обсерватории (с российским участием) INTEGRAL нашей группой была получена выборка более 100 близких сейфертовских галактик (Кривонос Р.А. и др., 2007 г. [4]; Сазонов С.Ю. и др., 2007 г. [5]). Многие из этих объектов характеризуются сильным фотопоглощением на луче зрения и поэтому не были обнаружены ранее в оптических и мягких рентгеновских обзорах неба.

При проведении исследований скоплений галактик и АЯГ должна быть обеспечена наземная оптическая поддержка рентгеновских обзоров. Например, с помощью телескопа РТТ-150 мы провели отождествление и измерили красные смещения для существенной части скопленных галактик из обзора 400d и АЯГ из обзора всего неба обсерватории INTEGRAL.

Ключевым проектом следующего десятилетия в области космологии и рентгеновской астрономии станет российская обсерватория «Спектр-Рентген-Гамма» (СРГ). Она будет выведена на орбиту в 2013 г. СРГ выполнит обзор всего неба с рекордной чувствительностью. Предполагается, что будет открыто несколько миллионов АЯГ и порядка сотни тысяч скопленных галактик. Обзор подобного качества и полноты позволяет решать самые амбициозные задачи современных космологии и астрофизики. Успех обсерватории СРГ будет критическим образом зависеть от эффективности оптического отождествления и измерения красных смещений рентгеновских источников, обнаруженных в ходе обзора. К сожалению, имеющиеся данные спектроскопических обзоров,

в частности, Слоановского цифрового обзора (SDSS), не покрывают всего неба. Поэтому крайне важно иметь возможность проводить независимые спектроскопические наблюдения большого числа объектов.

В результате автоматизации системы управления и улучшения характеристик телескопа РТТ-150 будет обеспечена возможность проведения спектроскопических наблюдений большого числа скоплений галактик и АЯГ, обнаруженных во время обзора неба обсерваторией СРГ.

### *Процессы в горячей замагниченной астрофизической плазме при аккреции вещества на компактные объекты*

В настоящее время в исследованиях аккрецирующих компактных объектов, таких как белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры, существует достаточно большая неисследованная область — быстрая переменность излучения в оптическом диапазоне. В этом «окне» до нас доходит, в частности:

1. Информация о плазменных неустойчивостях, развивающихся в аккреционных колонках у поверхностей нейтронных звезд и белых карликов. Понимание механизмов таких неустойчивостей может быть полезно также и в земных лабораториях, например, в установках типа ТОКАМАК.
2. Информация о процессах пересоединения магнитного поля, создающих аномальную вязкость в астрофизических дисках.
3. Информация о геометрии излучающей области при взрывах на поверхностях нейтронных звезд и белых карликов. Уникальные возможности по томографии областей энерговыделения в аккрецирующих системах предоставляют также затменные системы.

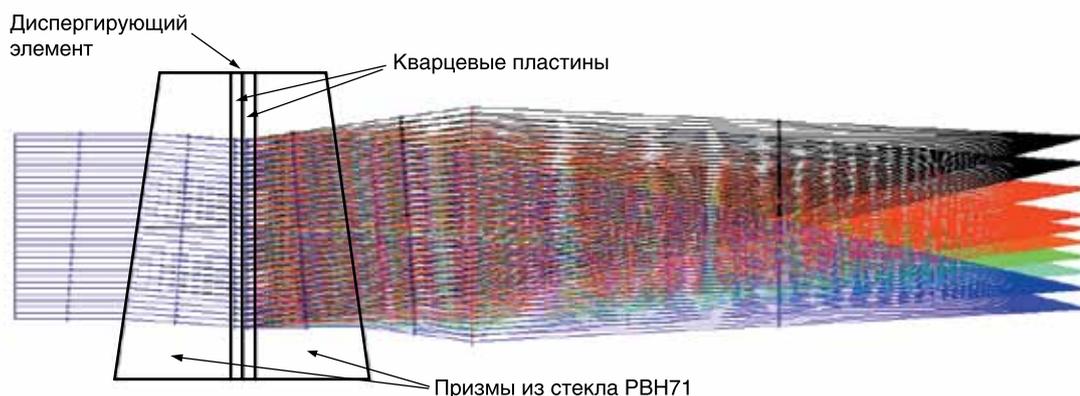
Чтобы работать в этой области, необходимы приборы с временным разрешением в доли секунд и миллисекунды. В настоящее время наиболее распространенными оптическими детекторами являются ПЗС-матрицы с временами считывания порядка секунд или десятков секунд. Для того чтобы существенно улучшить временное разрешение, часто прибегают к следующему способу: свет из фокальной плоскости телескопа по световоду отводится к фотометру, который уже может иметь временное разрешение миллисекунды и менее. При этом

полностью теряется возможность строить изображения. В результате исключается возможность исследовать аперiodическую переменность астрофизических источников, поскольку она складывается с неизвестным аперiodическим шумом дрожания атмосферы. Остается только возможность изучения периодических процессов, где влияние атмосферного шума можно исключить, используя метод наложения эпох. В частности, исследования, проведенные быстрыми фотометрами в таких приборах как OPTIMA (Штраубмайер К. и др., 2000 г. [6]) и MANIA (Бескин Г.М., и др., 1997 г. [1]) показали практическую невозможность исследования аперiodических сигналов на частотах выше 1 Гц.

Для преодоления этих ограничений необходимо иметь возможность строить изображения. Это стало возможным делать в последнее время, благодаря технологии умножения заряда при переносе — EMCCD. ПЗС-матрицы, построенные по такой технологии, позволяют достичь временного разрешения на части матрицы вплоть до нескольких миллисекунд при практически полном отсутствии шума считывания. Ввод в строй такого инструмента на телескопе РТТ-150 позволит выйти на лидирующие позиции в мире по излучению быстрой аперiodической переменности в оптическом диапазоне. Мы планируем внедрить в астрономическую практику наблюдения с высоким временным разрешением, в идеальном случае — в режиме счета отдельных фотонов.

### *Результаты, полученные на первом этапе проекта Повышение эффективности спектроскопических наблюдений*

В 2009 г. были начаты работы по повышению эффективности спектроскопических наблюдений на РТТ-150. Одним из основных источников потерь чувствительности при наблюдениях при помощи спектрометра TFOSC являются гризмы, которые используются в качестве диспергирующих элементов. Их квантовая эффективность не превышает 30 %. Однако недавно появилась возможность использовать для этих целей т.н. объемно-голографические решетки (ОГР), квантовая эффективность которых доходит до 90 %. Замена гризм на ОГР позволит увеличить квантовую эффективность при спектроскопических наблюдениях примерно в 3 раза. Однако этого еще недостаточно для того,



**Рис. 1.** Схема прохождения света через блок объемно-голографической решетки.

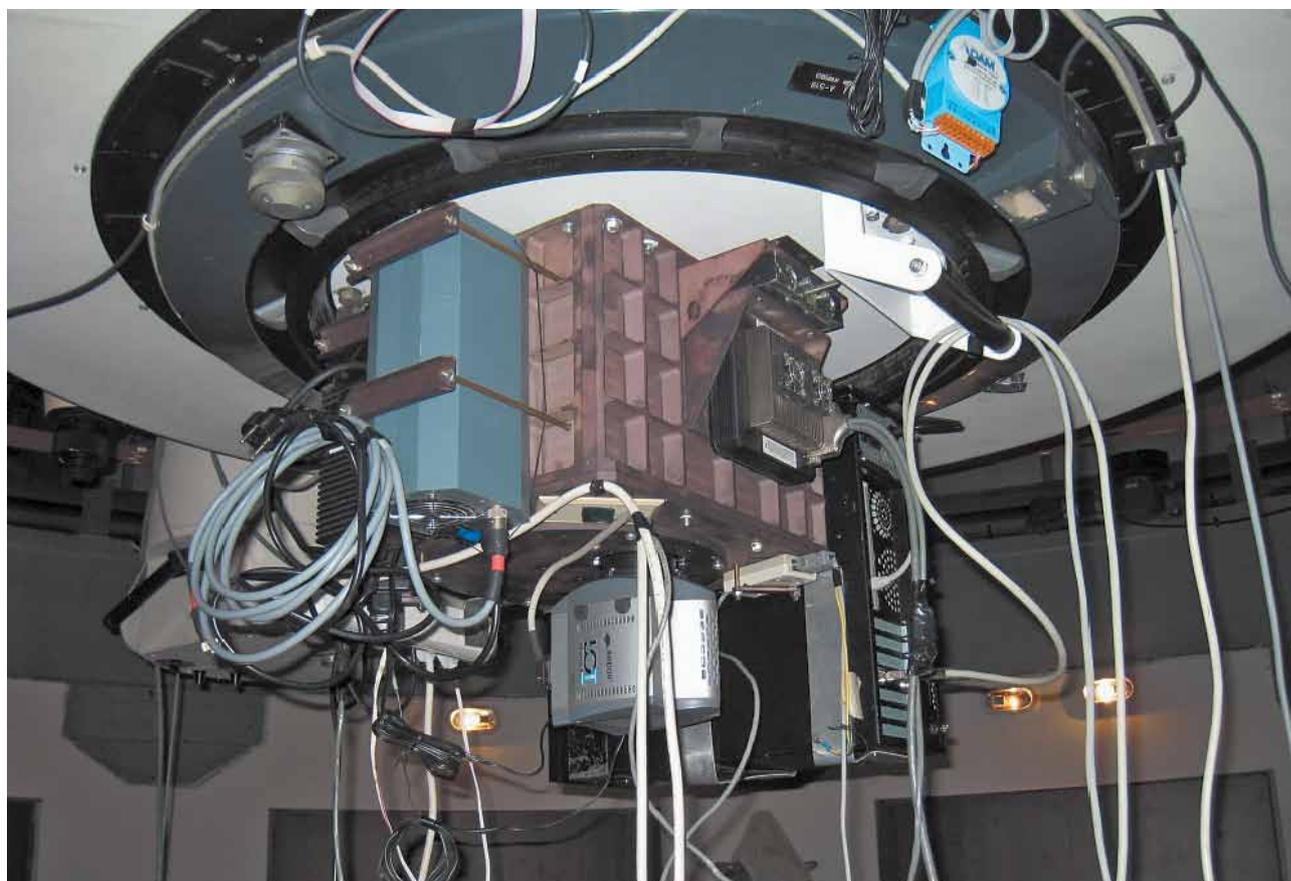
чтобы в массовом порядке получать спектры большого числа объектов. Необходимо также полностью автоматизировать наблюдения. В ручном режиме процедура постановки объекта на щель спектрометра занимает до 20 минут, а при правильной автоматизации наблюдений она может быть выполнена всего за одну минуту. Поэтому необходимо провести определенную доработку системы управления телескопа.

На первом этапе была проведена доработка математического обеспечения системы наведения, в результате чего появилась возможность

связать воедино машины управления наведением телескопа и спектрометром TFOSC, которые работают под управлением разных операционных систем (Майкрософт и Линукс). Также спроектирован блок ОГР, которым предполагается заменить призмы (рис. 1).

#### *Новая быстрая ПЗС-матрица*

Для изучения быстропротекающих процессов при наблюдениях небесных объектов на интервалах времени от десятков до сотен мил-



**Рис. 2.** Новая быстрая ПЗС-матрица с умножением заряда, установленная в фокусе РТТ-150.

лисекунд в фокусе РТТ-150 с помощью разработанных для этой цели переходных элементов была установлена новая быстрая ПЗС-матрица ANDOR iXon DU-888 (рис. 2), приобретенная при поддержке Мюнхенского технического университета. В результате появилась возможность строить оптические изображения вплоть до времен экспозиции около 3 мсек практически без шума считывания. Уже первые пробные наблюдения подтвердили работоспособность проведенных модернизаций, и высокую эффективность новой ПЗС-матрицы при проведении наблюдений быстропротекающих процессов.

Новая ПЗС-матрица производит очень большое количество данных — объем за ночь наблюдений может составлять до 1 Тб. В связи с этим были приобретены жесткие диски большого объема и проведена замена основного сервера архива телескопа в ИКИ РАН на новый. В настоящее время объем дискового пространства, доступного с нового сервера, составляет около 10 Тб. В будущем это пространство должно быть значительно расширено.

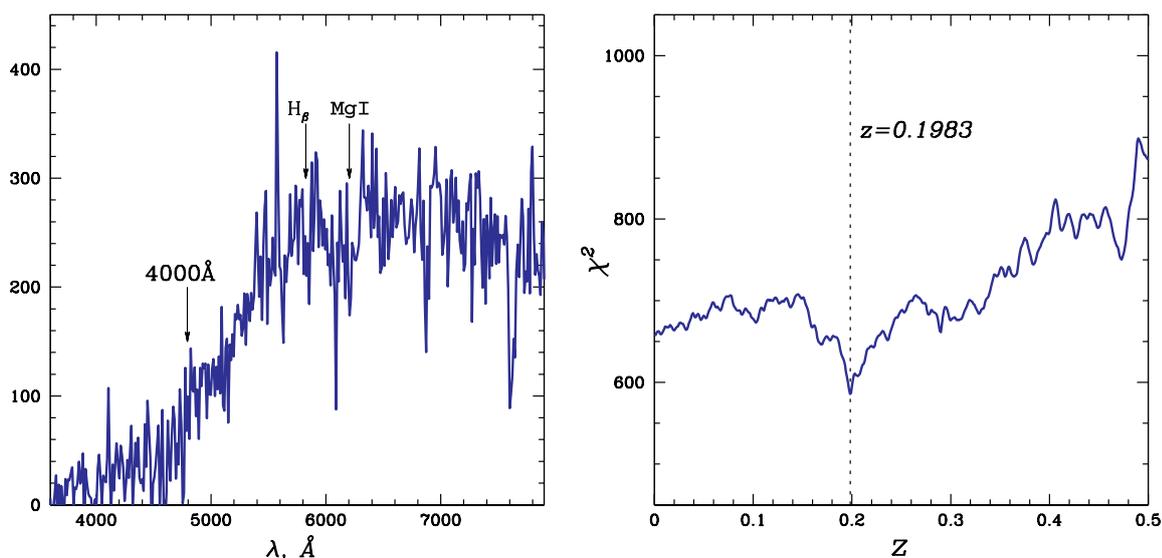
### *Астрофизические исследования с помощью телескопа РТТ-150*

Используя улучшения телескопа РТТ-150, в прошедшем году продолжились исследования различных классов рентгеновских источников.

Продолжились измерения функции масс скоплений галактик и ее космологической эволюции. Для этого при помощи спектрометра TFOSC измерялись красные смещения скопленных галактик, обнаруженных рентгеновским телескопом ROSAT (рис. 3). После завершения очередного этапа этой работы количество далеких ( $z > 0,5$ ) массивных скоплений галактик, обнаруженных в рамках одного хорошо определенного обзора, вырастет примерно вдвое.

Продолжились спектрофотометрические наблюдения выборки близких сейфертовских галактик, обнаруженных в ходе жесткого рентгеновского обзора обсерватории INTEGRAL. На основе полученных данных измерены потоки излучения в непрерывном оптическом спектре, узких и широких линиях. Эта информация необходима для измерения масс и скорости роста сверхмассивных черных дыр в современную эпоху, а также изучения физических свойств окружающих их газа и пыли.

Новой областью применения телескопа стали исследования быстрой переменности излучения аккрецирующих двойных систем. Их целью является понимание механизма неустойчивостей в горячей замагниченной плазме и проявлений аномальной вязкости в астрофизических аккреционных дисках. Для этого была введена в строй быстрая ПЗС-матрица с умножением заряда. В ноябре 2009 г. были проведены первые наблюдения при помощи новой



**Рис. 3.** Спектр, по которому было измерено красное смещение ярчайшей галактики скопления величины  $m_R = 18,2$ . В этом наблюдении выдержка составила всего 900 с. Тем не менее, как видно из рисунка справа, красное смещение галактики надежно определяется путем сравнения с шаблонным спектром эллиптической галактики. Отметим, что с применением объемно-голографической решетки выдержку можно будет уменьшить еще в 2–3 раза без потери качества измерений.

матрицы. На рис. 4 показан профиль импульса пульсара в Крабовидной туманности (период около 33 мсек) с разрешением около 7 мсек, полученный за 10 минут наблюдений. Эти пробные наблюдения подтверждают высокое качество ПЗС-матрицы и соответствие ее характеристик ожидаемым.

При помощи быстрой ПЗС-матрицы были также проведены наблюдения затменных рентгеновских двойных систем, в которых одним из компаньонов является белый карлик со сверхсильным магнитным полем (поляр). В таких системах затмения происходят на временах менее нескольких секунд, поскольку размер излучающего пятна на белом карлике составляет всего несколько сотен километров, а звезда-компаньон движется поперек луча зрения со скоростью более 100 км/с. Такие наблюдения могут быть использованы для измерения размеров полярных шапок на поверхности белых карликов. Кроме того, в спектре мощности оптической переменности полярных звезд обнаружен избыток около частоты порядка 1 Гц, который можно объяснить переменностью излучения полярных шапок белого карлика.

#### Дальнейшие планы

Работы по усовершенствованию телескопа РТТ-150 будут продолжены в 2010 г. и в последующие годы. В ближайшее время предполагается завершить работы по организации спектроскопических наблюдений в полностью автоматическом режиме. После этого наблюдения можно будет проводить без участия наблюдателя. Также планируется провести закупку набора объемно-голографических решеток, с характеристиками, которые соответствуют нашим расчетам. В первую очередь предполагается сделать решетку низкого разрешения (около 15 Å), рассчитанную на спектральный диапазон 3 500–9 000 Å, а затем — целый набор решеток с более высоким спектральным разрешением, покрывающих более узкий спектральный диапазон. В результате этих модернизаций эффективность спектроскопических наблюдений вырастет настолько, что в течение года на телескопе РТТ-150 можно будет получать спектры порядка десяти тысяч объектов.

Одним из неиспользованных преимуществ телескопа РТТ-150 является большое поле зрения, диаметр которого составляет 1,5°. В такое поле зрения может одновременно попадать

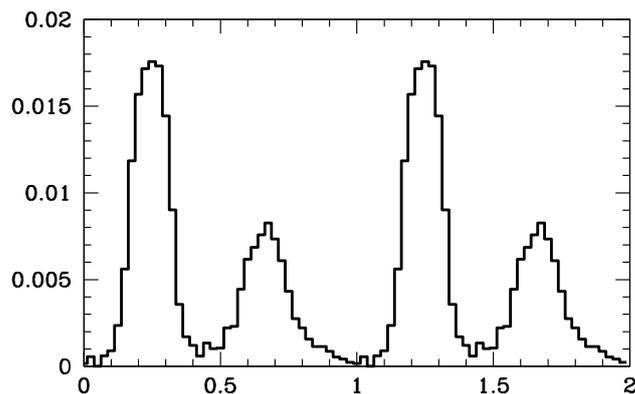


Рис. 4. Профиль импульса пульсара в Крабовидной туманности (период около 33 мсек), по данным наблюдений новой ПЗС-матрицы с умножением заряда. Временное разрешение здесь составляет около 7 мсек.

большое число объектов, спектры которых требуется измерить. Поэтому дальнейшим шагом по увеличению эффективности спектроскопических наблюдений может стать разработка и изготовление многообъектного спектрометра, который позволил бы одновременно проводить наблюдения от нескольких десятков до нескольких сотен объектов в поле зрения телескопа. Другой возможностью является проведение глубоких широкоугольных фотометрических измерений в среднеполосных фильтрах. Такие наблюдения дадут возможность с большой точностью определять тип и получать высокоточные фотометрические оценки для большого числа объектов в поле зрения телескопа. Мы предполагаем изучить возможности создания таких приборов для телескопа РТТ-150.

Также мы планируем провести большой объем наблюдений аperiодической переменности рентгеновских двойных систем при помощи новой быстрой ПЗС-матрицы с умножением заряда. В частности, будут получены новые данные по переменности излучения, возникающего в полярных шапках замагниченных белых карликов, с временным разрешением порядка нескольких миллисекунд. Также планируется провести набор наблюдений затмений белых карликов и нейтронных звезд звездой-компаньоном с целью изучения геометрии излучающих областей.

Будет проведена работа, направленная на то, чтобы выяснить, насколько можно улучшить прямые изображения при помощи отбора хороших изображений. Этот метод состоит в том, что из большого числа прямых изображений исследуемого поля, полученных с ма-

лыми экспозициями, выбираются только более качественные, и они складываются со сдвигами, которые учитывают дрожание атмосферы. Таким образом можно существенно улучшить качество изображений (вплоть до достижения дифракционного предела). Нашей целью является выяснить, можно ли будет использовать такие данные для измерений полных гравитационных масс скоплений галактик методом слабого линзирования.

Среди продолжающихся астрофизических исследований, проводимых с помощью теле-

скопа РТТ-150, отметим измерения красных смещений скоплений галактик из обзора площадью 400 кв. град. и спектров близких сейфертовских галактик из обзора всего неба обсерватории INTEGRAL. Подобные исследования — с использованием гораздо больших выборок объектов — станут основной областью применения телескопа РТТ-150 после вывода на орбиту обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» в 2013 г.

### Литература

1. Бескин Г.М. и др. 1997 // *Beskin G.M., Mitronova S.N., Neizvestny S.I. et al.*, «Photometric investigations of low-mass X-ray binaries with high time resolution», *Astronomical and Astrophysical Transactions* 13, 273 (1997).
2. Буренин Р.А. и др. 2007 // *Burenin R.A., Vikhlinin A., Hornstrup A., Ebeling H., Quintana H., Mescheryakov A.*, «The 400 Square Degree ROSAT PSPC Galaxy Cluster Survey: Catalog and Statistical Calibration», *Astrophysical Journal Suppl.* 172, 561 (2007).
3. Вихлинин А.А. и др. 2009 // *Vikhlinin A., Kravtsov A.V., Burenin R.A., Ebeling H., Forman W.R., Hornstrup A., Jones C., Murray S.S., Nagai D., Quintana H., Voevodkin A.*, «Chandra Cluster Cosmology Project III: Cosmological Parameter Constraints», *Astrophysical Journal* 692, 1060 (2009).
4. Кривонос Р.А. и др. 2007 // *Krivosos R., Revnivtsev M., Lutovinov A., Sazonov S., Churazov E., Sunyaev R.*, «INTEGRAL/IBIS all-sky survey in hard X-rays», *Astronomy and Astrophysics* 475, 775 (2007).
5. Сазонов С.Ю. и др. 2007 // *Sazonov S., Revnivtsev M., Krivosos R., Churazov E., Sunyaev R.*, «Hard X-ray luminosity function and absorption distribution of nearby AGN: INTEGRAL all-sky survey», *Astronomy and Astrophysics* 462, 57 (2007).
6. Штраубмайер К. и др. // *Straubmeier C., Kanbach G.*, «OPTIMA: An Optical Pulsar Timing Analyzer», *ASP Conference Series*, V.202, p. 311 (2000).

## МОНИТОРИНГ НЕБЕСНОЙ СФЕРЫ С ВЫСОКИМ УГЛОВЫМ И ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ (ПРОТОНОВ, ЯДЕР, ФОТОНОВ И НЕЙТРИНО) УЛЬТРАВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ПОМОЩИ ОРБИТАЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА<sup>1</sup>

*Панасюк М.И., Хренов Б. А., Калмыков Н.Н., Яшин И.В., Гарипов Г.К., Климов П. А., Константинов А.А., Сапрыкин О.А., Шаракин С.А., Шустова О. П.<sup>2</sup>*

### Monitoring of the sky with high angular-time resolution by orbital detector of ultrahigh energy cosmic rays (protons, nuclei, photons and neutrinos)

Проводимые работы по гранту посвящены развитию экспериментального изучения одной из самых интересных проблем астрофизики: происхождения космических лучей с энергией в области предела Грейзена-Зацепина-Кузьмина с помощью орбитального детектора. Описаны методы экспериментального изучения первичного космического излучения по характеристикам ливня из вторичных частиц – широкого атмосферного ливня (ШАЛ). Среди полученных результатов основными являются:

The grant work is devoted to experimental study of ultrahigh energy cosmic rays (UHECR) at energies in vicinity of Greisen-Zatsepin-Kuzmin cut-off by orbital detectors. Origin of these cosmic rays is one of the most interesting problems of astrophysics. Methods of experimental measurements of extensive atmospheric shower (EAS) characteristics for getting parameters of UHECR are presented. Among the obtained results the following ones are most important:

1. Testing possibility of accurate measurements of EAS characteristics by orbital TUS (Tracking Uv Set up)

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-12162-офи\_м).

<sup>2</sup>



Панасюк Михаил Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского Государственного университета им. М. В. Ломоносова, e-mail: panasyuk@sinp.msu.ru.



Хренов Борис Аркадьевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского Государственного университета им. М. В. Ломоносова, e-mail: bkhrenov@yandex.ru.



Калмыков Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского Государственного университета им. М. В. Ломоносова, e-mail: kalm@eas.sinp.msu.ru.



Яшин Иван Васильевич, кандидат физико-математических наук, заведующий отделом, НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского Государственного университета им. М. В. Ломоносова, e-mail: ivn@eas.sinp.msu.ru.



Гарипов Гали Карымович, старший научный сотрудник НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского Государственного университета им. М. В. Ломоносова, e-mail: ggkmsu@yandex.ru.

1. Проработка возможности регистрации с помощью орбитального детектора ТУС (трековая установка) событий ШАЛ в условиях переменного фона УФ излучения ночной атмосферы, измеренного на микроспутниках МГУ «Университетский-Татьяна». Оценка точности измерения параметров первичных частиц (энергии, направления прихода) для различных энергий и зенитных углов.
2. Количественные соотношения между параметрами частиц космических лучей и наблюдаемыми на спутнике характеристиками радиоизлучения.
3. Соотношение между сигналами черенковского излучения ШАЛ в области длин волн 300 - 400 нм, возникающими на границе двух сред: воды океана и атмосферы в различных условиях волнения океана.

Проведенные работы важны не только для космического эксперимента ТУС, но и для планируемых экспериментов более крупного масштаба (JEM-EUSO, КЛПВЭ).

**Ключевые слова:** космические лучи, ультравысокие энергии, черенковское излучение, радиосигнал, широкий атмосферный ливень.

detector in present of variable UV glow of night atmosphere measured by MSU microsattellites "Universitetsky-Tatiana". Estimates of measurement accuracy of UHECR primary particle parameters (energy, direction) by TUS detector.

2. Relation between EAS radio signal characteristics measured by orbital detector and parameters of primary UHECR particles.

3. Relation between various components of Cherenkov EAS signal at transition layer from atmosphere to ocean in variable ocean conditions.

Results of grant work are important not only for pioneering experiment with TUS detector but for planned large space detectors JEM-EUSO and KLYPVE as well.

**Key words:** cosmic rays, ultra high energies, Cherenkov radiation, radio signal, extensive air shower.



Климов Павел Александрович, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского Государственного университета им. М. В. Ломоносова, e-mail: pavel.klimov@gmail.com.



Константинов Андрей Алексеевич, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского Государственного университета им. М. В. Ломоносова, e-mail: elan1980@mail.ru.



Сапрыкин Олег Алексеевич, кандидат технических наук, начальник отделения ЦНИИ-МАШ, e-mail: sapr@tsniimash.ru.



Шаракин Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского Государственного университета им. М. В. Ломоносова, e-mail: sharakin@mail.com.



Шустова Ольга Павловна, аспирант Московского Государственного университета им. М. В. Ломоносова, e-mail: olga.shustova@gmail.com.

Получение гранта РФФИ 09-02-12162-офи\_м «Мониторинг небесной сферы с высоким угловым и временным разрешением в космических лучах (протонов, ядер, фотонов и нейтрино) ультравысокой энергии при помощи орбитального детектора» в 2009 г. позволило объединить вокруг задачи первостепенной важности: исследования космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) с помощью орбитального детектора, – группу специалистов различного профиля: экспериментаторов, подготавливающих научную аппаратуру для спутника; экспериментаторов, анализирующих данные о свечении атмосферы в той области длин волн, где ожидается сигнал от КЛ ПВЭ; теоретиков, рассчитывающих ожидаемый сигнал от частиц космических лучей различной природы (протонов, ядер, фотонов, нейтрино) и теоретиков, анализирующих возможные способы ускорения частиц до предельно высоких энергий и вероятность прихода этих частиц из различных участков небесной сферы.

Физическая задача исследования КЛ ПВЭ поставлена в работах Грейзена (США) [1], Зацепина и Кузьмина (СССР) [2] в 1966 г., в которых предсказан излом энергетического спектра космических лучей при энергии  $5 \cdot 10^{19}$  эВ (предел ГЗК). До последнего времени эта задача решалась с помощью наземных установок. НИИЯФ МГУ совместно с ОИЯИ (Дубна) и зарубежными университетами в рамках федеральной космической программы РФ подготавливает первый эксперимент по исследованию КЛ ПВЭ из космоса. Новая постановка эксперимента имеет важные преимущества: возможность обзора огромной площади атмосферы (в первом эксперименте эта площадь порядка  $10^4$  км<sup>2</sup>, и в дальнейшем может быть наращена до предельно возможной на Земле  $10^7$  км<sup>2</sup>) и возможность одним прибором за год работы провести мониторинг всей небесной сферы и получить данные о преимущественном направлении прихода частиц КЛ ПВЭ. Вместе с тем, измерения с помощью орбитального детектора встречают методические трудности, такие как постановка измерений в условиях изменяющегося уровня фонового свечения атмосферы, малого сигнала от частиц КЛ ПВЭ при больших расстояниях от детектора до объекта исследования и т.п. Результаты первого эксперимента по изучению КЛ ПВЭ с помощью ор-

битального детектора будут иметь решающее значение для развития нового «космического» подхода к исследованию КЛ ПВЭ в XXI веке.

В настоящее время последним достижением мировой науки по исследованию КЛ ПВЭ являются результаты, получаемые с помощью самой большой по площади наземной установки «Обсерватория имени Пьера Оже». Рабочая площадь этой установки 3000 км<sup>2</sup> перекрыта детекторами частиц в количестве 1600 штук и четырьмя станциями наблюдения флуоресцентного свечения атмосферы. В 2010 г. главным результатом работы этой установки является подтверждение существования излома энергетического спектра космических лучей при энергии  $5 \cdot 10^{19}$  эВ, которое наблюдалось в предыдущей работе установки HiRes (США) и не наблюдалось в работе установки AGASA (Япония). Данные об источниках частиц КЛ ПВЭ в области этого излома остаются неопределенными. Первоначальные данные установки Оже [3] о преимущественном направлении прихода протонов, как наиболее представленных среди регистрируемых частиц, из плоскости локального скопления галактик (Супергалактики) не подтверждаются новыми данными [4]. В этой последней работе утверждается, что наиболее представленными частицами в области излома являются ядра железа, которые значительно сильнее отклоняются в магнитных полях на пути к Земле и поэтому их направление прихода не может прямо указывать на координаты источника. С другой стороны, новые данные HiRes [5], полученные с помощью стереопары флуоресцентных детекторов, напротив, показывают, что протоны остаются самой представленной компонентой первичных КЛ ПВЭ. В то же время данные HiRes [6] о направлении прихода протонов согласуются с полной изотропией источников КЛ ПВЭ. Таким образом, существующие мировые данные еще раз подчеркивают необходимость развития новых методов регистрации КЛ ПВЭ, которые могут дать лучшую статистику событий (при использовании значительно больших площадей регистрации), усовершенствуют разделение первичных частиц по их природе (протоны, ядра железа), улучшат точность определения направления прихода частиц на всей небесной сфере.

Именно этим задачам посвящена работа по гранту РФФИ 09-02-12162-офи\_м.

### Реализация детектора ТУС на спутнике «Михаил Ломоносов» для исследования комических лучей предельно высоких энергий

Опытно-конструкторские работы по созданию детектора ТУС (рис. 1) в основном финансируются РосКосмосом. Целью работ по



**Рис. 1.** Детектор космических лучей предельно высоких энергий ТУС на спутнике «Михаил Ломоносов». Площадь зеркала-концентратора 2 м<sup>2</sup>, число ячеек фотоприемника 256.

гранту РФФИ является рассмотрение научно-методических вопросов получения параметров первичных частиц космических лучей по экспериментальным данным детекторов космического базирования и проведение испытаний отдельных узлов детектора.

Одной из важных задач, решенных в рамках работ по гранту, является выбор способа отбора полезных событий: широких атмосферных ливней (ШАЛ), генерируемых частицами КЛ ПВЭ на фоне свечения ночной атмосферы. Для орбитального детектора ТУС разработан алгоритм отбора событий КЛ ПВЭ в два этапа. На первом этапе анализируется соотношение сигнала в одной ячейке детектора за время интегрирования, равного среднему времени прохождения ШАЛ в поле зрения одной ячейки (12 мкс) и уровня шума. На втором этапе проверяется «выстроенность» в прямую линию ряда последовательно сработавших на первом этапе ячеек.

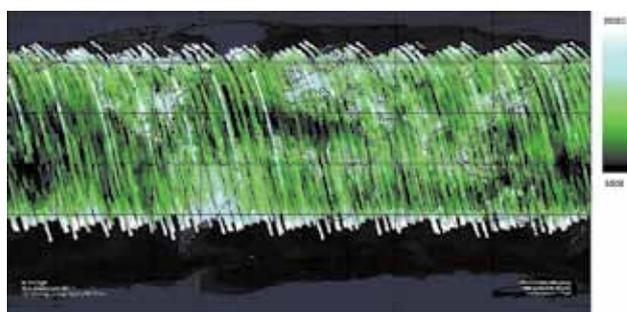
Уровень фонового свечения атмосферы получен в результате анализа данных детекторов спутников «Университетский-Татьяна» и «Университетский-Татьяна-2» (рис. 2).

Еще одним видом событий, на фоне которых будет производиться отбор и регистрация полезных событий КЛ ПВЭ, являются

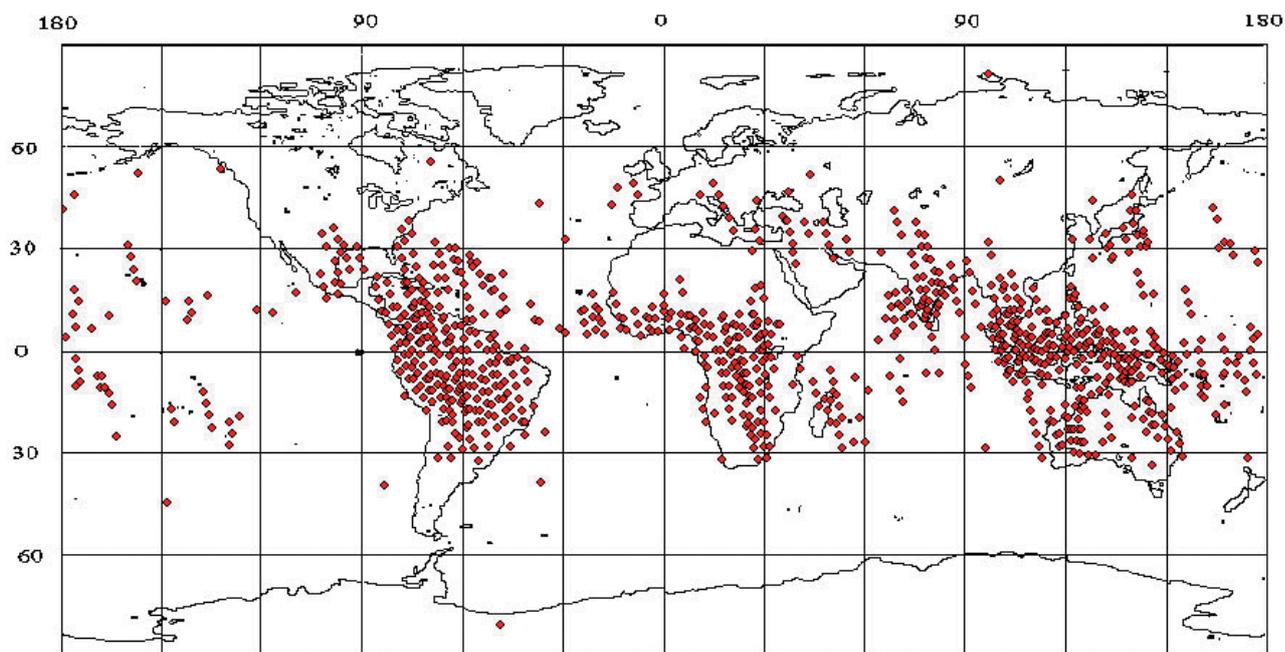
атмосферные вспышки в области длин волн 300 - 400 нм (УФ). Такие вспышки были измерены с помощью детекторов УФ излучения на спутниках «Университетский-Татьяна» и «Университетский-Татьяна-2». Важным результатом исследования УФ вспышек в атмосфере является определение их частоты, длительности и яркости в различных районах Земли. В настоящее время известно, что фоновые вспышки резко отличаются от сигнала ШАЛ своей большей длительностью (не менее 1000 мксек, сравнить с длительностью сигнала ШАЛ – не более 100 мксек), большими размерами пятна (не менее 50 км, сравнить с сигналом ШАЛ, который имеет поперечный размер не более 1 км и длину не более 50 км) (рис. 3).

Отбор событий ШАЛ на фоне регистрируемых вспышек будет проводиться как путем настройки электронной системы отбора событий, так и при анализе off-line зарегистрированных событий.

В работе по гранту проведена оценка пороговой энергии системы отбора для различных районов Земли и для различного уровня рассеянного лунного света и оценка экспозиции наблюдения событий КЛ ПВЭ. Получено, что за три года работы детектора ТУС с пороговой энергией  $3 \cdot 10^{20}$  эВ экспозиция измерений достигнет 12000 км<sup>2</sup> ср год. Эта экспозиция примерно равна ожидаемой экспозиции установки «Обсерватория имени Пьера Оже» в 2014 г. Преимуществом измерений с помощью орбитального детектора ТУС будет возможность анализа направлений прихода частиц по всей небесной сфере, в то время как наземная установка Оже, расположенная в Аргентине, наблюдает частицы, приходящие только из Южной части небесной сферы.



**Рис. 2.** Карта интенсивности свечения атмосферы в диапазоне длин волн 300 - 400 нм в безлунные ночи. Видны районы Земли с минимальным фоном свечения (отмечены темно-зеленым цветом,  $< 5 \cdot 10^7$  фот/см<sup>2</sup> с ср).



**Рис. 3.** Карта распределения атмосферных вспышек ультрафиолетового излучения (УФ) в области длин волн 300 - 400 нм с энергией  $\sim 1$  кДж, выделенной в атмосфере за время 128 мсек. Как видно, вспышки чаще всего встречаются в приэкваториальных районах, над материками.

### Результаты расчета сигнала ШАЛ при переходе ливня из атмосферы в океан

Очевидно, что в «космическом» эксперименте в большинстве событий ливень вторичных частиц будет переходить из атмосферы в воду океана. В отличие от грунта, вода достаточно прозрачна для излучения в области длин волн 300 - 400 нм и возникает вопрос, какой сигнал можно ожидать из воды океана. Произведено моделирование черенковского излучения ШАЛ, как отраженного (рассеянного назад) от поверхности океана, так и излучения, генерированного частицами возобновленного в воде ливня, и вышедшего «назад» — в направлении детектора.

Показано, что сигнал атмосферного черенковского света, «отраженного» от воды, на порядок больше сигнала от возобновленного ливня, а также, что главную роль в сигнале возобновленного ливня играет обратный ток электронов. Несмотря на то, что 97% электронов летит «вперед», поток черенковских фотонов, летящих «назад», в направлении к детектору от «обратного тока» электронов, в 5 раз выше потока фотонов, рассеянных назад от электронов «прямого тока».

Сигнал обратного тока электронов в ливне, возобновленном в океане, значительно короче сигнала «обычного», рассеянного назад черен-

ковского света, и в будущих экспериментах при повышении разрешения во времени до десятков наносекунд этот сигнал будет регистрироваться и даст оценку «остаточной» энергии ливня, входящего в воду океана. Известно, что доля энергии, сохраненная к уровню океана, зависит от природы первичной частицы: для протона эта доля значительно выше, чем для ядра железа, и измерение обратного тока электронов в океане предоставит дополнительную информацию о природе первичной частицы.

### Оценка возможности регистрации на орбите радио сигнала ШАЛ

Реализован микроскопический подход к расчету радиоизлучения от ШАЛ, в рамках которого ливень моделируется методом Монте-Карло, а излучение вычисляется от индивидуальных частиц. Результаты, полученные с применением этого подхода, нужны для верификации приближенных (однако, более быстрых) подходов к расчету радиоизлучения ШАЛ.

Показана возможность двух разных типов приема радиосигнала: «прямого» сигнала для сильно наклонных ливней на лимбе Земли и отраженного от грунта или воды сигнала — для ливней с малыми зенитными углами. В первом случае оптимальным (с учетом ионосферной

рефракции) диапазоном частот для регистрации радиосигнала является  $\sim 30 - 100$  МГц. Во втором случае этот диапазон составляет  $\sim 0,1 - 1$  ГГц.

Показано, что нижний порог детектирования (по энергии первичной частицы) радиоизлучения со спутника при высоте орбиты 500 км составляет  $\sim 10^{19}$  эВ, что открывает возможность сочетания измерений в радиодиапазоне с измерениями флуоресценции атмосферы в области длин волн 300 – 400 нм. Использование радиосигнала ШАЛ при выборе полезных событий на фоне УФ свечения атмосферы позволит повысить эффективность выбора полезных событий даже при высоком фоне, характерном для области полярных сияний в безлунные ночи и для ночей с лунной. Есть также надежда на улучшение определения высоты максимума ШАЛ при использовании данных о радиосигнале ШАЛ.

### Заключение

Проведенные работы по гранту РФФИ 09-02-12162-офи\_м имеют важнейшее значение для развития экспериментального изу-

чения одной из самых интересных проблем астрофизики: происхождения космических лучей с энергией в области предела ГЗК с помощью орбитального детектора. Среди полученных результатов следует отметить следующие:

- Получить количественные соотношения между параметрами частиц космических лучей и наблюдаемыми на спутнике характеристиками радиоизлучения.
- Проверить возможности регистрации с помощью рабочего образца детектора ТУС событий ШАЛ в условиях переменного фона УФ излучения ночной атмосферы с применением имитаторов сигнала ШАЛ. Оценить точность измерения параметров первичных частиц (энергии, направления прихода) для различных энергий и зенитных углов.
- Рассчитать сигнал в области длин волн 300 – 400 нм, «отраженный» от воды океана в различных условиях его волнения.

Отметим, что все проводимые работы важны не только для проведения космического эксперимента ТУС, но для планируемых экспериментов более крупного масштаба (JEM-EUSO, КЛПВЭ) на международной космической станции.

### Литература.

1. Greisen K. // Phys. Rev. Lett. 1966. 16. P. 748.
2. Zatsepin G.T. and Kuzmin V.A. // JETP Lett. 1966. 4. P. 78 .
3. Abraham J. et al (Auger Collaboraton) //Science, 2007. 318. 9 November.
4. Abraham J. et al (Auger collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2010. 104. P. 091101.
5. Abbasi R.U. et al (HiRes collaboration) // Phys Rev. Lett. 2010. в печати, доступно в <http://arxiv.org/abs/09104>.
6. Abbasi R.U. et al (HiRes collaboration) // Astrophys. J. Lett. 2010. 713 L64.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ВСЕЛЕННОЙ НА ОСНОВЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ МОЛЕКУЛ<sup>1</sup>

Лапинов А.В., Левшаков С.А., Козлов М.Г., Голубятников Г.Ю.,  
Белов С.П., Андриянов А.Ф., Шкаев А.П., Агафонова И.И., Зинченко И.И.<sup>2</sup>

### Study of fundamental properties of the Universe using precise molecular spectroscopy

Для исследования зависимости фундаментальной физической постоянной — отношения массы электрона к массе протона ( $\mu = m_e/m_p$ ) — от величины потенциала гипотетического скалярного поля проведены спектральные наблюдения межзвездных молекулярных облаков в линиях  $\text{NH}_3(J,K)=(1,1)$ ,  $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$  и  $\text{N}_2\text{H}^+ J=1-0$  в см и мм диапазонах на трех радиотелескопах: 32-метровом в Медине (Италия), 100-метровом в Эффельсберге (Германия), 45-метровом в Нобеяме (Япония). Сравнивались относительные частоты инверсионного перехода аммиака с вращательными линиями других молекул, которые в 4,5 раза менее чувствительны к изменению параметра  $\mu$ , чем инверсионный переход в  $\text{NH}_3$ . Получены указания на возможный систематический сдвиг между этими переходами, равный в доплеровской шкале скоростей  $\Delta V = V_{\text{rot}} -$

To probe the dependence of the fundamental physical constant — the electron-to-proton mass ratio ( $\mu = m_e/m_p$ ) — on the potential of a hypothetical scalar field, we carried out spectral observations of interstellar molecular clouds in the Milky Way using  $\text{NH}_3(J,K)=(1,1)$ ,  $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$ , and  $\text{N}_2\text{H}^+ J=1-0$  molecular lines. Observations at cm and mm wavelengths were performed with three radiotelescopes: 32-m Medicina (Italy), 100-m Effelsberg (Germany), and 45-m Nobeyama (Japan). Relative frequencies of the ammonia inversion transition and rotational transitions of other molecules, which are 4.5 times less sensitive to a change of  $\mu$  than the inversion line, have been compared. As a result, we found an indication of possible Doppler velocity offset,  $\Delta V = V_{\text{rot}} - V_{\text{inv}} = (27,7 \pm 3,8_{\text{stat}} \pm 2,8_{\text{sys}})$  m/s. Being interpreted in terms of the electron-to-proton mass ratio variation, this gives  $\Delta\mu/\mu = (\mu_{\text{obs}} - \mu_{\text{lab}})/\mu_{\text{lab}} = (2,6 \pm 0,4_{\text{stat}} \pm 0,3_{\text{sys}}) \cdot 10^{-8}$ . However,

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-12223-офи\_м).

<sup>2</sup>



Лапинов Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: lapinov@appl.sci-nnov.ru.

Левшаков Сергей Анатольевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, e-mail: lev.astro@mail.ioffe.ru.



Козлов Михаил Геннадьевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН, г. Гатчина, e-mail: kozlov@mfl309.spb.edu.



Голубятников Герман Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: glb@appl.sci-nnov.ru.



Белов Сергей Павлович, старший научный сотрудник Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: belov@appl.sci-nnov.ru.

$V_{inv} = (27,7 \pm 3,8_{stat} \pm 2,8_{sys})$  м/с. Если этот сдвиг действительно вызван изменением  $\mu$ , то  $\Delta\mu/\mu = (\mu_{obs} - \mu_{lab})/\mu_{lab} = (2,6 \pm 0,4_{stat} \pm 0,3_{sys}) \cdot 10^{-8}$ . Если же рассматривать  $|\Delta V| < 30$  м/с только как консервативный верхний предел, то  $|\Delta\mu/\mu| < 3 \cdot 10^{-8}$ , что на два порядка точнее, чем космологические оценки параметра  $\mu$ .

Благодаря поддержке РФФИ создан прецизионный субдоплеровский спектрометр для лабораторных исследований спектров молекул в миллиметровой области длин волн, обладающий более высоким разрешением, чем зарубежные аналоги. Спектрометр предназначен для высокоточных измерений частот переходов и параметров сверхтонкого расщепления молекул, представляющих интерес при изучении областей звездообразования, а также для чисто фундаментальных исследований.

**Ключевые слова:** вариации фундаментальных констант, межзвездная среда, спектроскопия молекул.

if only a conservative upper bound is considered,  $|\Delta V| < 30$  m/s, then  $|\Delta\mu/\mu| < 3 \cdot 10^{-8}$ , which is two orders of magnitude stronger in comparison with constraints obtained from cosmological measurements.

Thanks to RFBR support we created a precise sub-Doppler spectrometer for laboratory investigations of molecular spectra in the millimeter wave band, which has higher resolution than their foreign counterparts. The spectrometer is designed for precise measurements of transition frequencies and parameters of the hyperfine splitting of the molecules of interest in the study of star forming regions, as well as for pure basic research.

**Keywords:** variation of fundamental constants, interstellar medium, molecular spectroscopy.

## Введение

Более десяти лет прошло с момента обнаружения ускоренного расширения Вселенной на поздних этапах ее эволюции (Perlmutter et al. 1998; Riess et al. 1998), но причина такого ускорения все еще остается невыясненной. По существу, это явление на столько не вписывается в рамки стандартных моделей физики элементарных частиц и космологии, что для решения про-

блемы ускоренного расширения Вселенной может потребоваться пересмотр фундаментальных законов физики как на малых, так и на космологических масштабах. Многочисленные попытки решить данную проблему в рамках квантовой теории поля и общей теории относительности пока остаются неубедительными (Brah 2009).

На феноменологическом уровне было предложено множество моделей, объяснявших со-



Андриянов Александр Федорович, ведущий конструктор Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: andriyanov@appl.sci-nnov.ru.



Шкаев Александр Петрович, ведущий конструктор Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: shkaevap@mail.ru.

Агафонова Ирина Ивановна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, e-mail: ira.astro@mail.ioffe.ru.



Зинченко Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: zin@appl.sci-nnov.ru.

временное ускоренное расширение Вселенной. Наиболее популярные из них рассмотрены в обзорах Peebles and Ratra (2003), Martins (2008) и Chin et al. (2009). Например, во многих моделях предполагается, что причиной ускорения может быть присутствие в космологическом вакууме сверхлегких скалярных полей с уравнением состояния  $p = -\rho$ . Взаимодействуя с обычным веществом (барионами и лептонами), такие поля привели бы к нарушению принципа эквивалентности и к появлению «пятой» силы. Строгий верхний предел на величину параметра Этвеша  $\eta < 4 \cdot 10^{-13}$ , характеризующего нарушение принципа эквивалентности, был получен в экспериментах по измерению относительно ускорения тел разного химического состава (Will 2001). Таким образом, существование пятой силы, переносчиком которой являются скалярные поля, пока не нашло подтверждения в лабораторных экспериментах.

Сложившееся противоречие между двумя экспериментальными фактами — ускоренным расширением Вселенной, с одной стороны, и отсутствием каких-либо признаков нарушения принципа эквивалентности, с другой стороны, удается разрешить в рамках так называемых «хамелеонных» моделей скалярных полей, предложенных в работах Houry and Weltman (2004), Brax et al. (2004), Mota and Shaw (2007) и Olive and Pospelov (2008). В этих работах предполагается, что потенциал и эффективная масса кванта скалярного поля модулируются локальной плотностью вещества так, что комптоновская длина взаимодействия за счет обмена скалярными частицами становится малой при больших плотностях (условия лабораторных экспериментов) и большой в условиях космического вакуума. Таким образом, детектирование пятой силы в лабораторных условиях требует либо экспериментов на очень малых масштабах, либо при очень глубоком вакууме. Второе условие выполнено в межзвездной среде, где локальные плотности газа в «плотных» молекулярных глобулах составляют  $10^4 - 10^5$  частиц в  $\text{см}^3$ , а эффективная длина взаимодействия превышает размеры Солнечной системы.

Учитывая уникальные возможности современных высокоточных астрономических наблюдений, мы можем ставить задачу по поиску скалярных полей и проверки фундаментального принципа локальной инвариантности, согласно которому результаты негравитационных измерений не зависят от пространственно-вре-

менных координат. Например, сравнивая относительные частоты молекулярных переходов, измеренных в наземных лабораториях, с частотами этих же переходов, полученных из наблюдений межзвездных молекулярных облаков, мы можем получить ограничения на возможные изменения фундаментальных физических постоянных (такое изменение, разумеется, нарушает принцип локальной инвариантности). Теоретическое обоснование зависимости от локальной плотности таких фундаментальных безразмерных констант, как постоянная тонкой структуры,  $\alpha \approx 1/137$ , и отношение масс электрона и протона  $\mu = m_e/m_p$ , было получено в работе Olive and Pospelov (2008). В современной теории эти константы определяют силу фундаментальных взаимодействий:  $\alpha$  характеризует электромагнитное взаимодействие,  $m_e$  пропорциональна слабому взаимодействию, а  $m_p$  определяется масштабным фактором  $\Lambda$  квантовой хромодинамики (Chin et al. 2009).

Следует отметить, что гипотетические изменения постоянной тонкой структуры и отношения масс электрона и протона не независимы. В теориях великого объединения предсказывается, что относительное изменение  $\mu$  должно существенно превышать относительное изменение  $\alpha$  (Calmet and Fritzsche 2002; Langacker et al. 2002; Dine et al. 2003; Flambaum et al. 2004). Это обстоятельство позволяет надеяться на то, что эксперименты по поиску вариаций  $\mu$  более чувствительны к локальным условиям, чем измерения  $\alpha$ .

Несмотря на многочисленные попытки, вариации  $\alpha$  и  $\mu$  до сих пор не были обнаружены ни в лабораториях, ни в астрономических наблюдениях. Наиболее жесткие ограничения на изменения во времени этих констант таковы:  $(d\mu/dt)/\mu = (3,8 \pm 5,6) \cdot 10^{-14} \text{ год}^{-1}$  (Shelkovnikov et al. 2008),  $(d\mu/dt)/\mu = (1,6 \pm 1,7) \cdot 10^{-15} \text{ год}^{-1}$  (Blatt et al. 2008), и  $(d\alpha/dt)/\alpha = -(1,6 \pm 2,3) \cdot 10^{-17} \text{ год}^{-1}$  (Rosenband et al. 2008). Астрономические спектральные наблюдения внегалактических объектов устанавливают пределы на относительные изменения  $\Delta\alpha/\alpha = (\alpha_{\text{obs}} - \alpha_{\text{lab}})/\alpha_{\text{lab}}$  и  $\Delta\mu/\mu = (\mu_{\text{obs}} - \mu_{\text{lab}})/\mu_{\text{lab}}$  на уровне  $10^{-5} - 10^{-6}$  на временном интервале порядка 10 миллиардов лет (Quast et al. 2004; Levshakov et al. 2005; Flambaum and Kozlov 2007; King et al. 2008; Thompson et al. 2009; Henkel et al. 2009).

Эти наблюдения проводились на крупнейших оптических (Keck, VLT) и радио (100-m

Effelsberg) телескопах. Однако, обнаруженные в последнее время неустраняемые систематические сдвиги спектральных линий на уровне сотен м/сек, полученных на 10-метровом телескопе Keck (Giest et al. 2010) и на 8-метровом телескопе VLT (Whitmore et al. 2010) не позволяют надеяться, что в ближайшее время станут возможны надежные измерения  $\Delta\alpha/\alpha$  и  $\Delta\mu/\mu$  на уровне 1 ppm ( $=10^{-6}$ ) по оптическим спектрам квазаров. Радиоастрономические наблюдения внегалактических объектов, хотя и не подвержены таким систематическим ошибкам, также имеют предел чувствительности на уровне около 1 ppm, поскольку наблюдения внегалактических радиоисточников могут проводиться только с довольно низким спектральным разрешением даже на 100-метровых телескопах.

Существенный прогресс в исследованиях фундаментальных постоянных радиоастрономическими методами возможен, если перейти к изучению объектов в нашей Галактике. Например, холодные молекулярные облака с кинетической температурой  $T_k \sim 10$  К позволяют измерять относительные частоты молекулярных переходов с точностью 1–3 м/с. В ряде случаев, например, при измерениях спектров молекул, неустойчивых при лабораторных исследованиях, такие наблюдения позволяют проводить спектроскопию даже точнее, чем при исследованиях в земных условиях (Lapinov 1999, 2006, Caselli and Dore 2005). Доплеровская погрешность на уровне 1 м/с соответствует чувствительности к изменению  $\mu$  на уровне  $10^{-9}$ , т.е. 1 ppb. Конечно же, в этом случае временной интервал не сравним с космологическим, как при наблюдениях внегалактических объектов, но такие исследования дают уникальную возможность для проверки принципа локальной инвариантности.

Одно существенное обстоятельство не позволяет пока проводить широкомасштабные наблюдения молекулярных облаков в диске нашей Галактики с использованием большого числа разных молекул. Для подавляющего большинства известных молекулярных переходов лабораторные частоты измерены с ошибками, на порядки превышающими ошибки астрономических наблюдений. Таким образом, для лабораторной спектроскопии появилась важная практическая задача — измерения молекулярных частот с ошибками в доплеровской

шкале скоростей  $\sim 1$  м/с (относительная ошибка  $\sim 3 \cdot 10^{-9}$ ). В перспективе решение этой задачи откроет возможности для прецизионных измерений относительных значений фундаментальных физических постоянных по независимым группам молекулярных переходов, что существенным образом повысит достоверность астрономических исследований.

В настоящее время только две молекулы:  $\text{NH}_3$  (аммиак) и  $\text{HC}_3\text{N}$  (цианоацетилен), с надежно измеренными лабораторными частотами, могут быть использованы в исследованиях переменности  $\mu$  на уровне  $\sim 1$  ppb. В рамках проекта РФФИ № 09-02-12223\_офи\_м нами были проведены предварительные наблюдения молекулярных облаков в линиях  $\text{NH}_3$  (J,K)=(1,1) и  $\text{HC}_3\text{N}$  J=2–1, результаты которых представлены в следующем разделе.

### Измерения $\Delta\mu/\mu$ по спектрам $\text{NH}_3$ и $\text{HC}_3\text{N}$

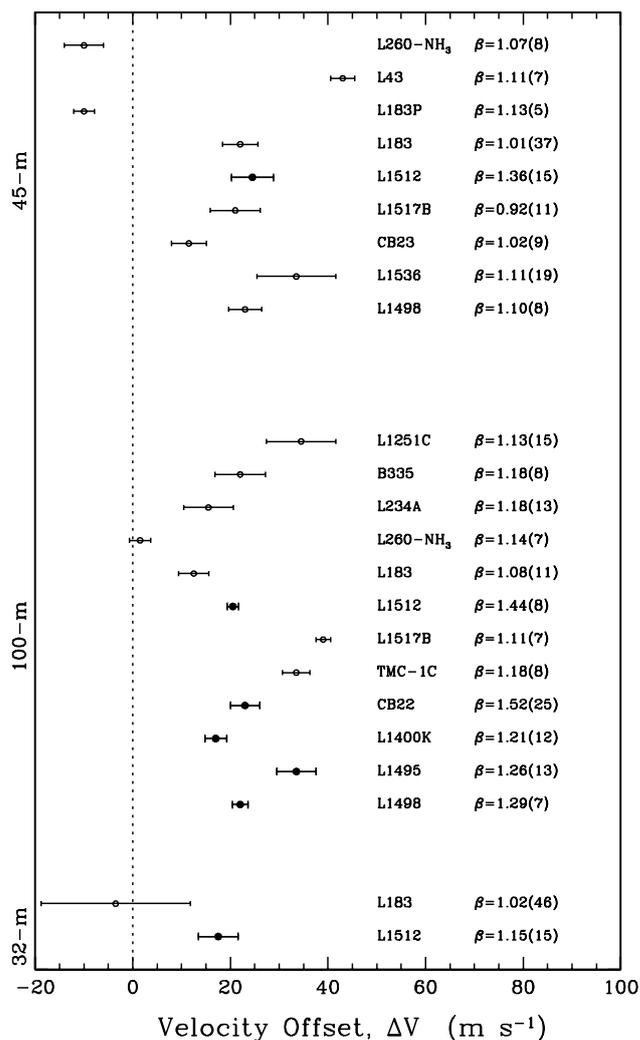
В основе эффекта лежат результаты квантово-механического расчета, показывающие разную чувствительность частот для разного типа переходов молекул от вариаций отношения массы электрона к массе протона. Так, относительный сдвиг частоты инверсионного перехода в аммиаке от параметра  $\mu$  в 4,5 раза выше, чем для чисто вращательных переходов молекул (Flambaum and Kozlov 2007, Kozlov et al. 2010). Предложенный метод исследования вариаций  $\Delta\mu/\mu$  при измерениях на Земле и в разреженной межзвездной среде заключался в поиске различий доплеровских сдвигов частот вращательных переходов  $\text{HC}_3\text{N}$  относительно частоты инверсионного перехода  $\text{NH}_3(1,1)$ . Согласно проведенному нами анализу всех опубликованных лабораторных измерений вращательного спектра  $\text{HC}_3\text{N}$  частоты переходов J=2–1 и J=5–4 составляют 18196.21694(17) МГц и 45490.31378(43) МГц. Т.е. стандартное отклонение для центра линий равно 2,8 м/с. При этом ошибки относительных положений сверхтонких компонент за счет спин-вращательного взаимодействия с ядром азота, благодаря измерениям De Leon and Muentzer (1985), не превышают 0,1 м/с. Что же касается спектра аммиака, то и само положение центра чисто инверсионного перехода, 24694,495487(48) МГц, и частоты сверхтонких компонент были измерены в работе Kukolich (1967), с точностью  $\sim 0,6$  м/с. Наши собственные лабораторные измерения, выполненные в

университете Ганновера в январе 2010 г. в резонаторе с холодной струей, полностью подтвердили использованные нами частоты с точностью  $\sim 0,2$  кГц.

Первая серия радиоастрономических измерений проводилась нами в 2009 г. при помощи 32-м антенны в Медичине (Италия), 100-м телескопа в Эффельсберге (Германия) и 45-м телескопа в Нобеяме (Япония). В качестве объектов исследования были выбраны темные облака, обладающие максимально узкими линиями как за счет крайне низких температур, так и за счет внутренних нетепловых движений. Первоначальный список охватывал 41 источник (Levshakov et al. 2010), из которого, в конечном счете, были отобраны 12 объектов с максимально узкими, близкими к тепловым, ширинами линий. Далеко не все источники обладали достаточной интенсивностью в линиях разных молекул; кроме этого, часть объектов, демонстрировала излучение сложной формы на разных лучевых скоростях. С учетом ряда факторов, влияющих на точность измерения центров линий, относительный доплеровский сдвиг вращательных линий по сравнению с инверсионным переходом аммиака составил величину  $\Delta V = V_{\text{rot}} - V_{\text{inv}} = (27,7 \pm 3,8_{\text{stat}} \pm 2,8_{\text{sys}})$  м/с (рис.1).

Стоит отметить, что данный сдвиг подтвердился и при наших последующих измерениях в январе 2010 г., когда для ряда выбранных источников были получены карты в линиях  $\text{NH}_3(1,1)$  и  $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$ . Если интерпретировать найденный сдвиг линий вариациями в отношении массы электрона к массе протона,  $\mu$ , то величина  $\Delta\mu/\mu = (2,6 \pm 0,4_{\text{stat}} \pm 0,3_{\text{sys}}) \cdot 10^{-8}$ . Если же рассматривать  $|\Delta V| < 30$  м/с только как консервативный верхний предел, то  $|\Delta\mu/\mu| < 3 \cdot 10^{-8}$ , что на два порядка точнее, чем космологические оценки параметра  $\mu$ .

Хотя измерения на 32-м антенне проводились в линиях  $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$  и  $\text{NH}_3(1,1)$  лишь в направлении нескольких источников, они оказались крайне важны, т.к. разница доплеровских скоростей  $V(\text{HC}_3\text{N}) - V(\text{NH}_3)$  в них оказалась близка к величинам, измеренным в тех же объектах в Эффельсберге. Это послужило дополнительным подтверждением достоверности полученных данных. Благодаря возможности комбинировать одновременно несколько приемников, измерения в Нобеяме проводились в большом количестве линий разных молекул: инверсионных переходах  $\text{NH}_3(1,1)$  (23,694 ГГц) и  $\text{NH}_3(2,2)$  (23,723 ГГц),



**Рис. 1.** Доплеровский сдвиг вращательных линий молекул относительно инверсионного перехода  $\text{NH}_3(1,1)$  (для NRO – 45 м использован переход  $\text{N}_2\text{H}^+ J=1-0$ , для остальных телескопов — переход  $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$ ). Параметр  $\beta$  равен отношению ширины линии в аммиаке к ширине соответствующей вращательной линии. Для чисто тепловых движений отношение ширины линии  $\text{NH}_3$  к ширине в  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\beta=1,7$ ; для турбулентного случая  $\beta=1$ .

а также вращательных линиях  $\text{HC}_3\text{N } J=5-4$  (45,490 ГГц),  $\text{HC}_3\text{N } J=9-8$  (81,881 ГГц),  $\text{HC}_5\text{N } J=9-8$  (23,964 ГГц),  $\text{HC}_5\text{N } J=17-16$  (45,265 ГГц),  $\text{CCS } J_{\text{N}}=2_1-1_0$  (22,344 ГГц),  $\text{CCS } J_{\text{N}}=4_3-3_2$  (45,379 ГГц),  $\text{CCS } J_{\text{N}}=7_6-6_5$  (81,505 ГГц),  $\text{CCS } J_{\text{N}}=8_7-7_6$  (93,870 ГГц),  $^{13}\text{CS } J=2-1$  (92,494 ГГц) и  $\text{N}_2\text{H}^+ J=1-0$  (93,174 ГГц). И хотя все эти наблюдения имеют крайне важное значение для определения физических условий в исследованных нами объектах и даже хорошо согласуются с данными, полученными на 100-метровом зеркале

в Эффельсберге, мы не можем пока их рассматривать как достаточно надежные либо по причине недостаточно высокой точности частот именно лабораторных спектров  $\text{CCS}$  и  $\text{N}_2\text{H}^+$ , либо недостаточно высокого отношения  $S/N$  при измерениях  $\text{HC}_3\text{N}$ . Т.о. фактически все наши оценки вариаций  $\Delta\mu/\mu$  опираются лишь на измерения, полученные при помощи 100-метрового телескопа.

В ходе выполнения работ в 2009 – 2010 гг. большая часть финансирования данного проекта,

тровые спектрометры с субдоплеровским разрешением, а также в университете г. Болонья (Италия). Мы и дальше планируем продолжать наши совместные исследования с зарубежными коллегами. Однако, создание и запуск аналогичного спектрометра в ИПФ РАН явилось, несомненно, одним из главных результатов выполнения работ в рамках данного гранта РФФИ. Внешний вид созданной установки приведен на рис. 2.

Первые тестовые испытания созданного спектрометра в линиях вращательных перехо-



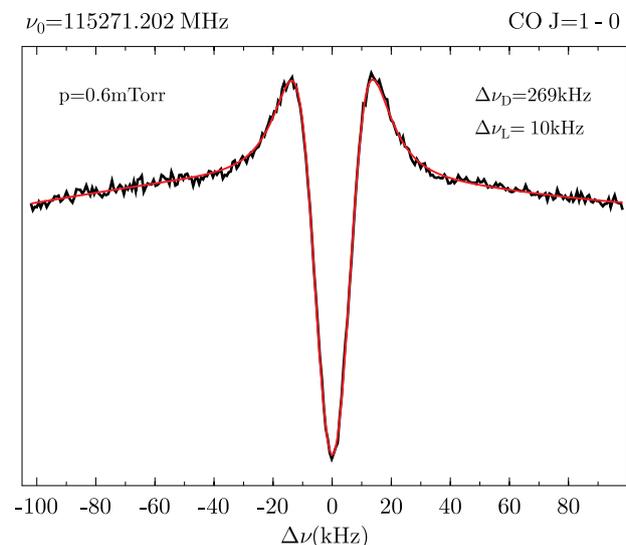
**Рис. 2.** Внешний вид субдоплеровского спектрометра мм и суб-мм диапазонов длин волн на основе провала Лэмба, созданного в ИПФ РАН при поддержке РФФИ.

а также частично средств развития материально-технической базы ИПФ РАН при поддержке РФФИ, совместного гранта РФФИ–ННИО № 09-02-91343 и программы IV.12 ОФН РАН были потрачены на разработку и изготовление собственного высокочувствительного спектрометра на основе провала Лэмба. К сожалению, до сегодняшнего времени все наиболее прецизионные измерения проводились нами за рубежом в Кильском и Кельнском университетах (Германия), где с нашей помощью были созданы субмиллиме-

дов молекулы  $\text{OCS}$  в диапазоне 85–109 ГГц и  $\text{CO } J=1-0$  на 115 ГГц показали согласие с ранее выполненными измерениями лучше 1 кГц. Достигнутая ширина лэмбовского провала (~5–10 кГц) в несколько раз уже по сравнению со значением на субдоплеровском спектрометре, созданном нами в университете г. Киль под руководством А. Гварнери (Golubiatnikov et al., 2005). Типичный пример записи линии с провалом Лэмба на второй гармонике частоты модуляции и его аппроксимация модельным про-

филем, позволяющим определить центр линии и ее ширину, показаны на рис. 3.

Что же касается международного сотрудничества в данной области, то в настоящее время



**Рис. 3.** Запись провала Лэмба во вращательном переходе  $J=1-0$  молекулы  $\text{CO}$ . Подгонка экспериментальных данных соответствует частоте линии, равной 115 271.20214(4) МГц. Табличное значение, согласно Winnewisser G., Belov S.P. et al., 1997, *J. Mol. Spectrosc.* 184, 468, равно 115 271.20202(6) МГц. Восстановленная из аппроксимации ширина лэмбовского провала при давлении газа 0,6 мТорр, скорректированная на модуляцию частоты, равна 10 кГц, доплеровская ширина линии при тех же условиях равна 269 кГц.

мя нами при помощи усовершенствованного спектрометра на Техническом факультете университета г. Киль выполнена лабораторная субдоплеровская спектроскопия с провалом Лэмба большого количества инверсионно-вращательных переходов молекул  $\text{NH}_2\text{D}$ ,  $\text{NHD}_2$  и  $\text{ND}_3$  (а также ряда других молекул), позволяющая примерно на два порядка повысить точность измерения центров линий по сравнению с традиционными доплеровскими измерениями. Достигнута точность измерения частот  $\sim 1$  кГц. Кроме сверхтонкого расщепления, обусловленного электрическим квадрупольным моментом ядра азота, для молекул  $\text{NH}_2\text{D}$  впервые частично измерено расщепление, обусловленное дейтерием. Эти измерения представляют большой интерес, т.к. позволяют проводить исследования вариаций  $\Delta\mu/\mu$  по наблюдениям разных линий одной и той же молекулы. Из-за

смешивания вращательных и инверсионных степеней свободы коэффициенты чувствительности для частично дейтерированного аммиака сильно зависят от квантовых чисел. В результате, исследования вариаций  $\Delta\mu/\mu$  можно проводить, например, по одновременным измерениям линий  $\text{NH}_2\text{D } J_{\text{KaKc}}=1_{1,1}-1_{0,1}$  в орто и пара состояниях на частотах 85,9 ГГц и 110,2 ГГц. Соответствующие коэффициенты чувствительности линий  $\text{NH}_2\text{D}$  и  $\text{ND}_2\text{H}$  рассчитаны нами в работе Kozlov et al. (2010).

Благодаря измерениям в холодной струе вращательных переходов от  $J=1-0$  до  $J=3-2$  молекул  $\text{HNC}$ ,  $\text{DNC}$ ,  $\text{H}^{15}\text{NC}$ ,  $\text{D}^{15}\text{NC}$ ,  $\text{H}^{13}\text{NC}$ , выполненным в Гарварде (MIT, США), нам удалось более чем на порядок повысить точность частот и параметров сверхтонкого расщепления данных молекул. Для ряда молекул константы сверхтонкого расщепления определены впервые. Найдено, что частота перехода  $\text{H}^{15}\text{NC } J=1-0$ , 88865,6966(14) МГц, определенная из лабораторных измерений в струе, находится в превосходном согласии со значением, полученным и опубликованным ранее исходя из радиоастрономических измерений, 88865,6964(26) МГц (Lapinov 2006).

В результате измерений в резонаторе с холодной струей университета г. Ганновер в январе 2010 г. мы не только подтвердили лабораторную точность частот инверсионных переходов  $\text{NH}_3(1,1)$  и  $(2,2)$  и вращательных линий  $\text{HC}_3\text{N } J=1-0$  и  $J=2-1$  с точностью  $\sim 0,2$  кГц, но и улучшили примерно на 2 порядка лабораторные точности частот, включая параметры сверхтонкой структуры, для  $\text{HC}^{13}\text{CCN}$  и  $\text{HCC}^{13}\text{CN}$  в линиях  $J=1-0$  и  $J=2-1$ , а также для  $\text{H}^{13}\text{CCCN}$  и  $\text{HCCC}^{15}\text{N}$  в линиях  $J=1-0$ ,  $J=2-1$  и  $J=3-2$ .

## Заключение

Т.о. анализ измерений, выполненных в ходе работ по проекту, показал, что наблюдения темных межзвездных облаков могут указывать на возможность систематического доплеровского сдвига частот вращательных линий  $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$  относительно инверсионного перехода  $\text{NH}_3(1,1)$ . Величина сдвига составила  $\Delta V = V_{\text{rot}} - V_{\text{inv}} = (27,7 \pm 3,8_{\text{stat}} \pm 2,8_{\text{sys}})$  м/с. Если данный сдвиг действительно вызван изменением частот переходов из-за вариаций в отношении массы электрона к массе протона, то  $\Delta\mu/\mu = (2,6 \pm 0,4_{\text{stat}} \pm 0,3_{\text{sys}}) \cdot 10^{-8}$ . Если же рассматривать  $|\Delta V| < 30$  м/с только как консервативный верхний

предел, то  $|\Delta\mu/\mu| < 3 \cdot 10^{-8}$ , что на два порядка точнее, чем космологические оценки параметра  $\mu$ . В ходе дальнейших работ нами будут продолжены исследования возможных вариаций фундаментальных констант на основе астрономических и лабораторными измерений. Благодаря созданному при поддержке РФФИ субдоплеровскому спектрометру будет выполнено большое количество лабораторных исследований спектров астрофизически важных молекул, которые позволят существенно повысить разрешение и точность

измерений частот, а также параметров сверхтонкого расщепления.

Авторы выражают глубокую благодарность большому кругу лиц, вовлеченных в выполнение данного проекта. Неоценимый вклад оказали при радиоастрономических измерениях Р. Molaro (INAF, Trieste), С. Henkel (MPIfRA, Bonn), Т. Sakai (NRO, Nobeyama), а при лабораторных исследованиях — Н. Bechtel (MIT, USA), J.-U. Grabow (Hannover University) и А. Guarnieri (Kiel University).

### Литература

1. Blatt, S., Ludlow, A. D., Campbell, G. K., et al. 2008, Phys. Rev. Lett., 100, 140801
2. Brax, P. 2009, in «Gif Lectures on Cosmic Acceleration» (arXiv: astro-ph/0921.3610)
3. Brax, P., van de Bruck, C., Davis, A.-C., Houry, J., and Weltman, A. 2004, Phys. Rev. D, 70, 123518
4. Calmet, X., and Fritzsche, H. 2002, Eur. Phys. J. C, 24, 639
5. Casseli, P., and Dore, L. 2005, A&A, 433, 1145
6. Chin, C., Flambaum, V. V., and Kozlov, M. G. 2009, NJPh, 11, 055048
7. De Leon, R. L., Muentzer, J. S. 1985, J. Chem. Phys., 82, 1702
8. Dine, M., Nir, Y., Raz, G., and Volansky, T. 2003, Phys. Rev. D, 67, 015009
9. Flambaum, V. V., and Kozlov, M. G. 2007, Phys. Rev. Lett., 98, 240801
10. Flambaum, V. V., Leinweber, D. B., Thomas, A. W., and Young, R. D. 2004, Phys. Rev. D, 69, 115006
11. Golubiatnikov, G. Yu., Lapinov, A. V., Guarnieri, A. and Knöchel, R. 2005, J. Mol. Spectrosc., 234, 190
12. Henkel, C., Menten, K. M., Murphy, M. T., et al. 2009, A&A, 500, 725
13. Houry, J., and Weltman, A. 2004, Phys. Rev. Lett. 93, 171104
14. King, J. A., Webb, J. K., Murphy, M. T., and Carswell, R. F. 2008, Phys. Rev. Lett., 101, 251304
15. Kozlov, M. G., Lapinov, A. V., Levshakov, S. A. 2010, J. Phys. B., 43, 074003
16. Kukulich, S.G. 1967, Phys. Rev., 156, 83
17. Langacker, P., Segre, G., and Strassler, M. 2002, J. Phys. Lett. B, 528, 121
18. Lapinov, A. V. 1999, in Abstract Book of IAU Symp.197, Astrochemistry: From Molecular Clouds to Planetary Systems, ed. J.-S. Kim et al. — Korea Astron. Obs., 99
19. Lapinov, A. V. 2006, in Proc. of SPIE (15<sup>th</sup> Symp. on High-Resolution Molecular Spectroscopy), ed. Ponomarev Yu. N. et al., v.6580, 658001
20. Levshakov, S. A., Centurion, M., Molaro, P., and D’Odorico, S. 2005, A&A, 434, 827
21. Levshakov, S. A., Molaro P., Lapinov A. V., et al. 2010, A&A, 512, A44
22. Martins, C. J. A. P. 2008, in «Precision Spectroscopy in Astrophysics»,
23. eds. N. C. Santos, L. Pasquini, A. C. M. Correia, and M. Romaniello (Springer-Verlag, Berlin), p.89
24. Mota, D. F., and Shaw, D. J. 2007, Phys. Rev. D, 75, 063501
25. Olive, K. A., and Pospelov, M. 2008, Phys. Rev. D, 77, 043524
26. Peebles, P. J. E., and Ratra, B. 2003, Rev. Mod. Phys., 75, 559
27. Perlmutter, S., Aldering, G., della Valle, M., et al. 1998, Nature, 391, 51
28. Quast, R., Reimers, D., and Levshakov, S. A. 2004, A&A, 415, L7
29. Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., et al. 1998, AJ, 116, 1009
30. Rosenband, T., Hume, D. B., Schmidt, P. O., et al. 2008, Science, 319, 1808
31. Shelkownikov, A., Butcher, R. J., Chardonnet, C., and Amy-Klein, A. 2008, Phys. Rev. Lett., 100, 150801
32. Thompson, R. I., Bechtold, J., Black, J. H., et al. 2009, ApJ, 703, 1648
33. Will, C. M. 2001, Living Rev. Rel., 4, 4 (arXiv: gr-qc/0103036)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ТУННЕЛЬНО-РЕЗОНАНСНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЧ-МИКРОСХЕМ И ГЕНЕРАТОРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА<sup>1</sup>

Копеев Ю.В., Мурзин В.Н.<sup>2</sup>

### Microwave properties of resonance tunnel heterostructures to create multifunction microwave integrated circuits and terahertz oscillators

Представлены результаты исследований, направленных на изучение физических процессов резонансного туннелирования в элементах полупроводниковой гетероструктурной наноэлектроники на квантовых эффектах сверхвысокого быстродействия с целью создания элементной базы многофункциональных СВЧ-микросхем и генераторов гигагерцового, субтерагерцового и терагерцового диапазона.

**Ключевые слова:** квантовые эффекты сверхвысокого быстродействия, резонансное туннелирование, гетероструктуры, многофункциональные СВЧ-микросхемы, элементная база наноэлектроники, терагерцовые частоты.

The resonance-tunneling quantum phenomena in heterostructure semiconductor nanoelectronic elements were investigated to be directed with the purpose of creation of new class of multifunction high-frequency microschemes and high-frequency generators in gigahertz, subterahertz and terahertz frequency regions.

**Keywords:** quantum phenomena of high performance, resonance-tunneling, heterostructure, nanoelectronics, multifunction high-frequency microschemes, terahertz frequencies.

Работа посвящена исследованиям физических процессов в элементах полупроводниковой гетероструктурной наноэлектроники на квантовых эффектах сверхвысокого быстродействия с целью создания элементной базы многофункциональных СВЧ-микросхем и генераторов микроволнового диапазона. Конечной целью работы является разработка конструктивно-технологических методов создания монолитно-интегрированных многофункциональных элементов СВЧ-электроники гигагерцового диапазона на основе туннельно-резо-

нансных диодных (ТРД) гетероструктур полупроводниковых соединений  $A_3B_5$ .

Продвижение твердотельной электроники в сторону терагерцовых частот и сверхвысокого быстродействия является одной из наиболее актуальных проблем, с решением которой связано развитие новых направлений в информатике, системах связи, медицине, биологии, в целом ряде других областей науки и техники. Современная промышленность и разработчики оборудования различного назначения испытывают возрастающую потребность в электрон-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-12438-офи\_м).

<sup>2</sup>  Юрий Васильевич Копеев, академик, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Московский государственный институт электронной техники (технический университет), e-mail: kopaev@sci.lebedev.ru.



Владимир Николаевич Мурзин, профессор, д.ф.-м.н., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, e-mail: murzin@sci.lebedev.ru.

ной компонентной базе цифровых и цифро-аналоговых интегральных схем, работающих в гигагерцовом диапазоне частот. К таким системам относятся широкополосная радиосвязь, скоростные системы передачи данных, системы радиовидения и интроскопии, измерительная техника, техника охранных и инспекционных систем, системы радиолокации, включая подповерхностную радиолокацию.

Отечественные научные центры имеют приоритетные результаты в этой области, но развитие данного направления сдерживается отсутствием необходимой элементной базы высокого быстродействия. Достижение требуемых характеристик на основе стандартной кремниевой технологии требует колоссальных вложений в промышленную технологию литографии в глубокой субмикронной и нанометровой областях. Проект посвящен альтернативному направлению с использованием новых физических принципов по созданию быстродействующих функционально интегрированных наноструктур на основе ТРД, обладающих рекордным быстродействием (время переходных процессов менее 1 пс, что сопоставимо с быстродействием сверхпроводящих приборов на эффекте Джозефсона). Наиболее подходящей в этом случае является радиационно-стойкая электронная компонентная база на основе соединений группы  $A_3B_5$ . Тенденции современного развития электроники предполагают дальнейшую микроминиатюризацию и усложнение функциональных возможностей элементов. В этой связи авторами проекта была впервые разработана и освоена технология создания монолитно-интегрированных схем, сочетающих классические элементы на полевых транзисторах и диодах Шоттки с квантовыми элементами типа ТРД, выполненные по планарной технологии.

Сочетание данных технологий и новых решений по созданию многофункциональных устройств на основе ТРД и других элементов в одной интегральной схеме открывает возможности разработки нового класса схем сверхвысокого быстродействия, превосходящих по своим динамическим характеристикам и энергопотреблению существующие в настоящее время полупроводниковые интегральные схемы [1]. В качестве примера реализации данных технологий в программу проекта включена разработка микросхемы устройств выборки и хранения (УВХ) на основе ТРД, предназначенной

для обеспечения квантования и дискретизации мгновенных значений аналоговых и импульсных сигналов в сверхбыстродействующих аналого-цифровых преобразователях (АЦП).

Существенное место в работе занимают исследования закономерностей резонансного туннелирования, поперечного транспорта, сверхвысокочастотных свойств ТРД как дискретного элемента, исследования по разработке физических принципов усиления, генерации и преобразования электромагнитного излучения в ТРД в области субтерагерцовых и терагерцовых частот. Рабочий режим широко используемых в настоящее время у нас в стране и за рубежом высокочастотных генераторов на диодах Ганна и на лавинно-пролетных диодах ограничен частотным порогом порядка сотни гигагерц. ТРД свободны от этого ограничения. Проект не развивает зарубежные достижения, а основан на результатах отечественных работ, согласно которым реализация в ТРД «квантового» режима усиления обещает резкое увеличение выходной мощности генерации в субтерагерцовом и терагерцовом диапазоне, что открывает возможности создания нового класса твердотельных генераторных и преобразовательных устройств этого диапазона [2-6].

Выполненные исследования включали изучение закономерностей резонансного туннелирования, поперечного транспорта и сверхвысокочастотных свойств ТРД в классическом и квантовом режимах усиления в широком диапазоне частот, в том числе в области субтерагерцовых и терагерцовых частот; схемотехническое проектирование микросхемы УВХ для сверхвысокочастотных АЦП; отработку технологических методов и операций формирования ТРД и монолитно-интегрированных функциональных и многофункциональных схем на их основе (соединения  $A_3B_5$ ).

#### **Исследование закономерностей резонансного туннелирования и сверхвысокочастотных свойств ТРД, классических и квантовых механизмов усиления в области субтерагерцовых и терагерцовых частот**

Главным базовым элементом во всех разрабатываемых монолитно-интегрированных многофункциональных СВЧ-микросхемах гигагерцового диапазона является ТРД гетероструктура, обеспечивающая высокое быстродействие ( $<1$  пс) и более высокую плотность

тока в максимуме ВАХ ( $\sim 10^5$  А/см<sup>2</sup>) по сравнению с обычным туннельным диодом ( $\sim 10^3$  А/см<sup>2</sup>). Основные усилия на первом этапе были направлены на численное моделирование и изучение высокочастотных свойств ТРД, в том числе в «квантовом режиме» усиления, обещающем, согласно теоретическим оценкам, резкое увеличение выходной мощности генерации в области терагерцовых частот [1–3].

Исследованы особенности линейного сверхвысокочастотного отклика и стационарной проводимости в GaAs/AlAs ТРД-структурах различной конфигурации в условиях инжекции моноэнергетического и немонаэнергетического распределения электронов в эмиттерной части структуры. Показано [3], что во всех этих случаях квантовый механизм усиления обеспечивает резкое увеличение сверхвысокочастотного отклика в области субтерагерцовых и терагерцовых частот. Показано, что в условиях моноэнергетического распределения электронов проявление «квантового» режима усиления возможно не только в терагерцовом диапазоне, но и при более низких частотах в сотни гигагерц. Вместо падения сигнала с ростом частоты в этом случае наблюдается возрастание высокочастотного отклика (рис. 1).

Учет фермиевского распределения носителей в эмиттере приводит к существенным из-

менениям частотных зависимостей высокочастотного отклика [4]. Согласно проведенным расчетам, оптимальными с точки зрения реализации квантового режима усиления являются асимметричные ТРД с менее прозрачным эмиттерным барьером. Исследованы нелинейные сверхвысокочастотные свойства ТРД в условиях взаимодействия с интенсивным высокочастотным электромагнитным полем [5]. Показано (рис. 2), что с ростом мощности СВЧ высокочастотный отклик возрастает как в низкочастотной области (классический механизм усиления), так и в высокочастотной области при энергетическом сдвиге  $\delta$  (уровня энергии электронов в эмиттерной части относительно резонансного уровня в яме ТРД), превышающем квантовую ширину резонансного уровня  $\delta > \Gamma$  (квантовый механизм усиления).

В результате проведенных исследований показано, что в ТРД, как в линейном, так и в нелинейном случае коэффициент усиления в области субтерагерцовых и терагерцовых частот при реализации «квантового механизма» может на порядки превосходить обычный классический механизм усиления [4–5]. С ростом интенсивности СВЧ-поля относительная эффективность квантового механизма усиления в области терагерцовых частот возрастает и при мощностях излучения в несколько милливатт

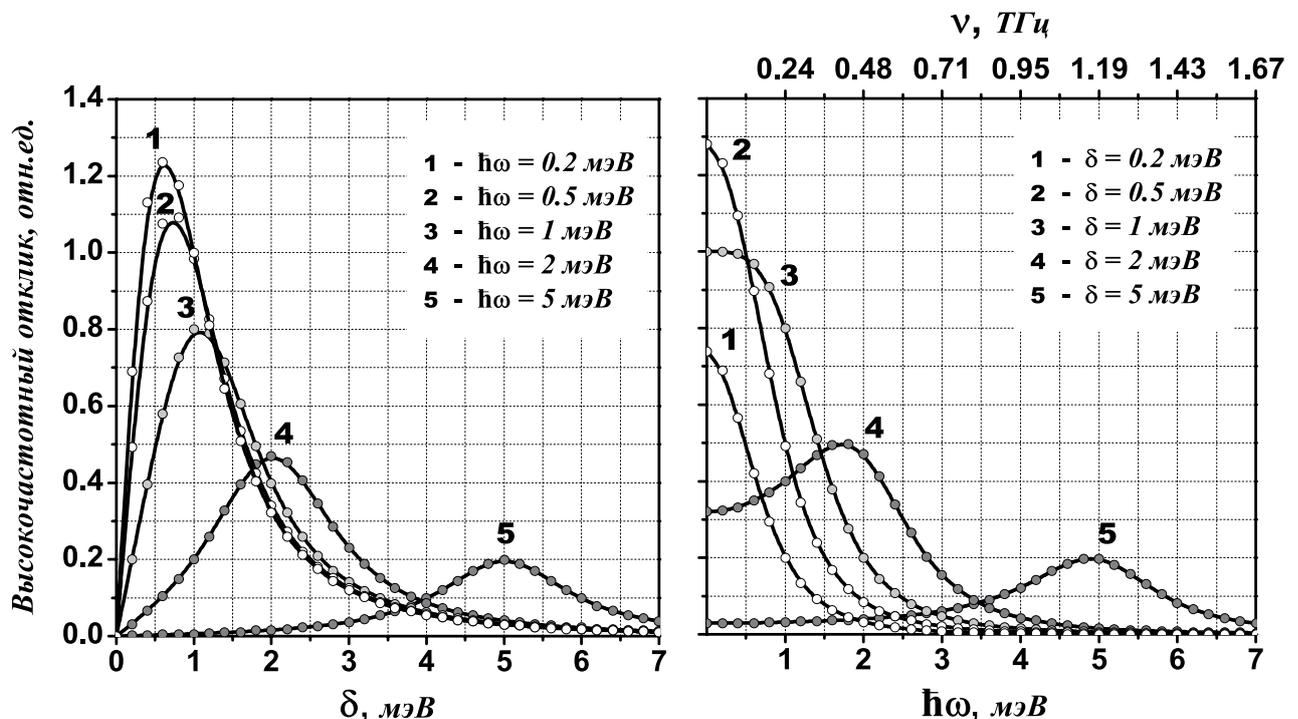


Рис. 1. Рассчитанные в рамках линейной теории зависимости высокочастотного отклика ТРД от частоты при разных сдвигах  $\delta$  уровня электронов в эмиттере относительно резонансного уровня (при СВЧ-мощности  $P < 1$  мВт).

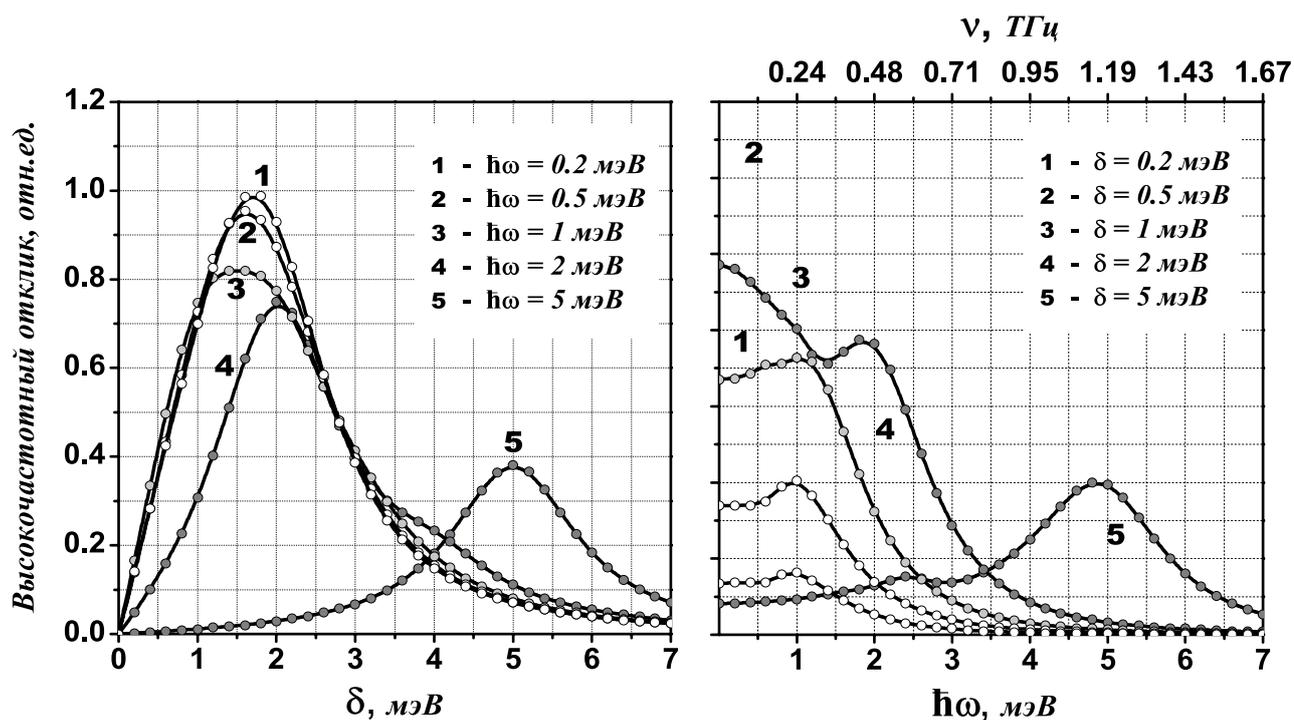


Рис. 2. Рассчитанные в рамках линейной теории зависимости высокочастотного отклика ТРД от частоты при разных сдвигах  $\delta$  уровня электронов в эмиттере относительно резонансного уровня (при СВЧ-мощности  $P = 10$  мВт).

( $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>) оказывается сопоставимой с эффективностью классического механизма на низких частотах [5]. На основе выполненных исследований определены параметры структур и условия, оптимальные с точки зрения наблюдения квантового механизма усиления в РТД, выбраны варианты схем конструкции генераторных элементов на основе ТРД с микрополосковыми линиями, обеспечивающими наилучшее волновое согласование в области наиболее коротких волн субтерагерцового и терагерцового диапазона [7,8]. Показано, что квантовый механизм усиления в ТРД, эффективный в наиболее коротковолновой области частот, открывает потенциально новые возможности для продвижения твердотельных генераторов в сторону терагерцовых частот.

#### Отработка технологических методов и операций формирования элементов ТРД и монолитно-интегрированных функциональных и многофункциональных схем на их основе

Поскольку базовым элементом во всех схемах является ТРД, обеспечивающий высокое быстродействие монолитно-интегрированных микросхем, приоритетные усилия были направлены на отработку методов выращивания GaAs/AlAs, GaAs/AlGaAs гетероструктур вы-



Рис. 3. Электронное изображение поперечного сечения ТРД гетероструктуры на основе GaAs/AlAs (23/45/20 Å).

сокой однородности для ТРД с необходимыми электрическими характеристиками (рис. 3).

Разработана методика оптического мониторинга процесса выращивания GaAs/AlAs гетероструктур с использованием спектрометрии анизотропного отражения, позволяющая контролировать толщину слоев и резкость гетерограниц с разрешением 1 монослой (МС) в реальном масштабе времени (in situ) [9].

С использованием разработанных методов оптимизирован процесс выращивания гетероструктур для изготовления интегральных схем. Проведены исследования in situ формирования эпитаксиальных слоев Al на поверхности

GaAs (001) методами спектрального отражения (СО), спектрального анизотропного отражения (САО) и дифракции быстрых электронов (ДБЭ), а также структурные исследования полученных слоев Al методами просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и прецизионной рентгеновской дифрактометрии. Показано, что эпитаксиальный слой имеет блочную структуру, а ориентационное соотношение слоя и подложки имеет вид  $Al\{110\}/GaAs(001)$ . Блочная структура слоя Al не препятствует образованию высококачественного контакта Шоттки Al/GaAs [9]. Исследовались различные стадии процесса выращивания гетероструктур: сгон окисла, рост буферного слоя, формирование активной области. Показано, что на всех этапах формирования гетероструктур методика оптического мониторинга обладает достаточно высокой информативностью для отработки и контроля технологического процесса выращивания.

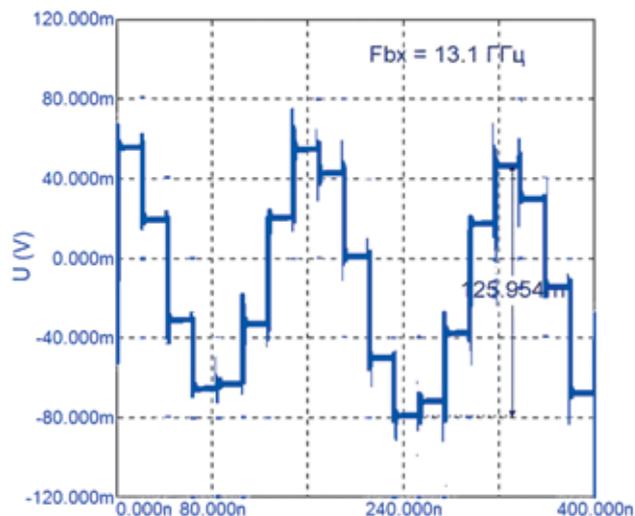
Проведена оптимизация параметров образцов и технологических операций выращивания гетероструктур. С использованием разработанных методик изготовлены и протестированы РТД-структуры, отвечающие по качеству требованиям, заложенным в проекте. Отработаны технологические операции формирования как отдельных элементов ТРД, так и в целом монолитно-интегрированных многофункциональных схем на их основе.

#### **Разработка физических принципов и конструктивно-технологических методов создания функциональных и многофункциональных СВЧ-микросхем на основе ТРД-структур**

Выполнены исследования по разработке физических принципов и конструктивно-технологических методов создания СВЧ электронной базы на основе ТРД с быстродействием свыше 10 ГГц, обеспечивающей возможность реализации функциональных элементов и многофункциональных СВЧ-микросхем и приборов.

Возможности создания многофункциональных СВЧ-микросхем высокого быстродействия продемонстрированы на примере устройства выборки-хранения (УВХ) на основе ТРД в монолитно-интегрированном варианте с включением транзисторов, диодов Шоттки и других элементов в одном кристалле.

Разработаны электрические схемы УВХ на основе ТРД, проведено схемотехническое мо-



**Рис. 4.** Данные расчета мгновенных значений аналогового сигнала на выходе УВХ-структуры.

делирование процесса регистрации и преобразования периодического сигнала произвольной формы в монолитно-интегрированном УВХ в пакете программ MicroCap-9. Расчеты проводились с использованием разработанной эквивалентной электрической схемы ТРД. Для описания статической вольт-амперной характеристики ТРД разработана математическая модель, основанная на аппроксимации экспериментальных вольт-амперных характеристик. В качестве аппроксимирующей функции используется линейная комбинация возрастающих и затухающих экспонент, показатели которых являются полиномиальными функциями напряжения.

Предложенная схема УВХ на ТРД состоит из двух идентичных каналов формирования паразитных стробов для управления четырехдиодным мостом (смесителем), обеспечивающая, согласно выполненным расчетам, дискретизацию сигналов с полосой частот до 12 ГГц. В процессе разработки формирователя импульсов рассматривались несколько вариантов схем на одном ТРД, на двух или трех параллельно включенных ТРД, на двух последовательно включенных ТРД. Реализован на данном этапе вариант с одним ТРД как наиболее простой и надежный. Разработанная микросхема УВХ включает: блок формирователя строб-импульса с обострителем фронта импульса на основе ТРД, который должен обеспечить времена переключения в несколько пс, и накопительный блок с конденсатором и ключом на диодах Шоттки, обеспечивающий работу при частотах

в несколько десятков гигагерц. Блок формирования обеспечивает укорочение поступающих на вход УВХ строб-импульсов длительностью порядка 300 пс (при фронтах 50 пс) до 150 пс с помощью микрополосковых линий со шлейфами и последующее сокращение длительности импульсов до 60–80 пс с помощью ТРД обострителей (уменьшающих длительность фронтов до 10–20 пс).

На рис. 4 представлены результаты расчета временной «осциллограммы» выходного синусоидального сигнала при подаче на вход быстропеременного сигнала частотой 13,1 ГГц (период 76 пс). Частота регистрируемого на выходе сигнала УВХ составляет порядка 6,2 МГц (период 160 мкс), то есть, попадает в диапазон частот, доступный для регистрации обычными выпускаемыми промышленностью осциллографами. Используемая в расчетах длительность периода строб-сигналов 23 нс, период следования строб-импульсов варьировался в окрестности 21 нс для получения на выходе синусоподобного сигнала (расширенной копии входного сигнала). На рис. 5 приведены результаты расчета зависимости величины коэффициента передачи УВХ от частоты аналогового сигнала на примере синусоидального сигнала в интервале частот 1–13 ГГц. Падение сигнала начинается при частотах, превышающих 1 ГГц. Если считать допустимым снижение коэффициента передачи до уровня 0,4, то на основании проведенных расчетов можно заключить, что рабочая полоса пропускания частот разрабатываемого УВХ достигает 10 ГГц. Это распространенный

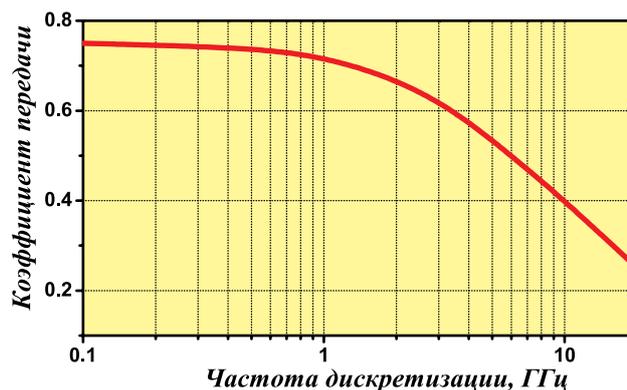


Рис. 5. Данные расчета зависимости коэффициента передачи УВХ от частоты преобразуемого сигнала.

диапазон телекоммуникационных и радарных систем. В настоящее время такого типа УВХ в России нет.

В результате численного моделирования продемонстрирована эффективность ТРД в качестве обострителей фронтов и показана возможность достижения запланированных в проекте параметров монолитно-интегрированных УВХ для регистрации и оцифровки коротких аналоговых и импульсных сигналов с быстродействием выше 10 ГГц при длительности строба менее 100 пс и значениях коэффициента передачи 0,75–0,4 в интервале частот 1–13 ГГц. По результатам выполненных исследований разработан топологический проект УВХ для изготовления комплекта рабочих фотошаблонов. Топологическая схема монолитно-интегрированного устройства УВХ на основе ТРД, содержащего более 40 элементов, приведена на рис. 6.

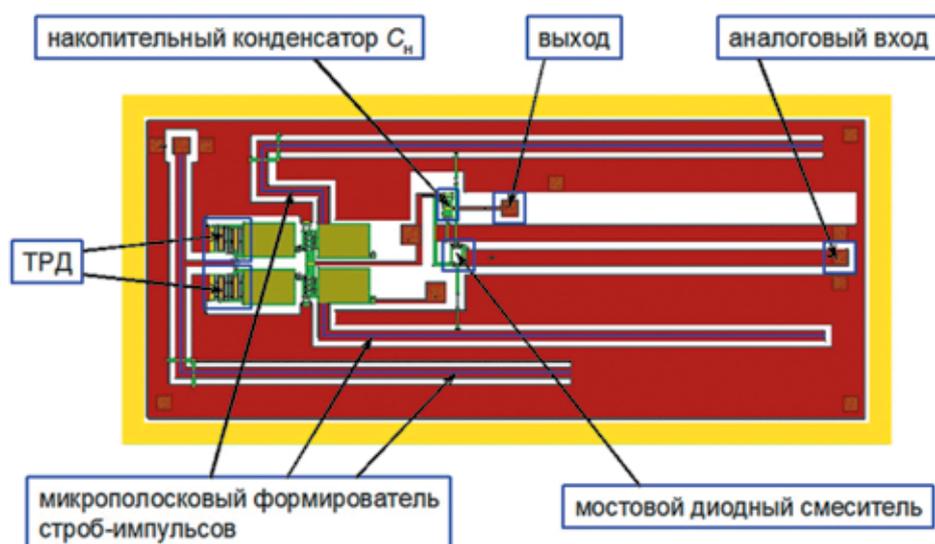


Рис. 6. Топологическая схема монолитно-интегрированного УВХ на основе ТРД.

Помимо данных, относящихся к высокоскоростным УВХ, которые являются основным элементом в аналого-цифровых преобразователях, в докладе приводятся также данные для других многофункциональных СВЧ микросхем высокого быстродействия (инверторы, триггеры, компараторы и др.), разработанных и созданных на основе ТРД совместно с полевыми транзисторами и другими элементами в единой монолитно-интегрированной структуре. С использованием результатов схемотехнического и топологического проектирования разработан технологический маршрут изготовления базовых элементов микросхем «Инвертор НЕ», «Трехэлементный инвертор», «Схема согласования каскадов инверторов», «Логический элемент

ИЛИ-НЕ» «Триггер» и изготовлены образцы микросхем с временами переключения, не превышающими 50 пс. Поскольку базовым элементом во всех СВЧ микросхемах является ТРД, одно из центральных мест занимает технология изготовления GaAs/AlAs, GaAs/AlGaAs гетероструктур высокого качества с требуемыми электрофизическими характеристиками [1].

Полученные данные свидетельствуют о реальной возможности создания электронной компонентной базы с быстродействием свыше 10 ГГц, обеспечивающей реализацию различного типа функциональных и многофункциональных СВЧ микросхем, используемых в скоростных АЦП и других приборах и устройствах твердотельной электроники.

### Список литературы

1. *Murzin V.N., Kopaev Yu.V.* Microwave properties of resonance tunnel heterostructures to create multifunction microwave integrated circuits and terahertz oscillators// Nanotechnology International Forum, Moscow, November 1-3, 2010, Rusnanotech, v.1, p. 1-2, 2010.
2. *Елесин В.Ф.* К теории когерентной генерации резонансно-туннельного диода // ЖЭТФ. 1999. Т. 116, вып. 2(8), с. 704-716.
3. *Клименко О.А., Дьяконова Н.В., Мурзин В.Н. и др.* Высокочастотный отклик и возможности регистрации квантового режима усиления в резонансно-туннельных диодных структурах // КСФ. 2009, №1, С.24–35.
4. *Клименко О.А., Дьяконова Н.В., Мурзин В.Н. и др.* О влиянии распределения электронов в приконтактной области и асимметрии РТД структуры на высокочастотный отклик и возможности регистрации квантового режима усиления во внешнем высокочастотном электрическом поле // КСФ. 2009, №1, С.36-48.
5. *Клименко О.А., Митягин Ю.А., Мурзин В.Н. и др.* Нелинейный квантовый режим усиления электромагнитных волн терагерцового диапазона в резонансно-туннельных гетероструктурах // КСФ. 2011, № 11, С 39-48.
6. *Савинов С.А., Мурзин В.Н.* Эффект энергетической фильтрации и возможности генерации терагерцового излучения в резонансно-туннельных структурах с несколькими квантовыми ямами // Письма в ЖЭТФ. 2011, Т. 93(3), С. 171-176.
7. *Chernyaev P., Dravin V. A., Murzin V. N. et al.* Principal problems of quality improvement for high-speed planar transmission lines issued from studies of high-Q microstrip resonators // International Conference Micro- and nanoelectronics – 2009, ICMNE 2009, October 5th-9th, 2009, Moscow - Zvenigorod, Russia, Book of Abstracts, p. P1-18.
8. *Волчков Н.А., Карузский А.Л., Пересторонин А.В.* Дополнительные СВЧ-волны в системах с проводимостью металлов и сверхпроводимостью // ЖЭТФ. 2010, Т.138, вып.2(8), с.329-334.
9. *Казаков И.П., Глазырин Е.В., Савинов С.А., Цехош В.И., Шмелев С.С.* Оптическая диагностика поверхности наногетероструктур в процессе выращивания // ФТП. 2010, 44(11), , с.1489-1493.

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОМОДОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ СО СВЕРХШИРОКИМИ СПЕКТРАМИ ГЕНЕРАЦИИ<sup>1</sup>

Максимов М.В., Гордеев Н.Ю., Новиков И.И., Савельев А.В., Шерняков Ю.М., Жуков А.Е.<sup>2</sup>

### Single special mode laser sources based on quantum dots with ultrabroad generation spectra

Исследованы зависимости ширины спектра лазерной генерации от температуры и выходной мощности в лазерах на основе массивов самоорганизующихся квантовых точек InAs/InGaAs, излучающих в диапазоне длин волн 1,3 мкм. Разработанная теоретическая модель позволила выявить основные физические причины значительного уширения спектров генерации в лазерах на квантовых точках и хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Предложена концепция дифракционного

The dependence of lasing spectra width on temperature and output power are studied for lasers based on InAs/InGaAs self-organized quantum dots emitting in 1.3 micrometer optical range. Developed theoretical model revealed main physical reasons for a significant broadening of lasing spectra in quantum dot lasers and shows good agreement with experimental data. A conceptual design for a diffraction optical filter to suppress high order in edge emitting laser diodes with active area based on quantum dots is developed. The

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-12441-офи\_м).

<sup>2</sup>  Михаил Викторович Максимов, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, e-mail: maximov@beam.ioffe.ru.



Никита Юрьевич Гордеев, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, e-mail: gordeev@switch.ioffe.ru.



Иннокентий Игоревич Новиков, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, e-mail: novikov@switch.ioffe.ru.



Артём Владимирович Савельев, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского академического университета — научно-образовательного центра нанотехнологий РАН, e-mail: savelev@mail.ioffe.ru.



Юрий Михайлович Шерняков, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского академического университета — научно-образовательного центра нанотехнологий РАН, e-mail: yuri.shernyakov@mail.ioffe.ru.



Алексей Евгеньевич Жуков, член-корреспондент РАН, проректор, заведующий лабораторией Санкт-Петербургского академического университета — научно-образовательного центра нанотехнологий РАН, e-mail: Zhukov@beam.ioffe.ru.

оптического фильтра для подавления генерации мод высокого порядка в полосковых лазерных диодах с активной областью на основе квантовых точек. Использование фильтра позволило увеличить ширину полоска лазера и привело к увеличению выходной оптической мощности до 700 мВт при сохранении пространственно-одномодового режима излучения.

**Ключевые слова:** лазеры на квантовых точках, широкополосная генерация, пространственно одномодовые полупроводниковые лазеры, подавление мод высокого порядка.

use of the filter allowed increasing the width of the laser cavity and resulted in an increase of output power up to 700 mW in single lateral mode regime.

**Keywords:** quantum dot lasers, broadband lasing, single spatial mode semiconductor lasers, suppression of high order modes.

### Введение

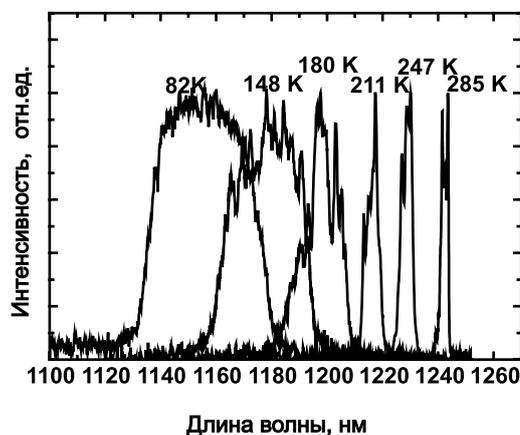
Традиционно считается, что спектр выходного излучения лазера должен обладать насколько возможно меньшей шириной. В то же время оказывается, что для многих приборных применений наличие узкой спектральной ширины излучения вовсе не обязательно, а в некоторых случаях и нежелательно. Одним из таких применений является оптическая когерентная томография (ОКТ) — интерферометрический метод бесконтактного исследования внутренней микроструктуры частично прозрачных биологических, в том числе живых тканей. Пространственное разрешение ОКТ обратно пропорционально спектральной ширине используемого источника излучения. Оптический источник, предназначенный для использования в ОКТ-сканере, должен сочетать низкую степень временной когерентности (для достижения высокого разрешения по глубине) с высокой степенью пространственной когерентности (для достижения высокого латерального разрешения). Это обуславливает интерес к разработке дешевых широкополосных (более 100 нм) источников излучения на основе полупроводниковых диодов.

В современных системах оптической передачи информации используются массивы одночастотных лазеров, каждый из которых чрезвычайно сложен в изготовлении. Привлекательной альтернативой является применение единственного оптического источника, способного одновременно излучать множество спектрально-разделенных каналов, например, многомодового Фабри-Перо лазера. Необходимым условием является достижение достаточной широкого спектра излучения и высокого уровня мощности, приходящегося на одну продольную моду.

Основной задачей данных исследований является развитие теоретического описания и экспериментальных методов создания источников лазерного излучения, работающих при комнатной температуре и обладающих сверхширокими спектрами лазерной генерации и высокой выходной оптической мощностью в одномодовом режиме для возможных применений в устройствах оптической передачи и обработки информации, а также в установках оптической когерентной томографии.

### Температурная и токовая зависимости ширины спектра генерации в лазерах на квантовых точках

В рамках данной работы были экспериментально исследованы зависимости ширины спектра лазерной генерации от температуры и выходной мощности в лазерах на основе массивов самоорганизующихся квантовых точек InAs/InGaAs [1, 2]. При понижении температуры от 300К до 77К происходит увеличение полуширины спектра лазерной генерации от 5 до 47 meV (рис. 1).



**Рис. 1.** Спектры лазерной генерации при различных температурах и токе накачки  $I \approx 1,2$  А.

Такое значительное уширение при малых токах накачки является свойством лазеров на квантовых точках и не наблюдается для лазеров на основе квантовых ям и объемных материалов. С ростом тока инжекции также происходит значительное уширение линии лазерной генерации. Так, например, при комнатной температуре спектр уширяется от 2 до 15 мЭВ (рис. 2).

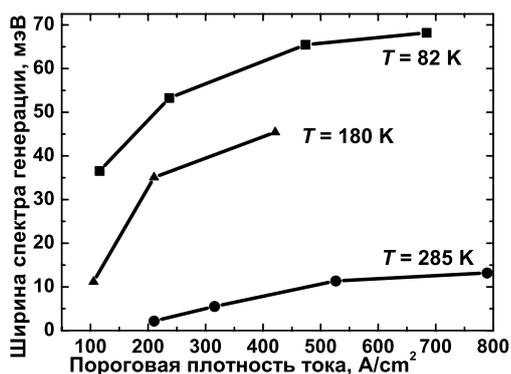


Рис. 2. Ширина спектра лазерной генерации в зависимости от тока накачки при различных температурах.

Показано, что изменения всех трех параметров действуют однонаправленно на уширение линии лазерной генерации с уменьшением температуры. Тем не менее, стоит отметить, что ключевым является уменьшение параметра насыщения, вызванное ростом времени поступления носителей в КТ, участвующие в лазерной генерации, вследствие замедления выброса не участвующих в лазерной генерации электронов и дырок из КТ. Соответственно, это приводит к более активному «выжиганию» носителей светом при низких температурах. Чтобы подчеркнуть значимость параметра насыщения, можно отметить, что при низких температурах ширина линии генерации практически не зависит от величины однородного уширения.

Рассмотрим зависимость ширины линии генерации от выходной мощности лазера. В этом случае рост спектральной ширины генерации происходит только за счет увеличения параметра насыщения, так как ширина спектра усиления на пороге генерации и величина однородного уширения не меняются. Как видно из рис. 3, результаты вычислений на основе развитого теоретического подхода хорошо согласуются с экспериментальными зависимостями ширины линии генерации как

от температуры, так и от тока накачки (т. е. выходной мощности).

### Интегрированный дифракционный фильтр оптических мод

С точки зрения практического применения полупроводниковых лазеров чрезвычайно

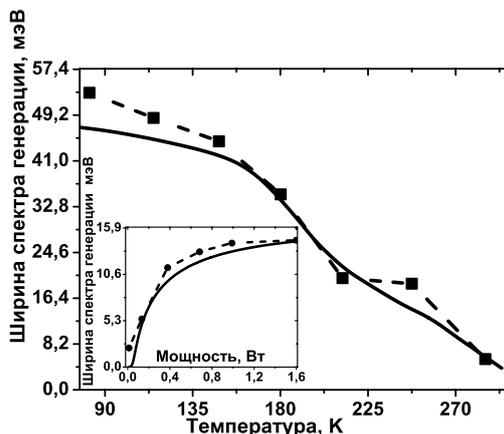


Рис. 3. Экспериментальная зависимость ширины спектра лазерной генерации от температуры и результаты моделирования (сплошная линия) при выходной мощности  $P = 165$  мВт. Вставка — зависимость ширины спектра лазерной генерации от выходной мощности  $W$  при температуре  $T = 285$  К: эксперимент и теория (сплошная линия).

важным является получение максимальной световой мощности при устойчивом режиме генерации в фундаментальной поперечной моде. Максимальная мощность излучения торцевого лазера обычно возрастает при увеличении ширины его полоска. В то же время, увеличение ширины полоска лазера с гребневым волноводом приводит к повышению вероятности возгорания мод более высоких порядков и тем самым ограничивает максимальную мощность лазера в пространственно-одномодовом режиме.

Таким образом, расширение полоска с целью увеличения оптической мощности должно сопровождаться мерами по подавлению возгорания мод высоких порядков, что невозможно в лазере с гребневым волноводом традиционной конструкции, имеющем одинаковую ширину по всей длине резонатора.

В рамках данных исследований была разработана конструкция дифракционного оптического фильтра, позволяющего эффективно подавлять генерацию мод высокого

порядка [3, 4]. Фильтр представлял собой часть волновода с шириной, в несколько раз превышающей ширину полоска в основной части (рис. 4а).

В широкой фильтрующей секции моды могли свободно дифрагировать в горизонтальном направлении. Фундаментальная мода имеет наименьшую расходимость по сравнению с модами высоких порядков, поэтому она имеет наименьшие дифракционные потери при прохождении фильтрующей секции. Потери мод более высоких порядков в несколько раз выше, вследствие чего они не возбуждаются. Такой метод фильтрации мод существенно проще других решений, предполагающих создание пассивных прозрачных областей. Кроме того, создание фильтра естественным образом входит в процесс постростовой обработки лазерной гетероструктуры.

На рисунке 4б представлена ватт-амперная характеристика, дальнейшее поле излучения и спектр генерации лазера с длиной резонатора 2,2 мм, содержащего одну фильтрующую секцию длиной 100 мкм, работающего при непрерывной накачке. Из картины дальнего поля видно, что даже при близком к максимальному току накачки 2,5 А излучение имеет одномодовый характер. Распределение интенсивности излучения в дальнем поле с высокой точностью описывается функцией Гаусса. Максимальная мощность излучения в пространственно-одномодовом режиме составила величину более 0,7 Вт.

Для сравнения был изготовлен лазер аналогичной конструкции, но не содержащий фильтрующего элемента. Излучение такого лазера носит существенно неодномодовый характер уже при малых токах накачки. Максимальная мощность излучения такого лазерного диода в одномодовом режиме не превысила 40 мВт.

### Заключение

Полученные результаты находятся на высоком мировом уровне. Достигнутое значение оп-

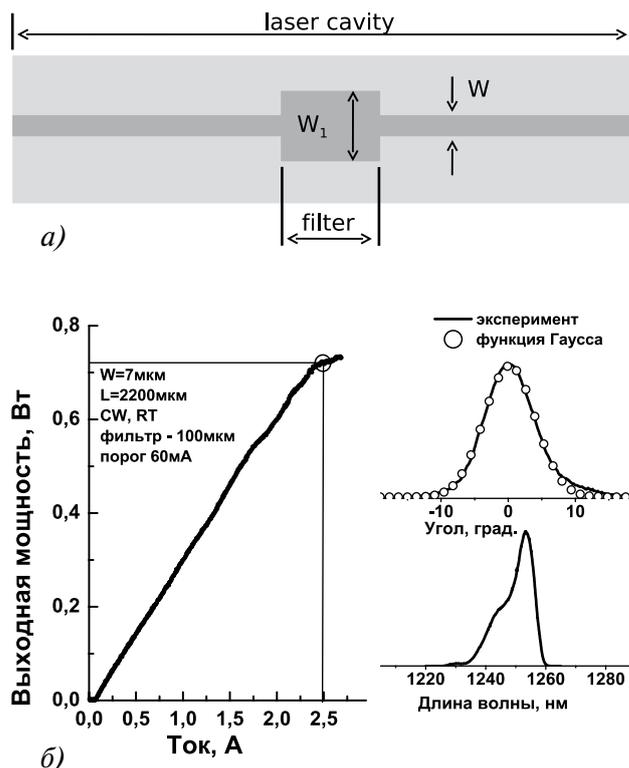


Рис. 4. (а) Схема полоскового лазера (вид сверху) с интегрированным фильтром оптических мод высокого порядка ( $W$  — ширина полоска,  $W_1$  — ширина фильтра); (б) ватт-амперная характеристика лазера с фильтром длиной 100 мкм. Ширина полоска 7 мкм. Представлены спектр и дальнее поле излучения при токе накачки 2,5 А.

тической мощности (720 мВт) является рекордным для одномодовых лазеров на квантовых точках, излучающего в диапазоне 1,3 мкм. Ширина спектра лазерной генерации (15 нм) соответствует лучшим опубликованным значениям для приборов аналогичной конструкции. Разработанный теоретический подход позволяет с большой точностью описывать зависимости ширины спектра лазерной генерации от температуры и тока накачки, при этом превосходя существующие в настоящее время модели с точки зрения простоты и удобства интерпретации наблюдаемых физических закономерностей.

### Литература

1. Савельев А.В. и др. ФТП 43(12), 1641 (2009).
2. Новиков И.И. и др. Тезисы докладов симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (Звенигород, 16–18 ноября 2009 г.).
3. Савельев А.В. и др. Тезисы докладов Симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (Звенигород, 16–18 ноября 2009 г.).
4. Гордеев Н.Ю. и др. ФТП 44(10), 1401 (2010).

## РАЗРАБОТКА ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА МОДУЛЯТОРА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ШТАРКА В МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ Ge/Si С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ Ge<sup>1</sup>

Якимов А.И.<sup>2</sup>

### Development of a prototype model of the optic radiation modulator based on Stark effect in Ge/Si multilayer heterostructures with Ge quantum dots

Представлены результаты исследований квантово-размерного эффекта Штарка в многослойных гетероструктурах Ge/Si с вертикально совмещенными квантовыми точками Ge, направленных на установление основных закономерностей процессов межзонного поглощения света в квантовых точках 2-го типа в электрическом поле и разработку на этой основе опытного образца модулятора оптического излучения для волоконно-оптических линий связи (длина волны 1,3-1,5 мкм).

**Ключевые слова:** эффект Штарка, электрооптические модуляторы, квантовые ямы и квантовые точки.

The results of investigation of the quantum-confined Stark effect in multiple layers of vertically stacked Ge/Si quantum dots are presented. The work is directed to the establishment of the main regularities of the processes of interband excitonic transitions in type-II quantum dots in electric field and to the development of the electrooptical modulators for telecommunications (the wavelength range 1.3-1.5  $\mu\text{m}$ ).

**Keywords:** Stark effect, electrooptical modulators, quantum wells and quantum dots.

Поиск физических механизмов, обеспечивающих в гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками (КТ) Ge эффективную электромодуляцию пропускания фотонов с длиной волны 1,3–1,5 мкм, стимулирован проблемой разработки оптических электромодуляторов, способных встраиваться в весь комплекс фотонных компонентов на едином кремниевом чипе. Мы предлагаем использовать для решения этой проблемы квантово-размерный эффект Штарка в области межзонных переходов в вертикально совмещенных квантовых точках Ge/Si, связанных туннелированием и полями упругих деформаций кристалла. Цель работы заключается в исследовании эффекта Штарка в многослойных гетероструктурах Ge/Si с вертикально совмещенными квантовыми точками Ge, направленном на установление основных закономерностей процессов межзонного поглощения

света в квантовых точках 2-го типа в электрическом поле и разработку на этой основе опытного образца модулятора оптического излучения для волоконно-оптических линий связи.

Эффект Штарка состоит в изменении энергий электрона и дырки в электрическом поле и, как следствие, в сдвиге линии экситонного поглощения. В дипольном приближении величина штарковского сдвига пропорциональна величине дипольного момента электрон-дырочной пары и электрическому полю. В квантовых точках первого типа, в которых и электрон, и дырка находятся в одной и той же потенциальной яме, дипольный момент появляется вследствие поляризации электрон-дырочной пары. Поэтому величина штарковского сдвига пропорциональна квадрату электрического поля, поэтому, как правило, этот сдвиг не велик, причем, он является «красным» в том смысле, что

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-12393\_офи).

<sup>2</sup>  Андрей Иннокентьевич Якимов, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, e-mail: yakimov@isp.nsc.ru.

энергия перехода уменьшается в электрическом поле. Ситуация более интересна в КТ 2-го типа, в которых носители заряда разного знака разделены гетерограницей. Примером квантовых точек 2-го типа являются КТ Ge в Si, здесь дырка локализована в Ge, а электрон находится в Si. Такая система обладает встроенным дипольным моментом из-за пространственного разделения электрона и дырки. Штарковский сдвиг уже линеен по электрическому полю и может быть большим. Интересно, что направления дипольного момента, а значит, и направление штарковского сдвига, могут быть разными, в зависимости от того, как ориентирована электрон-дырочная пара относительно электрического поля.

Для возможности практического использования квантово-размерного эффекта Штарка необходимо выполнение ряда условий. Во-первых, размеры КТ должны быть достаточно малыми, чтобы обеспечить формирование дискретного спектра электронных состояний. Далее, межзонные переходы должны характеризоваться достаточной силой осциллятора для эффективной электромодуляции. Третье условие заключается в необходимости пространственного разделения электрона и дырки на расстояние, обеспечивающее достаточно большой дипольный момент. Такое разделение можно получить в квантовых точках 2-го типа с большим отношением основания к высоте либо в вертикально связанных колонках квантовых точек этого же типа с правильно подобранными параметрами. В своей работе мы развивали оба этих подхода.

Первые экспериментальные исследования эффекта Штарка в квантовых точках 2-го типа были выполнены в 2005 г. шведскими учеными [1], которые исследовали фотолюминесценцию от сверхрешетки несвязанных между собой 10-ти слоев квантовых точек Ge на чистой поверхности Si в электрическом поле и обнаружили штарковский сдвиг величиной всего 4 мЭВ. Сделанные ими оценки длины экситонного диполя дали удивительно маленькую величину 0,4 нм при высоте квантовых точек в направлении электрического поля  $>2$  нм. Этот результат может означать лишь одно — наличие релаксации упругих деформаций и проникновение электрона из Si в Ge. Для того чтобы исключить это явление, необходимо менять условия роста. В частности, добиться нужного эффекта можно понижением температуры

синтеза и увеличением скорости осаждения [2], что и было реализовано в настоящей работе. В том же 2005 г. в журнале Nature была опубликована статья, в которой сообщалось о наблюдении большого коэффициента межзонного поглощения света в гетероструктурах Ge/Si с квантовыми ямами Ge [3]. Авторами этой работы был измерен коэффициент поглощения в области 1,5 мкм, сравнимый по величине с коэффициентом поглощения в прямозонных материалах III-V групп. Однако сам штарковский сдвиг оказался не слишком велик ( $<30$  мЭВ), а природа высокой активности межзонных переходов так и осталась за кадром. Для системы Ge/Si с локализованными в нанокристаллах Ge дырками к настоящему времени накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал об энергетическом спектре дырок, пространственной конфигурации их волновых функций, спиновых явлениях, механизмах переноса заряда и взаимодействия дырок. Об электронах речь заходила лишь тогда, когда рассматривались процессы формирования в квантовых точках экситонов с пространственно разделенными компонентами. В 2005 г. на Международном Симпозиуме «Nanostructures: Physics and Technology» (г. Санкт-Петербург) авторами настоящего проекта была высказана гипотеза о том, что связанные электронные состояния в напряженных слоях квантовых точек Ge/Si (001) могут существовать и в системе не только заряженных, а также нейтральных КТ. Причина появления потенциальной ямы для электронов — неоднородное распределение механических напряжений в Si в непосредственной близости от нанокластеров Ge и, как следствие, снятие вырождения в шести Дельта-долинах в зоне проводимости Si. Причем, этот эффект должен проявляться особенно сильно в многослойных гетероструктурах Ge/Si с вертикальным совмещением расположения островков Ge. Последующие наши работы подтвердили, что формируемые многослойные структуры с вертикально совмещенными квантовыми точками представляют новый объект исследования. Полученные в ходе развития этого направления теоретические и экспериментальные результаты обладают приоритетным характером и находятся на мировом уровне физики систем пониженной размерности.

На рис.1 представлены результаты фотолюминесцентной спектроскопии квантовых точек Ge, сформированных по механизму Фольмера–Ве-

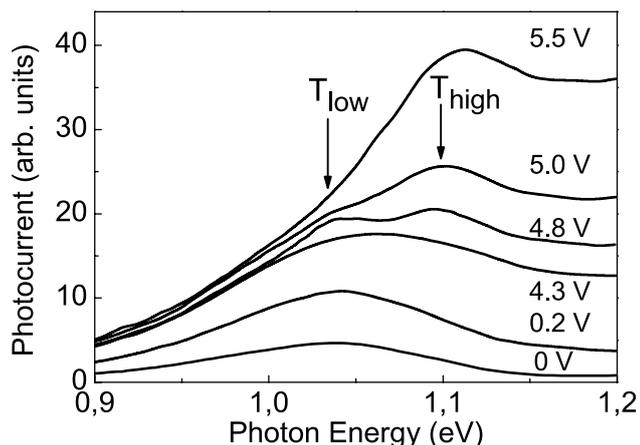


Рис. 1. Спектры фототока в зависимости от приложенного обратного смещения.

бера на частично окисленной поверхности Si. Нанокластеры Ge имели форму полусфер диаметром 6 нм и отношением основания к высоте около  $\frac{1}{2}$ . В электрическом поле наблюдается расщепление линий оптических переходов на два пика, один из которых смещается в область больших энергий, другой — в область меньших энергий. Результаты объясняются образованием встроенных электрических диполей электрон-дырка двух типов, различающихся направлением дипольного момента и возникающих за счет локализации одного электрона в области вершины нанокластера Ge, а другого электрона — под основанием нанокластера.

На рис. 2 приведены результаты исследования электропропускания в Si pin-диоде, содержащем в базовой области 20 слоев КТ Ge, полученных в режиме роста Странского–Крастанова. В спектрах наблюдаются 3 полосы поглощения. Первая ( $\sim 0,4$  эВ) связана с внутризонным переходом дырки в островках Ge из связанного состояния в делокализованные, вторая ( $\sim 0,7$  эВ) и третья ( $\sim 0,9$  эВ) — межзонные переходы в КТ и смачивающем слое Ge. Для квантовых точек в слабых электрических полях обнаружен «синий» штарковский сдвиг, при увеличении поля энергия перехода начинает уменьшаться. Последнее обстоятельство связано с проникновением электрона из Si в Ge-барьер и увеличением энергии кулоновского взаимодействия электрона и дырки.

Нами были проведены теоретические исследования пространственной конфигурации экситонов и силы осциллятора, характеризующей интенсивность межзонных оптических переходов в колонках вертикально связанных квантовых точках Ge/Si. На практике слои вер-

тикально сопряженных нанокластеров Ge в Si формируются в режиме роста по механизму Странского–Крастанова на чистой поверхности Si (001). Такие нанокластеры, как правило, имеют форму пирамид. Было показано, что энергии экситонных переходов с участием связывающей и антисвязывающей молекулярных орбиталей дырок в сверхрешетке из квантовых точек Ge/Si соответствуют телекоммуникационным длинам волн излучения 1,3–1,6 мкм и варьируются путем изменения толщины слоя Si между квантовыми точками и размеров квантовых точек (рис.3). Установлено, что существуют условия (размеры квантовых точек, расстояние между точками, число точек в колонке), при которых происходит многократное увеличение силы осциллятора экситонных существенная часть волновых функций электрона и дырки находятся в одной и той же области пространства, обеспечивая тем самым возможность прямых переходов в реальном пространстве. Например, 5-ти кратное увеличение интенсивности экситонного поглощения наблюдалось для двойных квантовых точек Ge диаметром 10 нм и разделенных слоем Si толщиной 3 нм. Сделанные на основе теоретического анализа выводы нашли свое подтверждение в экспериментах по измерению спектров фотопоглоще-

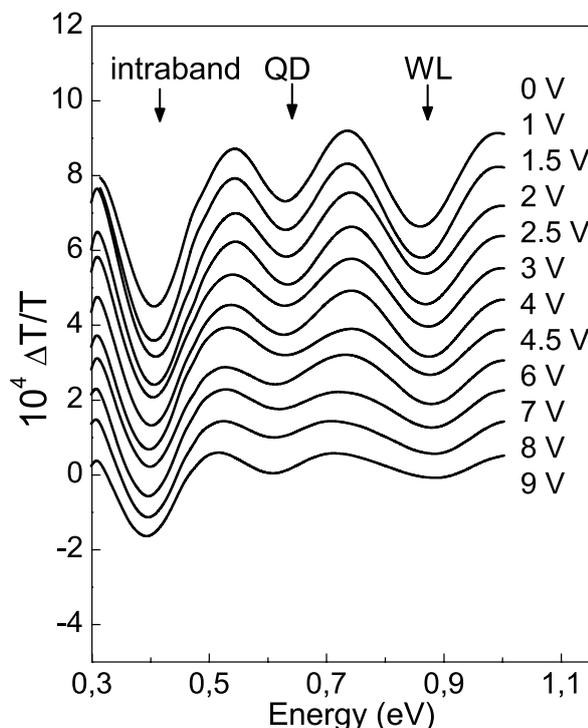


Рис. 2. Спектры электропропускания в зависимости от приложенного обратного смещения.

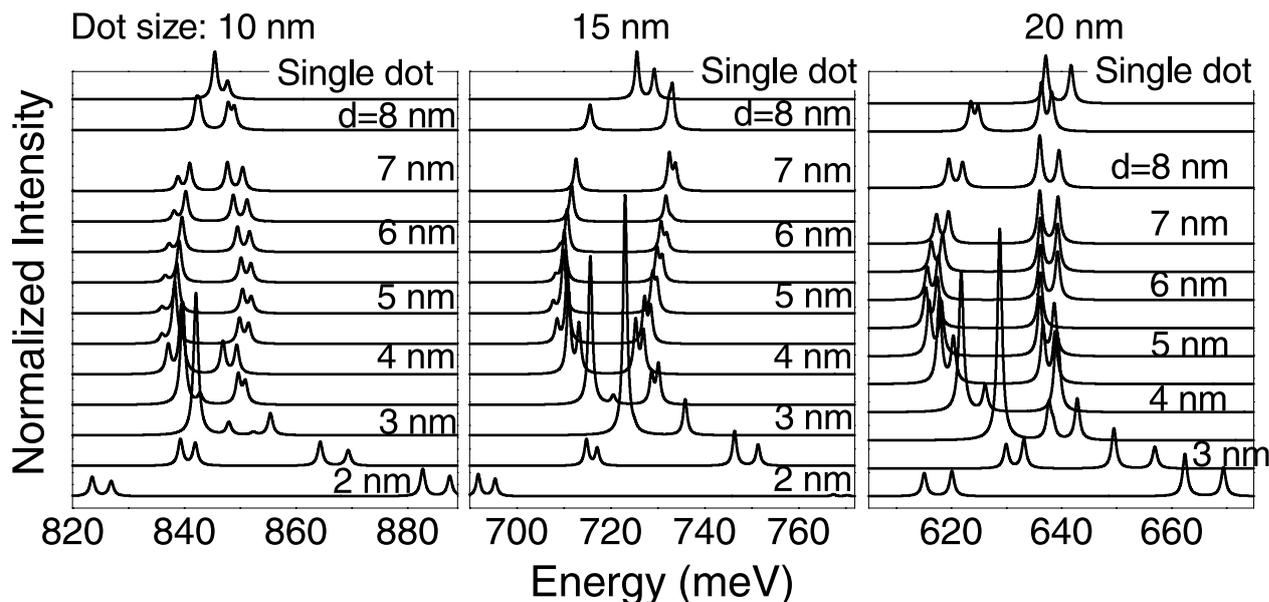


Рис. 3. Интенсивность первых четырех экситонных переходов, нормированная на интенсивность резонанса для одиночной квантовой точки, как функция размера КТ  $l$  и расстояния между точками  $d$ .

ния в гетероструктурах Ge/Si с двойными слоями квантовых точек Ge.

Основные результаты, полученные в ходе выполнения работы, состоят в следующем:

- Развита технология формирования наностроек Ge с большим (до 1) отношением высоты к диаметру на поверхности Si (001), а также многослойных гетероструктур Ge/Si с высокой степенью корреляции в вертикальном расположении квантовых точек Ge.
- В гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками, сформированными на частично окисленной поверхности кремния, обнаружено расщепление линии межзонного оптического перехода на два пика при наложении электрического поля. Результаты объясняются на основе представлений о квантовом эффекте Штарка в условиях образования встроен-

ных электрических диполей электрон-дырка двух типов, различающихся направлением дипольного момента и возникающих за счет локализации одного электрона в области вершины нанокластера Ge, а другого электрона — под основанием нанокластера.

- Установлено, что существуют условия (размеры квантовых точек, расстояние между точками, число точек в вертикальных колонках), при которых происходит многократное увеличение силы осциллятора экситонных переходов по сравнению со случаем одиночных квантовых точек.
- Продемонстрирована возможность управления не только величиной штарковского сдвига (который может достигать величины 80 мэВ в электрическом поле 100 кВ/см), но и его знаком.

### Литература

1. Larsson M., Holtz P.O., Elfving A., Hansson G.V., and Ni W.-X. Reversed quantum-confined Stark effect and an asymmetric band alignment observed for type-II Si/Ge quantum dots. — Phys. Rev. B 71, 113301 (2005).
2. Yakimov A.I., Nikiforov A.I., Dvurechenskii A.V., Ulyanov V.V., Volodin V.A., Groetzschel R. Effect of the growth rate on the morphology and structural properties of hut-shaped Ge islands in Si(001). — Nanotechnology 17, 4743 (2006).
3. Yu-Hsuan Kuo, Yong Kyu Lee, Yangsi Ge, Shen Ren et al. Strong quantum-confined Stark effect in germanium quantum-well structures on silicon. — Nature 437, 1334 (2005).

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АКУСТООПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫМИ АМПЛИТУДАМИ И ФАЗАМИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ<sup>1</sup>

Молчанов В.Я.<sup>2</sup>

## Intellectual acousto-optical systems for adaptive controlling of femtosecond pulses spectral amplitudes and phases for high power femtosecond lasers

Акустооптические дисперсионные линии задержки являются эффективным средством для повышения пиковой мощности фемтосекундных импульсов. Представлены результаты разработки и исследования дисперсионной линии задержки нового типа для адаптивного управления спектральными амплитудами и фазами фемтосекундных лазерных импульсов.

**Ключевые слова:** акустооптика, фемтосекундные импульсы, спектральные амплитуды и фазы, эффективность дифракции, парателлури́т.

Acoustooptical dispersive optical delay lines are the new type of optical devices for femtosecond laser systems. We consider dispersive spatial delay lines as an effective instrument intended to burst peak power of laser femtosecond pulses. The results of design and investigation of a new dispersive delay line for femtosecond pulse spectral amplitude and phase controlling are presented.

**Keywords:** acoustooptic, femtosecond pulses, spectral amplitude and phase, diffraction efficiency, paratellurite

### Введение

Создание сверхмощных фемтосекундных лазерных систем явилось одним из прорывных направлений физической науки рубежа XX – XXI веков.

Сегодня пиковая мощность лазерного импульса, достигнутая в нескольких лабораториях мира, составляет 1 петаватт; в некоторых лабораториях получена устойчивая генерация фемтосекундного излучения, содержащего всего 1–2 периода. Такие лазерные источники позволят в ближайшем будущем проводить фундаментальные исследования в совершенно новых областях науки. Новейшим направлением является создание лазерных ускорителей заряженных частиц, основанных на воздействии петаваттных оптических импульсов на газовые и твердотельные мишени. Это открывает новые возможности в малодозной фазоконтрастной рентгеновской томографии, в адронной терапии рака, в протонографии и т.д.

В настоящее время мощные фемтосекундные лазеры являются почти идеальным инструментом для исследования свойств вещества при сверхэкстремальных температурах и давлениях. Лазеры позволяют не только создавать в лабораторных условиях необычные состояния вещества, но и проводить диагностику динамики изменения его характеристик с временным разрешением в десятки фемтосекунд.

В большинстве применений качество скомпрессированного импульса (длительность импульса, отсутствие предимпульсов, высокий контраст) является определяющим.

Качество импульса определяется нескомпенсированной дисперсией высших порядков и деформацией спектра в усилителе. Если в лазерной системе применить адаптивное устройство, компенсирующее наведенную дисперсию высших порядков и искажения спектра в оптическом тракте системы, путем воздействия на спектральные амплитуды и фазы фемтосекунд-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-12400-офи\_м).

<sup>2</sup>  Молчанов Владимир Яковлевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, зам. директора по научной работе НТЦ акустооптики Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», e-mail: v.ya.molchanov@gmail.com.

ного импульса, то можно уменьшить длительность скомпрессированного импульса и подавить предимпульсы. Данное решение позволит увеличить мощность фемтосекундного излучения не за счет увеличения энергетике лазерной системы, а за счет укорочения импульса благодаря правильно организованной спектральной фазе. С другой стороны, независимое управление амплитудой спектра позволит сформировать импульсы нужной формы, специально ориентированной на оптимальные условия усиления последующих каскадов.

Известны три принципиальные возможности управления спектральной фазой: чирпирующие зеркала, линейка фазомодуляционных транспарантов на основе жидких кристаллов и устройства волновой электроники — адаптивные линии задержки на основе акустооптического эффекта. Опыт работы сверхмощных лазерных систем показал, что последний вариант обладает рядом преимуществ, таких как: линейная геометрия, не требующая жесткого согласования с геометрией стретчера; непрерывность управления фазой; возможность независимого управления не только фазой, но и амплитудой спектра; высокое адаптационное быстродействие. Наконец, акустооптические линии задержки обладают оптической памятью, что является необходимым условием создания интеллектуальных систем.

Благодаря этим преимуществам акустооптическая линия задержки выиграла в конкуренции с другими устройствами. В ведущих научных центрах мира таких как: Ливермор, Лос-Аламос (США), N.T.T. (Япония), институты Макса Планка и Макса Борна (Германия), — на всех сверхмощных лазерах сейчас используют акустооптическую систему Dazzler, выпускаемую монополистом в данной области — французской фирмой Fastlite.

Несмотря на то, что акустооптические линии задержки представляются наиболее эффективным средством для повышения пиковой мощности фемтосекундных импульсов, они являются практически не изученным новейшим поколением адаптивных устройств волновой электроники. По отзывам потребителей, устройство Dazzler обладает рядом характерных недостатков: низкой эффективностью дифракции, малой оптической задержкой, низкой адаптационной способностью. В России исследования в этом направлении волновой электроники не проводятся.

В России сверхмощные лазерные системы созданы во ВНИИЭФ, ВНИИТФ, ИПФ РАН и ряде других организаций.

Настоящая работа является одной из первых в мире публикаций в сфере фундаментального исследования создания интеллектуальных акустооптических систем адаптивного управления спектральными амплитудами и фазами фемтосекундных импульсов. Данное направление исследований направлено на ликвидацию отставания России в области фотоники и оптоэлектроники от ведущих стран (Франции, США, Англии, Японии) и, в перспективе, на создание отечественной отрасли производства управляющих систем фотоники для фемтосекундных лазеров, в том числе, систем двойного назначения, стратегическая значимость которых делает невозможным их закупку за рубежом.

#### **Параллельная конверсия фемтосекундного лазерного спектра в линии задержки**

Отметим принципиальную особенность акустооптической адаптивной линии задержки. Акустооптическое взаимодействие всегда осуществляет последовательный анализ спектров. Исключение составляют акустооптические устройства анализа радиосигналов, где осуществляется параллельный анализ спектров радиосигналов. Адаптивная линия задержки концептуально осуществляет параллельную обработку оптических спектральных компонент и являет собой новый тип акустооптического прибора. Специфика акустооптического взаимодействия здесь заключается в том, что только в данном типе приборов происходит взаимодействие светового излучения сложного спектрального состава со звуковой волной сложного спектрального состава. Так, в обычных акустооптических устройствах — модуляторах — монохроматическое излучение взаимодействует с ультразвуковым излучением сложного спектрального состава. В акустооптических дефлекторах монохроматическое излучение взаимодействует с монохроматическим ультразвуком. В акустооптических фильтрах осуществляется последовательный спектральный анализ: взаимодействие светового излучения сложного спектрального состава с монохроматическим ультразвуковым. Фактически дисперсионные линии задержки можно рассматривать как фильтры с адаптивной спектральной синтезированной апертурой, поскольку аппаратная

функция такого акустооптического фильтра синтезирована спектральным составом ультразвукового поля, введенного в кристалл программируемым образом. Изложенное выше определяет физические особенности адаптивной дисперсионной линии задержки.

Общепризнано, что степень влияния российских ученых на решение фундаментальных проблем в области физики взаимодействия света и звука была всегда крайне велика. Хронология развития фемтосекундной акустооптики подтверждает это.

Еще в 1980 г. в лаборатории Л. Магдича впервые был выполнен ряд работ по адаптивному синтезу спектральной функции пропускания акустооптических фильтров, являющихся сейчас основой для понимания физики процесса параллельного амплитудного управления фемтосекундным спектром в акустооптических линиях задержки [1, 2]. Было установлено, что спектральная функция пропускания при коллинеарной дифракции света на ЛЧМ акустическом сигнале, вообще говоря, является комплексной функцией, описывается интегралами Френеля и совпадает с известным распределением интенсивности света при классической дифракции в зоне Френеля.

Идея использовать коллинеарное акустооптическое взаимодействие для сжатия ультракоротких лазерных импульсов в современном формате впервые в мире была выдвинута еще в дофемтосекундную эпоху в 1986 г. В. Пустовойтом и В. Пожаром [3, 4]. В соответствии с их концепцией амплитуда и фаза каждой спектральной компоненты вследствие акустооптического взаимодействия определяется пространственным расположением спектральных амплитуд и частот звуковой решетки в кристалле. Анизотропное акустооптическое взаимодействие конвертирует «быструю» входящую спектральную компоненту в «медленную» дифрагированную в том месте кристалла, где находится соответствующая спектральная компонента звуковой решетки.

Эта концепция определила будущий ход развития событий в фемтосекундной акустооптике. Десять лет спустя, в 1997 г. Р. Tournois предлагает идентичное техническое решение не только для сжатия, но и для формирования фемтосекундных импульсов наперед заданной формы [5, 6], и выводит на мировой рынок высоких технологий в 2006 г. серийный прибор Dazzler.

### Исследование фотон-фононного взаимодействия в адаптивных линиях задержки на кристалле $\text{TeO}_2$

Для линии задержки оптимальной представляется квазиколлинеарная акустооптическая геометрия, когда фазовая скорость света коллинеарна групповой скорости акустической волны. Для ввода светового излучения в акустический столб используется отражение акустической волны от входной грани кристалла. Этот метод формирования звукового столба представляется наиболее перспективным. Входная оптическая грань линии задержки ортогональна падающему свету. Это условие определяет ее ориентацию относительно кристаллографических осей.

Рассмотрим дифракцию в монокристалле  $\text{TeO}_2$  на медленной сдвиговой волне, распространяющейся в плоскости  $(1\bar{1}0)$  и поляризованной ортогонально этой плоскости. В этой плоскости взаимодействие света со сдвиговой звуковой волной происходит весьма эффективно. При квазиколлинеарном взаимодействии угол падения света в кристалле, найденный из векторных диаграмм, должен определять угол ориентации групповой скорости звуковой волны, распространяющейся в кристалле вдоль светового луча.

Акустические скорости находятся из поверхности медленностей, общий вид которой задается конкретной группой симметрии кристалла и коэффициентами упругости материала и определяется решением уравнения Кристоффеля. Таким образом, в кристалле любой группы симметрии можно установить однозначное соответствие между углом падения света и направлением фазовой скорости звуковой волны, при котором реализуется квазиколлинеарное взаимодействие. Энергетика этого взаимодействия определится величиной эффективной фотоупругой константы.

На первом этапе рассмотрения однозначно определяется ориентация акустического волнового вектора в звуковом столбе, а также ориентация входной оптической грани кристалла относительно кристаллографических осей, на втором этапе – направление распространения акустической волны, падающей на входную грань акустооптической ячейки. Акустическая волна генерируется пьезопреобразователем и после отражения от входной грани кристалла преобразуется в звуковую волну, обеспечивающую квазиколлинеарное взаимодействие. Здесь используются законы отражения акустических волн от границы раздела. Направление фазовой скоро-

сти исходной акустической волны однозначно определяет ориентацию той грани кристалла, на которой располагается пьезопреобразователь.

Для решения задачи необходимо построить векторную диаграмму акустооптического взаимодействия и сечение поверхности медленности кристалла, чтобы взаимно сориентировать их относительно кристаллографических осей.

Волновой вектор падающего света  $k_i$  коллинеарен вектору групповой скорости  $V_{g1}$  акустической волны, отраженной от входной грани кристалла. На рис. 1а) представлена схема, определяющая направления световой и звуковой волн, а также ориентацию входной оптической грани кристалла относительно кристаллографических осей. На схеме приняты следующие обозначения:  $k_i$ ,  $k_d$  и  $K$  — соответственно векторы падающего света, дифрагированного света и звука. Полярный угол  $\varphi$  на векторной диаграмме определяет частоту акустооптического взаимодействия. На рисунке также показана входная оптическая грань кристалла 1, на которую под прямым углом падает лазерное излучение.

Из рисунка видно, что ориентация входной оптической грани кристалла определяется углом  $\pi/2 - (\alpha_1 + \psi_1)$ , отсчитываемым от оси [110]. Угол  $\alpha_1$  образован фазовой скоростью звука  $V_{p1}$  и осью [110], а угол  $\psi_1$  измеряется между фазовой  $V_{p1}$  и групповой  $V_{g1}$  скоростью. Акустическая волна с фазовой скоростью  $V_{p2}$  и групповой скоростью  $V_{g2}$ , отражается от входной оптической грани и преобразуется в звуковую волну с фазовой скоростью  $V_{p1}$  и групповой скоростью  $V_{g1}$  (рис. 1б). Из рисунка следует, что угол  $\alpha_2$  образован фазовой скоростью звука  $V_{p2}$  и осью [110], а угол  $\psi_2$  — фазовой  $V_{p2}$  и групповой  $V_{g2}$  скоростями акустической волны, излучаемой пьезопреобразователем.

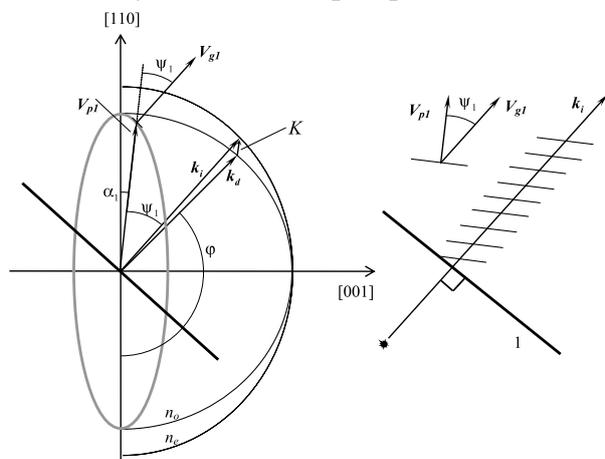


Рис. 1. а) Векторная диаграмма и поверхность акустической медленности кристалла парателлуриата.

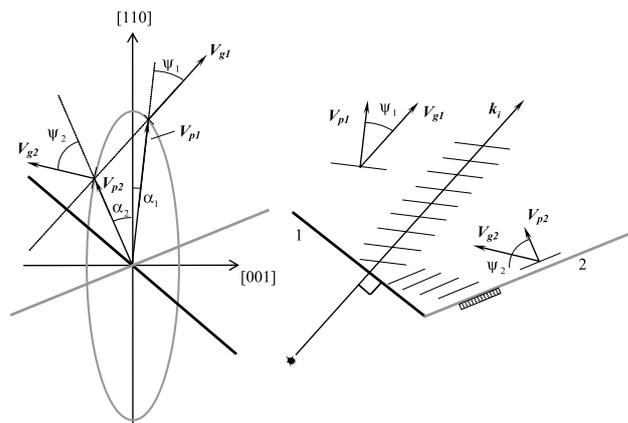


Рис. 1. б) Определение ориентации грани преобразователя.

Рис. 1б) показывает, что ориентация грани кристалла 2, на которой располагается пьезопреобразователь, относительно кристаллографических осей определяется углом  $90^\circ - \alpha_1$ . Угол  $\alpha_1$  образован осью [110] и плоскостью пьезопреобразователя ячейки. Величина угла  $\alpha_2$  может быть определена из условия равенства проекций обратных скоростей.

Теоретическое рассмотрение показывает, что исходным параметром, определяющим оптическую и акустическую конфигурацию акустооптического фильтра относительно кристаллографических осей, является угол  $\alpha_1$ , задающий ориентацию волнового вектора звука. Выбор угла  $\alpha_1$  осуществляется с учетом оптических, энергетических, конструктивных и системных соображений. К адаптивным устройствам предъявляются повышенные требования по величине спектральной полосы пропускания, поскольку она определяет недетерминированность пространственной области перебора поляризации в кристалле. Управляющая мощность прибора должна быть минимальной.

Конструктивные особенности геометрий взаимодействия определяются различными вариантами ориентации граней кристалла относительно кристаллографических осей. Можно показать, что в зависимости от величины угла  $\alpha_1$  существуют следующие три конфигурации граней. При увеличении угла  $\alpha_1$  от  $0^\circ$  до  $1,78^\circ$  угол между входной оптической гранью 1 и акустической гранью 1 является острым. Если  $1,78^\circ < \alpha_1 < 13,31^\circ$  этот угол тупой, при  $\alpha_1 > 13,31^\circ$  угол снова становится острым. Двум значениям угла  $\alpha_1 = 1,78^\circ$  и  $\alpha_1 = 13,31^\circ$  соответствуют такие конфигурации дисперсионных линий задержки, при которых грани ортогональны. При этом ориентации кристаллографических осей являются различными для каждого из этих значений  $\alpha_1$  [7].

### Адаптивная дисперсионная линия задержки: экспериментальные исследования

По результатам теоретических исследований была рассчитана, изготовлена и исследована дисперсионная линия задержки для коррекции амплитуд и фаз фемтосекундных лазерных импульсов.

Основные параметры линии задержки:

- центральная длина волны лазерного излучения — 1250 нм;
- ширина спектра фемтосекундного излучения — 120 нм;
- центральная рабочая частота — 52 МГц;
- оптическая апертура — 4x4 мм;
- спектральное разрешение в монохроматическом режиме по уровню 0,5 на длине волны 1310 нм—0,5 нм;
- максимальная оптическая задержка на длине волны 1250 нм—15 пикосек;
- управляющая мощность в монохроматическом режиме на длине волны 1310 нм, при 90 % эффективности — 30 мВт;
- эффективность дифракции при ширине спектра 120 нм — 70 %.

Важнейшие характеристики созданного экспериментального прибора: время оптической задержки, эффективность, управляющая мощность, спектральное разрешение превосходят характеристики прибора Dazzler.

Исследования акустооптической дисперсионной линии задержки были осуществлены в ИПФ РАН на субпетаваттной фемтосекундной ОРСРА лазерной системе [8]. Внешний вид экспериментальной линии задержки, установленной на лазерном комплексе ИПФ РАН, показан на рис. 2.

Фемтосекундная система работала с частотой повторения 1 Гц. Задающим генератором был Cr:forsterite-лазер, генерирующий 40 фс. импульсы с энергией 2 нДж на центральной длине волны 1250 нм. Дисперсионная линия задержки была установлена между фемтосекундным генератором и стретчером (рис. 2). Недифрагированный пучок направлялся на быстрый фотодиод. Дифрагированный пучок направлялся на стретчер. Стретчер имел полосу пропускания в  $1000 \text{ см}^{-1}$  ( $1250 \pm 60 \text{ нм}$ ) и растягивал импульсы до длительности в 600 пс. Излучение второй гармоники одномодового одночастотного Nd:YLF-лазера с длиной волны 527 нм, энергией импульса до 1 Дж при длительности 1,2 нс осуществляло накачку нелинейного элемента из кристалла KD\*P оптического параметрического усилителя (ОРА). На первом проходе ОРА осуществлял широко-



Рис. 2. Экспериментальная линия задержки на субпетаваттной установке ИПФ РАН.

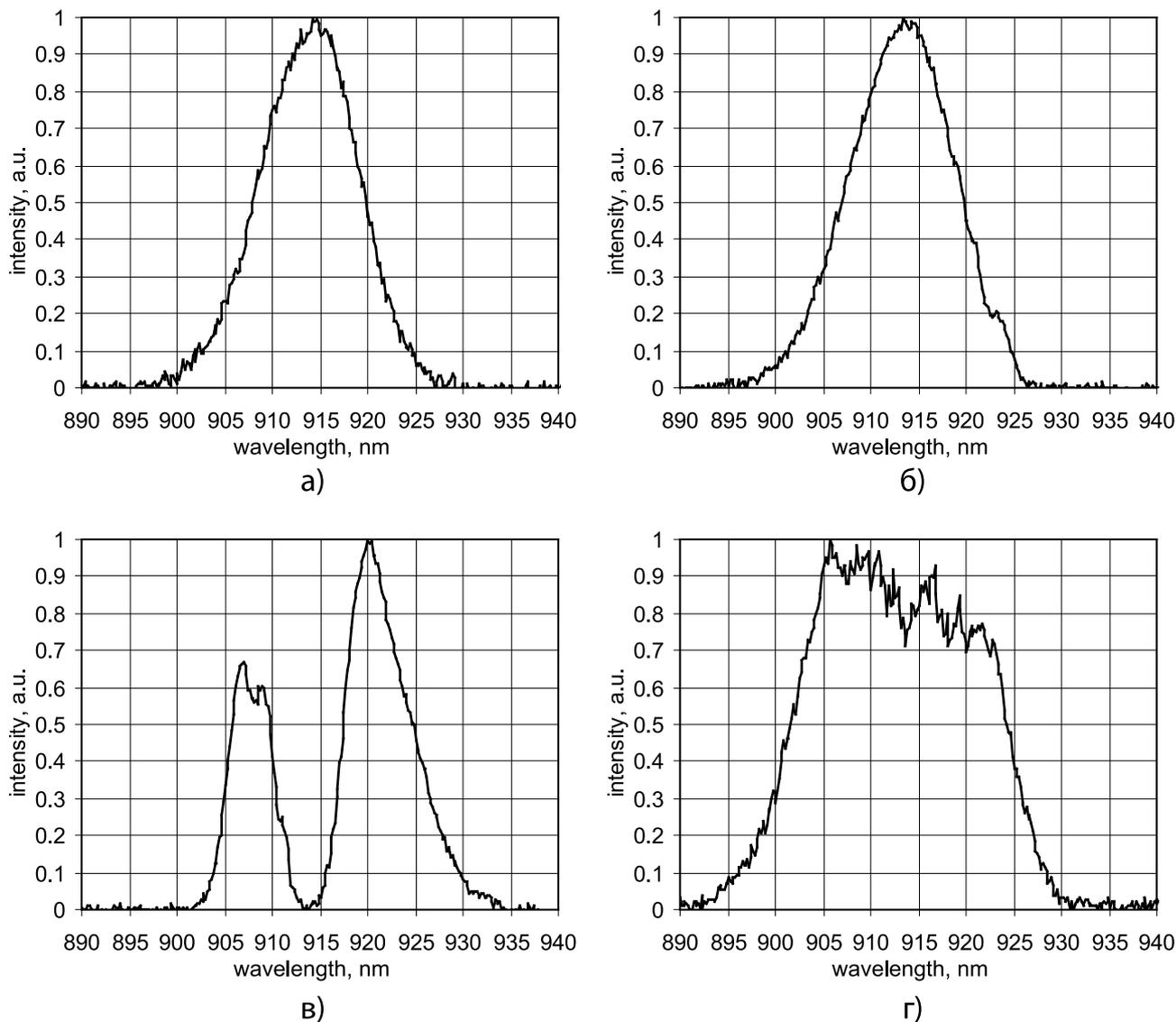
полосное усиление и преобразование чирпированных импульсов на длине волны 1250 нм в импульсы сигнального излучения на длине волны 910 нм, а на втором — усиление излучения на длине волны 910 нм. После ОРА часть сигнального излучения направлялась на спектрограф.

Двухступенчатая схема синхронизации обеспечивала одновременное прохождение импульсов накачки и усиливаемого излучения сквозь нелинейный кристалл в ОРА. Тем не менее, лазерная система имела оптический джиттер  $\pm 12 \mu\text{s}$  по отношению к импульсу триггера, запускающего линию задержки.

Для измерения эффективности дисперсионная линия задержки была настроена на пропускание полного спектра фемтосекундных импульсов (амплитуда звуковой волны постоянна, распределение частоты звука — ЛЧМ). Длительность провала составила 60  $\mu\text{s}$ , этого значения было достаточно для того, чтобы не терять инжектируемые в ОРА импульсы. Глубина провала соответствовала эффективности дисперсионной линии задержки в 70 %.

Измерения показали, что разработанное дисперсионное устройство обладает существенно более высокой эффективностью дифракции (или меньшими потерями), чем прибор Dazzler, а именно 70 %, вместо 30 %. Следующим важным преимуществом разработанного устройства является способность «удерживать» в зоне акустооптического взаимодействия фемтосекундные импульсы, несмотря на их значительный джиттер [9, 10].

Заключительная часть исследований линии задержки была направлена на изучение возможности управления этим прибором амплитудами спектральных компонент фемтосекундных



**Рис. 3.** Адаптивное формирование оптического спектра фемтосекундного сигнального импульса, а) исходный спектр, б) спектр, пропущенный линией задержки без изменения,  $d=0$ , в) формирование линией задержки провала в спектре,  $d=1$ ,  $w=4$  нм, г) эффект  $\pi$ -шейпинга спектра,  $d=0,6$ ,  $w=28$  нм. Величины  $w$  пересчитаны на сигнальную длину волны 910 нм.

импульсов с целью формирования такой спектральной АЧХ, которая была бы оптимальна для последующего усиления. В ОРА один из дифрагированных в линии задержки импульсов преобразовывался в сигнальное излучение с длиной волны, определяемой соотношением:  $1/\lambda_s = 1/\lambda_p - 1/\lambda_i$ . Измерение спектрограмм проводились на сигнальной длине волны, в то время как акустооптический дисперсионный прибор управлял излучением фемтосекундного генератора [9, 10].

Ширина спектра исходного фемтосекундного импульса составляла около 12 нм по уровню 0,5. Соответствующая спектрограмма представлена на рис. 3а). На рис. 3б) показан спектр сигнала при включенной акустооптической линии задержки, когда та была настроена на пропускание

полного спектра фемтосекундных импульсов. Из рис. 3б) следует, что спектр, пропущенный прибором, эквивалентен исходному спектру.

Исследование возможности изменения амплитуд спектральных компонент, а именно, формирование провала в спектре ставилось следующей задачей. При этом распределение амплитуды звуковой волны формировалось в виде:  $1 - d \cdot \exp[-(\lambda - \lambda_0)^2 / w^2]$ . Это приводило к соответствующему изменению спектральной функции пропускания прибора для сигнального спектра (рис. 3в). Эффект может быть использован для оптимизации работы 2-го ОРА. В частности, подбор значений  $d$  и  $w$  позволяет сделать вершину спектра фемтосекундного импульса плоской и тем самым увеличить ширину его оптического спектра сигнала в два раза (рис. 3г).

### Заключение

Исследования первой в мире альтернативной дисперсионной акустооптической линии задержки были выполнены в сравнении с характеристиками прибора Dazzler. Созданный прибор обладает более высокой эффективностью, возможностью контроля инжектируемых фемтосекундных импульсов в широких пределах без потерь при джиттере и более эргономичен в установке и работе. Преимуществом созданного прибора является и то, что дифрагированный пучок параллелен падающему. Экспериментальная линия задержки продемонстрировала возможность адаптивного управления спектром фемтосекундного импульса. Это открывает новые пути для оптимизации всей ОРСРА лазерной системы за счет увеличения эффективности параметрического усиления, расширения спектра сигнала и улучшения параметров скомпрессированного импульса.

После модернизации акустооптическую систему планируется использовать для подавления нежелательной обратной параметрической перекачки энергии в волну накачки, а также для снижения предимпульсов на выходе лазерного комплекса.

Дальнейшее направление исследований видится в повышении адаптационной гибкости акустооптических линий задержки, имеющей перспективной целью создание приборов интеллектуального управления фемтосекундным излучением мощных лазерных систем. Другие направления исследований заключаются в создании линий задержки с повышенным быстродействием на основе ниобата лития, в разработке пьезопреобразователей и согласующих электрических цепей линий задержки с линейной фазовой характеристикой излучения и в создании акустооптических монохроматоров с программируемой спектральной аппаратной функцией.

### Благодарности

Данная работа выполнена межотраслевым коллективом исследователей в составе: С.И. Чижиков, К.Б. Юшков, О.М. Макаров, Н.П. Солодовников (НТЦ акустооптики НИТУ «МИСиС»); Е.А. Хазанов, В.Н. Гинзбург, И.В. Яковлев, В.В. Ложкарев (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород); Ю.И. Китаев (ВорГУ, г. Воронеж); А.И. Колесников (ТвГУ, г. Тверь).

### Литература

1. *Magdich L.N.*, «Transmission function of an acoustooptical filter utilizing frequency scanning regime», *J. Optics and Spectroscopy* 49, 387–390 (1980).
2. *Magdich L.N., Molchanov V.Ya. and Ponomareva I.P.*, «Transmission function of non-collinear acoustooptical filter», *J. Optics and Spectroscopy* 56, 736–739, (1984).
3. *Pozhar V.E., Pustovoit V.I.*, «On compression of ultrashort light pulses», *J.Sov.Quant.Electronics*, v.14, No. 4, 811–813, (1987).
4. *Pustovoit V.I., Pozhar V.E.*, «Collinear diffraction of light by sound waves in crystals: devices, applications, new ideas», *Photonics and optoelectronics*, v.2, No. 2, 53–69 (1994).
5. *Tournois P.*, «Acousto-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delay time dispersion in laser systems», *J. Optics Communications* 140, 245–249 (1997).
6. *Verluisse F., Laude V., Huignard J.-P., Tournois P.*, «Arbitrary dispersion control of ultrashort optical pulses with acoustic waves», *J. Opt. Soc. Am. B*, v. 17, No. 1, 138–145 (2000).
7. *Molchanov V.Ya., Voloshinov V.B., Makarov O.Yu.*, «Quasi-collinear tunable acousto-optical paratellurite crystal filters for wavelength division multiplexing and optical channel selection», *Quantum Electronics*. 39 (4) 353–360 (2009).
8. *Poteomkin A.K., Katin E.V., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Matveev A.Z., Palashov O.V., Khazanov E.A., and Shaykin A.A.*, «Compact neodymium phosphate glass laser emitting 100-J, 100-GW pulses for pumping a parametric amplifier of chirped pulses», *Quantum Electron.* 35, 302 (2005).
9. *Molchanov V.Ya., Chizhikov S.I., Makarov O.Yu., Solodovnikov N.P., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Lozhkarev V.V., and Yakovlev I.V.*, «Adaptive acousto-optic technique for femtosecond laser pulses shaping», *Appl.Optics*, 48, No.7, 118–124 (2009).
10. *Molchanov V.Ya., Chizhikov S.I., Makarov O.Yu., Solodovnikov N.P., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Lozhkarev V.V., Yakovlev I.V., Epatko I.V. and Serov R.V.*, «Adaptive optical delay lines for femtosecond laser pulses shaping», *Acta Physica Polonica A*, v.116, No.3, 355–358 (2009).

## СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРИЕМА И ГЕНЕРАЦИИ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ<sup>1</sup>

Кошелец В.П., Киселев О.С., Торгашин М.Ю., Филиппенко Л.В.<sup>2</sup>

### Superconducting integrated nanostructures for terahertz detection and generation

Проект основан на принципиально новом подходе — интеграции сверхпроводникового генератора субмм волн с квантовым смесителем на квазичастичной нелинейности туннельных СИС-переходов и планарной сверхпроводниковой антенной. В результате создан интегральный спектрометр ТГц диапазона с уникальными параметрами для мониторинга атмосферы Земли и лабораторный макет спектрометра ТГц диапазона для анализа газовых смесей.

**Ключевые слова:** сверхпроводниковая электроника, квантовые приемники и генераторы терагерцового диапазона, распределенные джозефсоновские переходы, интегральные сверхпроводниковые структуры.

The project is based on novel approach — integration of the superconducting submm wave local oscillator with quantum mixer utilizing quasi-particle nonlinearity of the tunnel SIS junction inserted in the planar superconducting antenna. As a result of these studies the superconducting integrated THz spectrometer for Earth atmosphere monitoring and a prototype of THz spectrometer for gas mixture analysis have been developed.

**Keywords:** superconducting electronics, terahertz range quantum receivers and oscillators, long Josephson junctions, integrated superconducting circuits.

Детектирование слабых сигналов в терагерцовом частотном диапазоне (это слово уже прочно вошло в научный обиход для обо-

значения частотного диапазона от 100 ГГц до 10 ТГц) — одна из областей, в которых первенство сверхпроводниковой электрони-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-12172 офи\_м).

<sup>2</sup>  Валерий Павлович Кошелец, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: valery@hitech.cplire.ru.



Олег Сергеевич Киселев, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: kiselev@hitech.cplire.ru.



Михаил Юрьевич Торгашин, научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: mikhail@hitech.cplire.ru.



Людмила Викторовна Филиппенко, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: lyudmila@hitech.cplire.ru.

ки неоспоримо. На частотах до 1,4 ТГц наилучшей чувствительностью обладают супергетеродинные приемники со смесительными элементами на основе переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС), а в области более высоких частот — болометры на основе тонких сверхпроводящих пленок. Именно поэтому сверхпроводниковые приемники используются на большинстве радиотелескопов мира, а также в современных радиоастрономических спутниковых инструментах.

При когерентном приеме сигналов одним из важнейших элементов является гетеродин; его диапазон перестройки, спектральные характеристики и диапазон согласования со смесителем влияют на характеристики устройства в целом. Традиционными лабораторными источниками излучения терагерцового диапазона являются массивные генераторы на основе лампы обратной волны, либо сравнительно низкочастотные полупроводниковые аналоги (например, диод Ганна). Лишь в последние годы, за счет создания мощных полупроводниковых усилителей высокой частоты (порядка 100 ГГц) и использования многокаскадных умножителей, удалось «закрыть» терагерцовый диапазон полупроводниковыми источниками. Такие устройства достаточно компактны для применения в бортовых авиационных или космических системах. Тем не менее, диапазон перестройки полупроводниковых генераторов составляет не более 10–15 % от центральной частоты и они не могут быть интегрированы на одной микросхеме со смесителем, как сверхпроводниковый генератор. Поэтому сверхпроводниковые генераторы гетеродина (СГГ) на основе распределенных джозефсоновских переходов по сочетанию массогабаритных и частотных характеристик не имеют аналогов до сих пор.

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в рамках предыдущих проектов (в том числе двух проектов РФФИ [1, 2]) была предложена и апробирована концепция сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) [3, 4], которая основана на принципиально новом подходе — интеграции сверхпроводникового генератора гетеродина с квантовым смесителем на квазичастичной нелинейности туннельных СИС-переходов и сверхпроводни-

ковой антенной в одной микросхеме (рис. 1). Микросхема изготавливается на кремниевой подложке толщиной 0,5 мм методами современной микроэлектроники и содержит сверхпроводниковый смеситель, иммерсионную линзовую дипольную или щелевую антенну, сверхпроводниковый гетеродин и дополнительный смеситель для системы фазовой автоподстройки частоты гетеродина. Размер схемы с контактными площадками составляет 4x4 мм.

Целями настоящего проекта были расширение рабочего диапазона микросхем за счет использования новых материалов, отработка новых методов изготовления (в том числе электронной литографии) для получения структур субмикронных размеров, что совместно с повышением плотности тока туннельных переходов позволяет расширить частотный диапазон СИС-смесителя. Параллельно велись работы по оптимизации конструкции сверхпроводникового интегрального приемника в составе аэростатного спектрометра «ТЕЛИС», предназначенного для исследования верхних слоев атмосферы, а также работы по созданию лабораторного макета спектрометра для анализа газовых смесей и исследование его возможностей для неинвазивной медицинской диагностики.

### Технология изготовления

Важнейшим элементом сверхпроводниковой микроэлектроники является джозефсоновский переход (сравнимым по значимости полупроводниковым аналогом является  $p-n$  переход). Характеристики джозефсоновских переходов, наличие воспроизводимой технологии изготовления с малым разбросом параметров на подложке, а также устойчивость переходов к воздействию окружающей среды определяют качество, быстродействие и область применимости сверхпроводниковых устройств в целом. В отличие от устройств, работающих при комнатной температуре, сверхпроводниковые тонкопленочные устройства должны выдерживать более тяжелые окружающие условия, возникающие в связи с циклическими переходами от комнатной температуры к рабочей гелиевой температуре. Проблемы, связанные со свойствами материалов, включают в себя адгезию пленок на подложках и на предваритель-

но осажденных пленках, механическую прочность, внутренние напряжения, химическую стабильность, рекристаллизацию, приводящую к деформациям, способность образовывать интерметаллические соединения, взаимную растворимость материалов, образующих структуру и т.д. Для получения переходов с заданными параметрами необходим выбор материалов с определенными электрофизическими характеристиками.

В настоящее время основными элементами сверхпроводниковой электроники являются туннельные структуры сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник на основе ниобия и его соединений. Пленки из этих материалов обладают высокой механической прочностью, химической стабильностью, устойчивостью структуры к термоциклированию и хорошей адгезией, а также достаточно высокой критической температурой для работы при температуре жидкого гелия ( $T = 4,2$  К). Критическая температура пленки ниобия и его нитрида, составляет 9,2 К и 16 К соответственно. Туннельный барьер формируется путем окисления или нитридизации тонкой пленки алюминия (5–7 нм), которая сплошным слоем покрывает поверхность ниобия и позволяет получать сверхтонкие туннельные слои (толщиной порядка 1 нм). Возможность создания туннельных переходов с высокой плотностью тока и чрезвычайно малой утечкой, не меняющих свои характеристики в течении многих лет, является важнейшим фактором, обеспечившим широкое распространение и практическое применение переходов на основе ниобия.

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН ранее была отработана технология изготовления многослойных схем на основе структур Nb-Al-O<sub>x</sub>-Nb методом селективного травления и анодирования ниобия SNEAP (от англ. Selective Niobium Etching and Anodization Process) [5]. Был разработан целый ряд новых технологических процессов и методик изготовления сверхпроводниковых туннельных переходов с рекордными параметрами. Переходы с высокой плотностью тока  $J_c$  позволяют повысить рабочую частоту СИС-приемников и расширить их полосу. Однако, существует предел повышения прозрачности барьера для СИС-переходов на основе окиси алюминия. Это предел составляет величину порядка 10–15 кА/см<sup>2</sup>, при дальнейшем увеличении плотности тока наступает резкая деградация качества переходов. Для

того, чтобы преодолеть это ограничение, была разработана технология изготовления туннельных СИС-переходов Nb/Al-AlN/Nb с экстремально высокой прозрачностью туннельного барьера путем нитридизации поверхности Al в плазменном RF-разряде ( $J_c$  до 100 кА/см<sup>2</sup>) с приемлемыми значениями параметра качества  $R_j/R_n$  [6].

Дальнейшее улучшение параметров туннельных структур было достигнуто в результате разработки технологии изготовления схем на основе трехслойных структур Nb-AlN-NbN, напряжение щели у которых составляет 3,7 мВ, а плотность критического тока может достигать 70 кА/см<sup>2</sup>. Отношение подщелевого сопротивления к нормальному,  $R_j/R_n$ , даже при больших плотностях тока превышает 20, что свидетельствует о высоком качестве туннельного барьера, полученного методом нитридизации тонкой пленки алюминия в высокочастотном плазменном разряде [7]. Разработана технология изготовления интегральных схем на основе туннельных переходов Nb-AlN-NbN с разводкой из ниобия, что позволяет использовать преимущества переходов Nb-AlN-NbN в схемах с топологией, рассчитанной и апробированной ранее для структур из ниобия.

Оптимизирована технология получения сверхпроводниковых интегральных микросхем на основе пленок ниобия и нитрида ниобия с использованием методов прецизионной литографии, плазмохимического травления и т.д. С помощью этой технологии изготовлены схемы для исследования ширины линии сверхпроводникового генератора гетеродина (СГГ), микросхемы интегрального спектрометра субмм волн, ряд других уникальных элементов и схем. Начаты работы по формированию туннельных структур субмикронных размеров методами электронно-лучевой литографии. Отработаны основные технологические режимы работы с программным обеспечением литографа, проведен подбор режимов засветки и проявления электронного резиста (Shipley SAL-601 — негативный, Shipley UV5 DUV — позитивный, ZEP520A), что позволило формировать элементы интегральных схем с характерными размерами до 100x100 мкм [8]. Возможность такого уменьшения площади СИС смесителей и существенное повышение плотности туннельного тока необходимы для повышения рабочей частоты приемных устройств, т.к. большая соб-

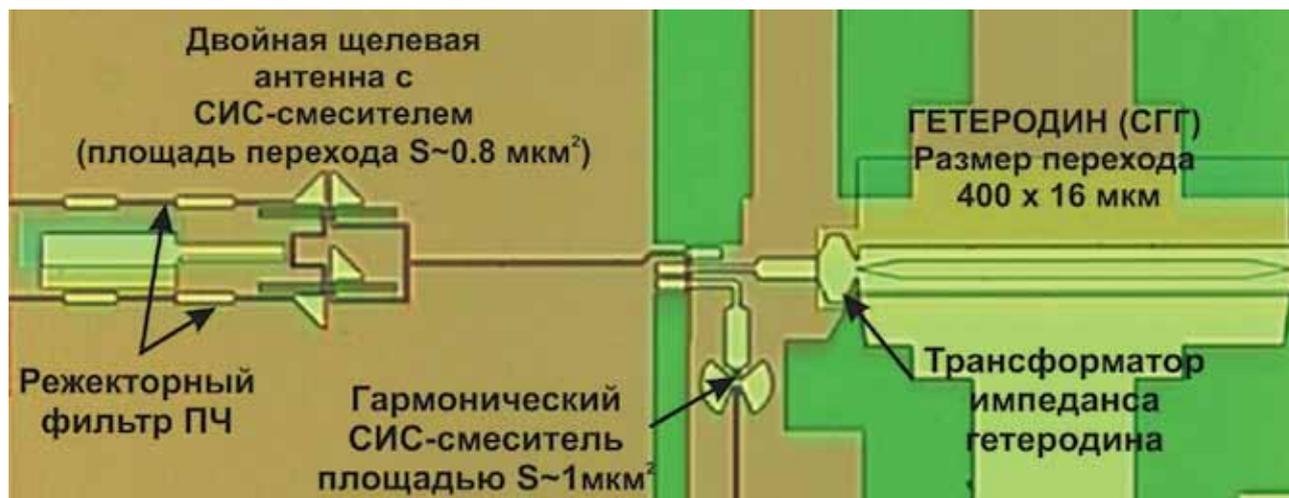


Рис. 1. Фотография центральной части микросхемы интегрального приемника (показана область  $1,2 \times 0,5 \text{ мм}^2$ ).

ственная емкость туннельных переходов шунтирует полезный сигнал.

Использование СВЧ линий передач из ниобия на частотах выше 700 ГГц приводит к резкому (неприемлемо высокому) росту потерь, т.к. энергия квантов электромагнитного излучения на этих частотах превышает величину энергетической щели в спектре квазичастичных возбуждений сверхпроводника. Это ограничивает, в первую очередь, предельную частоту гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода, поэтому для повышения рабочей частоты сверхпроводящих схем разрабатываются структуры на основе нитрида ниобия (NbN) и нитрида ниобий титана (NbTiN).

### Сверхпроводниковый генератор гетеродина

На рис. 1 представлена фотография центральной части микросхемы приемника с двойной щелевой антенной. Излучение сверхпроводникового гетеродина через согласующую схему (трансформатор импеданса) передается в микрополосковую линию с импедансом около 20 Ом, а затем при помощи специального делителя мощности (который также разделяет смесители и генератор по постоянному току смещения) распределяется между двумя СИС смесителями. В ходе проекта было исследовано несколько конструкций СВЧ развязки (и цепей согласования), оптимизирована конструкция и топология сверхпроводникового генератора гетеродина (СГГ) на основе распределенного джозефсоновского перехода, что позволило уменьшить ширину спектральной линии СГГ.

Спектральная характеристика СГГ имеет лоренцевскую форму, типичная полуширина которой составляет от сотен килогерц до десятков мегагерц (рис. 2а), в зависимости от конструкции СГГ и выбора рабочей точки. Применение генераторов с широкой автономной линией в качестве гетеродина в приемниках с высоким спектральным разрешением требует использования широкополосной системы автоподстройки частоты гетеродина. Для формирования сигнала промежуточной частоты системы ФАПЧ (400 МГц) в схему приемника добавлен гармонический СИС смеситель. Полоса системы ФАПЧ составляет порядка 10 МГц, что позволяет при ширине автономной линии СГГ до 5 МГц обеспечить спектральное качество (отношение мощности в спектральном пике СГГ с ФАПЧ к полной мощности СГГ) выше 50 %. Спектральная характеристика стабилизированного СГГ, измеренная относительно опорного синтезатора при разрешении спектроанализатора 1 Гц, представлена на рис. 2б.

Было показано, что у СГГ на основе структур Nb-AlN-NbN вольт-амперные кривые в резонансном режиме (область ступеней Фиске) являются слегка наклонными из-за поверхностных потерь в нитриде ниобия, поэтому при правильном выборе токов питания и управления возможна реализация непрерывной перестройки частоты даже в резонансном режиме, в диапазоне 300-600 ГГц. Таким образом, полный диапазон непрерывной перестройки для СГГ из Nb-AlN-NbN составляет 300–750 ГГц; по результатам данной разработки получен патент РФ [9]. В диапазоне

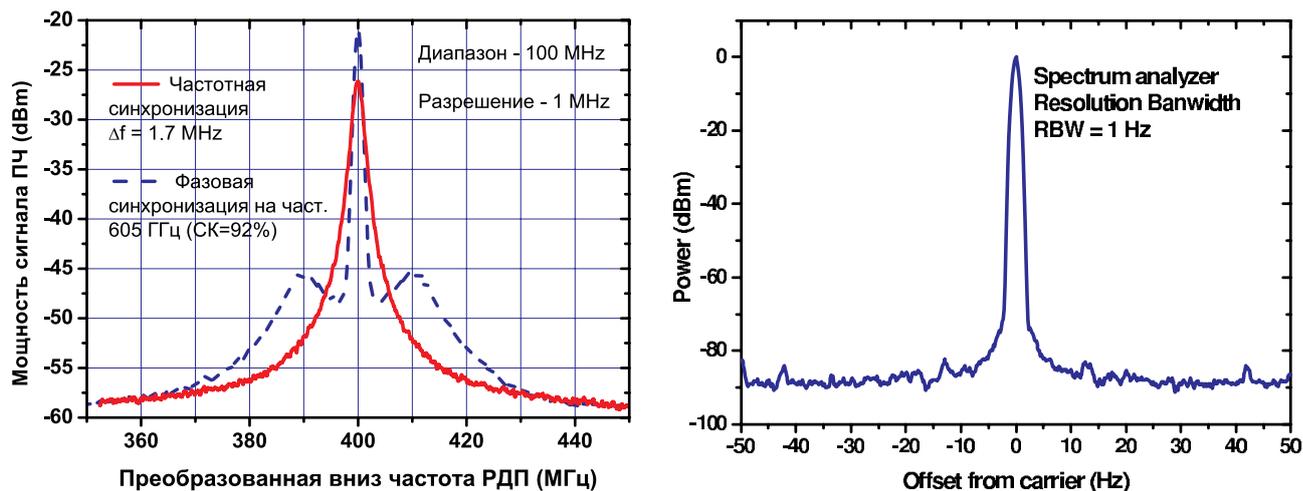


Рис. 2. Спектральные характеристики СГГ, измеренные относительно опорного синтезатора : а) полоса 100 МГц, разрешение 1 МГц, б) СГГ в режиме фазовой стабилизации; полоса анализатора 100 Гц, разрешение 1 Гц.

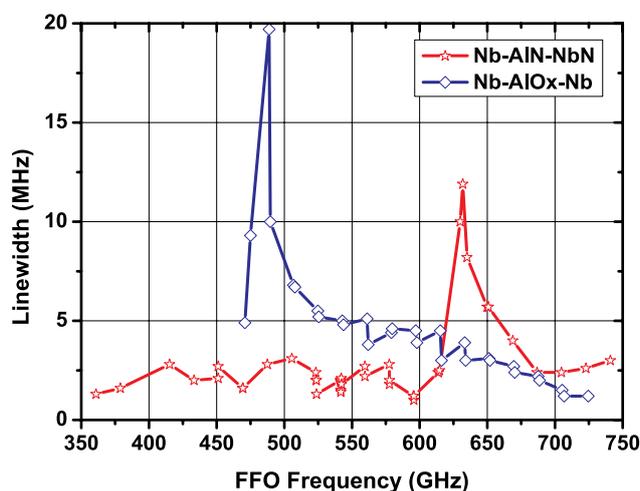


Рис. 3. Зависимость автономной ширины спектральной линии от частоты для СГГ на основе переходов Nb-AlOx-Nb (кривая с ромбами) и Nb-AlN-NbN (кривая со звездочками).

350–630 ГГц ширина автономной линии генерации составляет от 0,5 до 7 МГц (рис. 3), как следствие, в режиме фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) реализовано спектральное качество СГГ от 93 % до 35 % соответственно. Все это позволяет обеспечить гораздо более широкий диапазон непрерывного частотного покрытия по сравнению с переходами на основе ниобия. Возможность гарантировать узкую спектральную линию СГГ в частотном диапазоне около 500 ГГц определило выбор в пользу микросхем на основе Nb-AlN-NbN в качестве приемника для одного из спектральных каналов совместного международного проекта «Телис».

### «TELIS» – спектрометр для исследования атмосферы

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН принимал активное участие в разработке и запусках бортового спектрометра «TELIS» для высотного лимбового зондирования атмосферы. Проект выполнялся в рамках совместной программы ведущих научно-исследовательских институтов Германии (DLR), Нидерландов (SRON) и Англии (RAL). Инструмент имеет три частотных канала: 500 ГГц, 480–630 ГГц и 1,8 ТГц. Разработкой второго частотного канала (480–630 ГГц) занимался Институт космических исследований Нидерландов (SRON). В качестве чувствительного элемента была выбрана микросхема интегрального приемника, разработанная и изготовленная в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Коллектив исполнителей проекта принимал участие в разработке и тестировании электроники и алгоритмов управления спектрометром. Реализован частотный диапазон 480–630 ГГц, шумовая температура 120 К (DSB), полоса промежуточных частот 4–8 ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц [10, 11]. В качестве оконечного спектрометра использовался цифровой автокоррелятор с полосой 2 ГГц.

В 2009–2011 гг. на полигоне Esrange (Швеция) прошли успешные запуски спектрометра TELIS на борту высотного аэростата совместно со спектрометром MIPAS-B (рис. 4). Инструмент продемонстрировал возможность работы в экстремальных условиях (температура минус 90°C) и позволил собрать большое количество



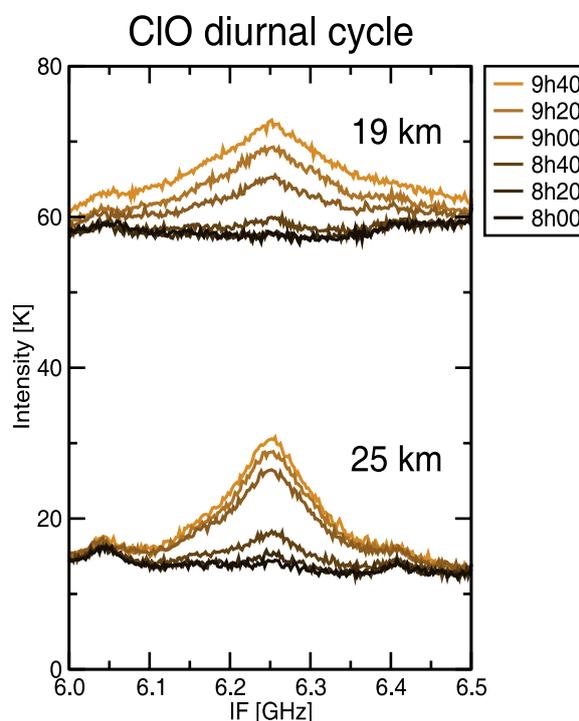
**Рис. 4.** Запуск Фурье-спектрометра MIPAS-B и инструмента TELIS на полигоне космического центра Esrange, Швеция. Объем аэростата: 400 000 м<sup>3</sup>; вес полезной нагрузки около 1 000 кг.

научной информации, подтверждающее высокое спектральное разрешение и чувствительность прибора. Было записано несколько сотен лимбовых сканов; зарегистрированы спектры газовых составляющих атмосферы Земли. В ходе полета на высотном аэростате зарегистрированы спектры соединений хлора, брома и других примесей, ответственных за разрушение озонового слоя в атмосфере Земли; в течение полета измерялись суточные вариации различных компонентов атмосферы. Исследованы дневные циклы концентрации монооксида хлора (рис. 5), образующейся в процессе каталитического разложения озона под воздействием хлорфторуглеродов. В диапазоне высот 12–36 км были получены также спектры изотопов различных веществ, в том числе изотопов воды и соляной кислоты (HCl) (рис. 6). Впервые в терагерцовом диапазоне были зарегистрированы спектры ВгО, интенсивность сигнала в этом случае составила всего лишь 0,3 К [12].

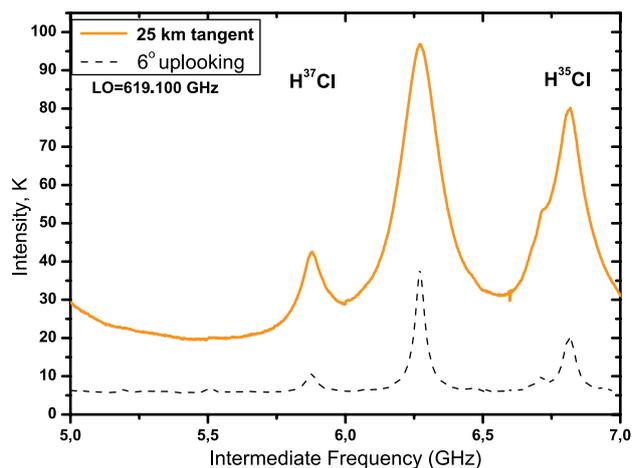
#### Лабораторные применения сверхпроводниковых спектрометров

Сейчас во всем мире активно ведутся разработки устройств субТГц и ТГц частотных диапазонов для задач медицины и биологии. Связано это, прежде всего, с тем, что в этом диапазоне лежат наиболее сильные линии поглощения многих веществ (например, вода, аммиак, спирты). В терагерцовом диапазоне находятся частоты колебаний больших групп атомов, образующих молекулу и колебания водородных

связей многих органических веществ, представляющих интерес для биологии и медицины (белки, молекулы ДНК). Кроме того, ТГц излучение не является ионизирующим и, следовательно, опасным для биологических объектов, как часто используемое рентгенов-



**Рис. 5.** Спектры, измеренные инструментом TELIS (высота аэростата 34 км, частота СГГ 507,3 ГГц). Показан рост концентрации ClO после восхода солнца. Измерения проводились при двух положениях телескопа, соответствующих высоте наблюдения 19 км и 25 км.



**Рис. 6.** Спектры, измеренные инструментом TELIS. Показаны спектральные линии двух изотопов HCl (частота СГГ=619,1 ГГц); приведены данные для двух направлений сканирования (25 км и для телескопа, поднятого на 6 градусов вверх).

ское, что дает возможность использовать его *in vivo*. Все эти факторы позволяют применять ТГц спектрометры для медицинских исследований. В частности, спектроскопический анализ выдыхаемого воздуха в ТГц диапазоне может быть эффективным неинвазивным диагностическим средством. Он позволяет

на основе измерения концентрации веществ-маркеров в выдыхаемом воздухе диагностировать целый ряд серьезных заболеваний. К их числу относятся хронический гастрит или пептическая язва желудка (в качестве маркера используется аммиак), различные легочные и онкологические заболевания (в выдыхаемом воздухе наблюдается оксид азота, NO и другие соединения). Интегральный сверхпроводниковый спектрометр субмм волн позволяет реализовать предельную чувствительность (ограниченную лишь квантовыми флуктуациями), высокое спектральное разрешение и малое энергопотребление; такой набор параметров недостижим при использовании традиционных технологий. По сравнению с разработанными к настоящему времени системами с близкими параметрами предлагаемый интегральный спектрометр имеет значительно больший диапазон входных частот (за счет уникально широкой перестройки частоты сверхпроводникового генератора гетеродина), значительно меньшие габариты и энергопотребление, а также возможность однозначной идентификации маркеров заболеваний.

На базе интегрального спектрометра в ИРЭ РАН разработан и изготовлен макет измери-



**Рис. 7.** Фотография лабораторной установки для исследования спектров поглощения газов.

тельной криогенной установки для анализа выдыхаемого воздуха. Диапазон входных частот составляет 480–630 ГГц, шумовая температура на большей части диапазона составляет менее 200 К, разрешение лучше 1 МГц. Такие параметры позволяют регистрировать спектральные линии вращательных переходов большинства простых органических и неорганических соединений, присутствующих в выдохе человека. Был разработан измерительный стенд, включающий газовую кювету и систему напуска и откачки образцов газов и газовых смесей. В лабораторной кювете были проведены измерения газа  $\text{OCS}$  и  $\text{NH}_3$ . Продемонстрирован четкий отклик на частоте линии поглощения газа при давлениях до  $10^{-3}$  мБар. Показано, что измерения с достаточной точностью могут быть выполнены в течение нескольких секунд, что позволяет проводить диагностику пациента в реальном масштабе времени. Первые измере-

ния субТГц спектров выдоха человека показали не только высокую селективность и быстроту анализа, но и значительную чувствительность спектрометра.

В заключение авторы хотели бы отметить, что в выполнении проекта активное участие принимали наши коллеги, сотрудники ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и они являются полноправными соавторами полученных результатов: П.Н. Дмитриев (изготовление и исследование интегральных схем), А.Б. Ермаков (алгоритмы управления, программирование), Н.В. Кинев (экспериментальные исследования). В рамках проекта TELIS тесное сотрудничество осуществлялось со специалистами Института космических исследований Нидерландов (SRON): Р.А. Yagoubov, G. de Lange, A. de Lange, H. Golstein, R. Hoogeveen, B. van Kuik, L. de Jong, J. Dercksen, D. Boersma, E. de Vries.

### Литература

1. «Интегральный сверхпроводниковый спектрометр субмм волн для радиоастрономии и мониторинга атмосферы», проект РФФИ № 03-02-16748-а (2003–2005).
2. «Разработка бортового сверхпроводникового спектрометра терагерцового диапазона для мониторинга атмосферы и радиоастрономии», проект РФФИ № 06-02-17206-а (2006–2008).
3. *Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., et al*, “First Implementation of a Superconducting Integrated Receiver at 450 GHz”. *Appl. Phys. Lett.* 68, No 9, 1273 (1996).
4. *Koshelets V. P. and Shitov S V.* “Integrated Superconducting Receivers”. *Supercond. Sci. Technol.* 13, R53 (2000).
5. *Filippenko L.V., Shitov S.V., Dmitriev P.N., et al*, “Integrated Superconducting Receiver: fabrication and yield”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, v.11, No 1, pp. 816–819, (2001).
6. *Dmitriev P.N., Lapitskaya I.L., Filippenko L.V., et al*, “High Quality Nb-based Integrated Circuits for High Frequency and Digital Applications”, “*IEEE Trans. on Appl. Supercond.*”, vol. 13, No 2, pp. 107–110, (2003).
7. *Torgashin M.Yu., Koshelets V.P., Dmitriev P.N., et al*, “Superconducting Integrated Receivers based on Nb-AlN-NbN circuits”, “*IEEE Trans. on Appl. Supercond.*”, vol. 17, pp.379– 382, (2007).
8. Проект РФФИ № 11-02-12213\_офи\_м «Генераторы и детекторы СВЧ излучения на основе сверхпроводниковых туннельных наноструктур».
9. Патент на изобретение № 22325003, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской федерации 20 мая 2008 года «Криогенный генератор гетеродина на основе распределенного туннельного перехода для интегрального спектрометра субмм волн с системой ФАПЧ», авторы Кошелец В.П., Дмитриев П.Н., Филиппенко Л.В., Торгашин М.Ю.
10. *de Lange, G., Birk, M., Boersma D., et al*, “Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder”, *Supercond. Sci. Technol.* vol. 23, No 4, 045016 (8pp), (2010).
11. *Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Кинев Н.В., и др*, «Сверхпроводниковый интегральный приемник субмиллиметрового диапазона», *Успехи современной радиоэлектроники*, №5, стр. 75–81, (2010)
12. *de Lange, A., Birk, M., de Lange, G., et al*, «HCl and ClO in activated Arctic air; first retrieved vertical profiles from TELIS submillimetre limb spectra», *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 487–500, (2012).

## ГЕНОСИСТЕМАТИКА ПЕЧЕНОЧНИКОВ – ДРЕВНЕЙШИХ НАЗЕМНЫХ РАСТЕНИЙ

*Научная работа российского молодого ученого Анны Александровны Вильнет<sup>1</sup>  
в Институте физико-химической биологии имени А.Н. Белозерского  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова*



Вильнет Анна Александровна, к.б.н., н.с.  
лаборатории флоры и растительности ПАБСИ.



Троицкий Алексей Викторович, д.б.н.,  
заведующий отделом эволюционной биохимии,  
руководитель стажировки.

В начале моей научной деятельности меня посетила двойная удача: я познакомилась с двумя замечательными людьми, настоящими Учеными, признанными в мире ведущими специалистами в своих областях, взявшими меня под свое научное крыло. Сейчас я работаю в Полярно-альпийском ботаническом саду-институте имени Н.А. Аврорина Кольского научного центра РАН в лаборатории флоры и растительности, возглавляемой авторитетнейшим в мире гепатикологом (специалист по печеночникам) — д.б.н. Надеждой Алексеевной Константиновой. Второй мой руководитель — заведующий отделом эволюционной биохимии Института физико-химической биологии имени А.Н. Белозерского Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова — д.б.н. Алексей Викторович Троицкий, активно развивающий геносистематику (молекулярную филогенетику) — научное направление, основанное в середине XX века академиком А.Н. Белозерским. Успешному продолжению совместных исследований после защиты моей кандидатской

диссертации содействовал Российский фонд фундаментальных исследований, дважды поддержавший мои стажировки под руководством Алексея Викторовича в НИИ ФХБ.

Печеночники — уникальные организмы, самостоятельный отдел высших растений, у которых, наряду с мхами и антоцеротовыми, в жизненном цикле преобладает гаметофитная (гаплоидная) фаза и отсутствует сосудистая система. Еще относительно недавно все эти растения объединялись в группу мохообразных, с предполагаемым происхождением от единого общего предка и неясным родством по отношению к сосудистым растениям. Однако исследования двух последних десятилетий показали независимость их происхождения и позволили установить, что печеночники (Marchantiophyta) — древнейшая линия эволюции наземных растений, возникшая около 450 млн лет тому назад и ставшая пионерной в заселении суши и создании условий для развития сосудистых растений. Определяющую роль для

<sup>1</sup> Вильнет Анна Александровна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Кольского научного центра Российской академии наук, e-mail: anya\_v@list.ru.

этого вывода сыграли молекулярно-эволюционные данные, позволяющие реконструировать генеалогию организмов по изменениям наследственного материала — ДНК, накапливающихся в ходе филогенеза. Древность и примитивность морфологической организации печеночников определяют важность их исследования. Они могли сохранить в исходном состоянии свойства, получившие впоследствии развитие у более высокоорганизованных форм, и выработать иные, своеобразные, не встречающиеся у других растений.

Печеночники — сейчас их по разным оценкам от 5,5 тыс. до 7 тыс. видов — малозаметные для неспециалистов растения. Это объясняется их малыми размерами (несколько сантиметров, а иногда и миллиметров), незначительной ролью в сложении фитоценозов таежной зоны России (хотя встречаются почти повсеместно), сложностью идентификации многих растений этой группы. Однако в горных и тропических регионах печеночники могут быть доминантами и даже эдификаторами (ценозообразовате-



Рис. 1. Листостебельный печеночник из рода *Mylia* Gray.

лями). Например, в горах Мурманской области на высотах свыше 800 метров формируются сообщества печеночников площадью до нескольких десятков квадратных метров (Рис. 1).

В современной гепатикологии накопилось немало вопросов, которые невозможно было решить традиционными методами систематики и филогенетики ввиду слабой изученности варибельности признаков, плохой сохранности ископаемых остатков. Длительное время одновременно существовали несколько гипотез об эволюции печеночников, и как следствие, несколько таксономических систем и

взглядов на объем и таксономический статус отдельных таксонов.

Достигнутые к настоящему времени успехи в области молекулярно-эволюционных исследований печеночников заключаются в выявлении общей схемы их филогении (Hennyngren et al., 2006; Forest et al., 2006) и разработке на ее основе новой систематики отдела (Crandall-Stotler et al., 2009), которые кардинально отличаются от систем, общепризнанных всего несколько десятилетий назад (см. обзор Вильнет с соавт., 2009).

Сейчас первоочередной задачей является изучение молекулярной филогении и систематики таксонов уровнем ниже порядков: видов, родов, семейств и подпорядков. В России в течение почти десяти лет такие исследования проводятся всего одним коллективом под руководством Алексея Викторовича и Надежды Алексеевны, в котором участвую и я. Нами опубликованы данные по систематике семейства *Lophoziaceae* Cavers. (Yatsentyuk et al., 2004), роду *Lophozia* (Dumort.) Dumort. s.l. (Vilnet et al., 2008), семействам подпорядков *Sephaloziineae* и *Jungermanniiineae* (Vilnet et al., 2010), на основе молекулярно-генетических данных описаны новые для науки виды (Bakalin, Vilnet, 2009), роды и даны новые комбинации (Konstantinova, Vilnet, 2009). Эти работы активно обсуждаются и используются в исследованиях ученых разных стран (Söderström et al., 2010; Vaña, 2010).

Конкретной целью моих стажировок в НИИ ФХБ стало изучение молекулярной филогении и систематики одного из ведущих по видовому разнообразию во флоре печеночников России семейства *Sephaloziaceae* Mig. s.l. Первая стажировка проходила в мае-июне 2009 г., вторая в апреле-мае 2010 г. После продолжительной заполярной зимы весенняя Москва пробуждает к жизни цветением садов, когда территория МГУ утопает в аромате яблонь, каштанов, сиреней.

В ходе работы мною исследована варибельность нуклеотидных последовательностей двух маркеров: первого и второго внутренних транскрибируемых спейсеров рибосомного оперона ядерной ДНК (ITS1-2 ядДНК) и фрагмента хлоропластной ДНК, кодирующей тРНК лейцина и фенилаланина (*trnL-F* хпДНК). Эти участки оказались наиболее информативными для выявления филогенетических связей на видовом и родовом уровнях. Для семейства *Sephaloziaceae* характерна значительная варибельность длины исследованных локусов

ДНК. По характеру вставок и делеций в интроне *trnL* можно дифференцировать виды в родах *Cephalozia* (Dumort.) Dumort. и *Odontoschisma* (Dumort.) Dumort. Нами получены результаты, во многом изменившие традиционные представления о филогении и систематике семейства *Cephaloziaceae* s.l.

Во-первых, оказалось, что на реконструированных по нуклеотидным последовательностям филогенетических деревьях оно не монофилетично, и все его роды распределены по трем кладам: первая представлена родами *Cephalozia*, *Pleurocladula* Grolle, *Schofieldia* J.D.Godfrey и *Nowellia* Mitt., вторая — *Cladopodiella* H.Buch, *Odontoshisma*, *Alobielopsis* R.M.Schust. и *Iwatsukia* N.Kitag., третья — *Hygrobliella* Spruce. Распределение таксонов в кладах отчасти согласуется с распределением некоторых анатомических признаков: наличия/отсутствия масляных телец в клетках растения и числом клеточных слоев, формирующих стенку коробочки спорогона (органа, в котором формируются споры). В частности, *Cephalozia*, *Pleurocladula*, *Schofieldia* и *Nowellia* не имеют масляных телец, стенка коробочки двухслойная. *Cladopodiella* и *Odontoshisma* характеризуются двух- или четырехслойной стенкой коробочки (двухслойная у *Alobielopsis* и *Iwatsukia*), а также различными по структуре и строению масляными тельцами. Таким образом, полученные данные подтверждают ранее широко не принятое мнение о самостоятельности семейств *Odontoschismataceae* (Grolle) Schljakov и *Hygrobliellaceae* (Joerg) Konstant & Vilnet.

Во-вторых, выяснилось, что типовой род семейства — *Cephalozia* — в традиционном его понимании также не монофилетичен. Монотипные роды *Pleurocladula*, *Schofieldia* и в основном распространенный в южном полушарии род *Nowellia* входят в состав клады рода *Cephalozia*. Ранее на филогенетическую близость *Pleurocladula* и *Cephalozia* указывал известный американский гепатиколог — R. M. Schuster (1974), основываясь исключительно на сходстве некоторых анатомо-морфологических признаков.

Учитывая вариабельность нуклеотидных последовательностей, нам удалось подтвердить видовой статус таксонов, которые долгое время трактовались как внутривидовые. Например, *Cephalozia otaruensis* Steph. — вид с юго-восточно-азиатским распространением, считавшийся подвидом *Cephalozia bicuspidata* (L.) Dumort.,

филогенетически близок к нему, но хорошо обособлен по молекулярно-генетическим признакам. С другой стороны *Cephalozia ambigua* C. Massal., как по анатомо-морфологическим,



Рис. 2. *Cephalozia bicuspidata* под микроскопом.

так и по молекулярным данным, мало дивергировала от *Cephalozia bicuspidata*, однако, до получения результатов комплексного изучения этой пары таксонов вопрос о статусе *Cephalozia ambigua* остается открытым (Рис. 2).

Благодаря сравнительному анализу нуклеотидных последовательностей была подтверждена видовая самостоятельность *Cephalozia affinis*, ранее сведенного в состав *Cephalozia lunulifolia* (Dumort.) Dumort. Установлено, что *Cephalozia pleniceps* (Aust.) Lindb. представляет собой достаточно гетерогенный таксон, характеризующийся высокой, по сравнению с другими видами рода, внутривидовой вариабельностью исследованных локусов ДНК. Возможно, мы наблюдаем происходящий в настоящее время процесс дивергенции популяций и становления новых видов. Впервые выявленная нами полифилетичность родов *Odontoschisma* и *Cladopodiella* из семейства *Odontoschismataceae* ставит задачи на перспективную работу в изучении систематики этого семейства.

В ходе стажировок мне удалось выполнить не только запланированные работы, но и, с помощью сотрудников НИИ ФХБ имени А.Н. Белозерского к.б.н. Веры Константиновны Бобровой и к.б.н. Ирины Алексеевы Милютиной, освоить новые для меня методы: клонирование фрагментов, полученных в ходе ПЦР-реакции, в бактериальной плазмиде, выделение микроРНК из растений и их электрофорез в полиакриламидном геле и др., которые, несомненно, расширят мои исследовательские возможности (Рис. 3).

Результаты нашей работы были частично изложены мною в докладе «On molecular phylogeny and systematics of suborder Cephaloziineae (Jungermanniales, Marchantiophyta)» на Второй московской международной конференции «Молекулярная филогенетика» (поддержанной РФФИ), проходившей как раз во время моей стажировки, 18–21 мая 2010 г. на Биологическом факультете МГУ. Участие в этой конференции позволило укрепить международные контакты нашей исследовательской группы.

Мое участие в нашем географически разделенном коллективе и развитие двух научных школ: в НИИ ФХБ МГУ и ПАБСИ КНЦ РАН, работающих в актуальном направлении в классической ботанической науке — было бы невозможно без поддержки РФФИ, которому мы выражаем свою искреннюю благодарность и надежду на дальнейшее плодотворное сотрудничество.

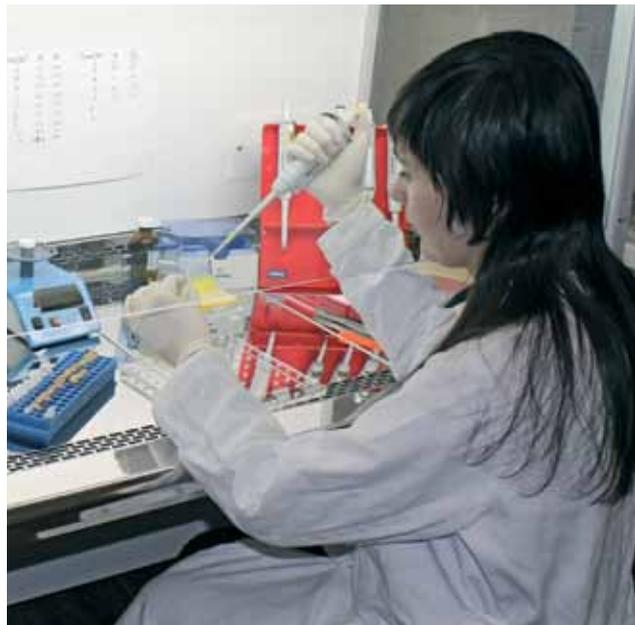


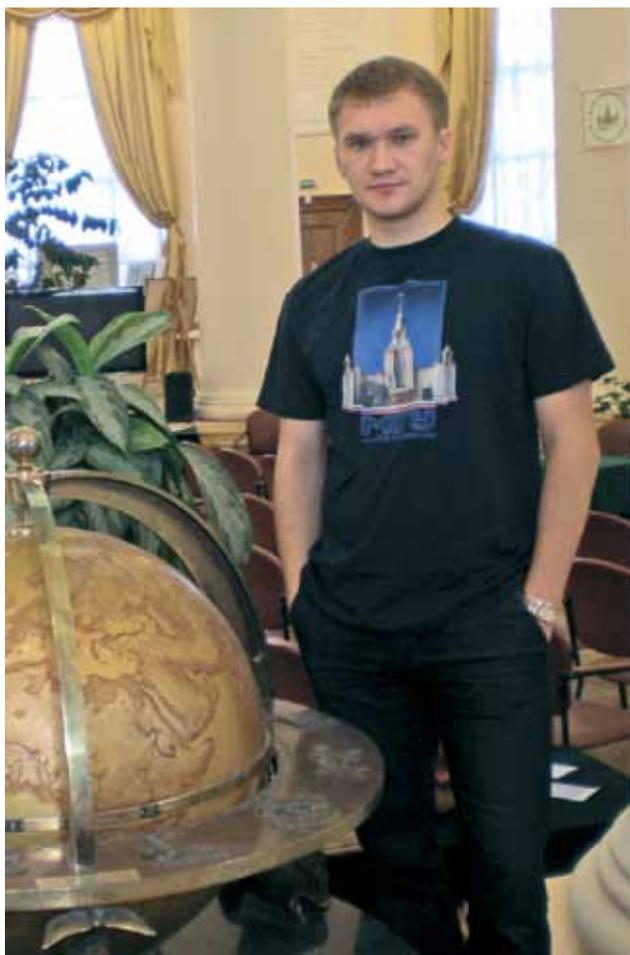
Рис. 3. За работой в лаборатории.

#### Список литературы

1. *Bakalin V. A., Vilnet A. A.* 2009. Two new species of Jungermanniaceae from Asian Russia // *Arctoa*. 18: 151–162.
2. *Crandall-Stotler B., Stotler R. E., Long D. G.* 2009. Phylogeny and classification of the Marchantiophyta // *Edinburgh J. Bot.* 66: 155–198.
3. *Forrest L. L., Davis E. C., Long D. G., Crandall-Stotler B. J., Clark A., Hollingsworth M. L.* 2006. Unraveling the evolutionary history of the liverworts (Marchantiophyta): multiple taxa, genomes and analyses // *The Bryologist*. 109: 303–334.
4. *He-Nygren X., Juslen A., Glenn D., Piippo S.* 2006. Illuminating the evolutionary history of liverworts (Marchantiophyta) - towards a natural classification // *Cladistics*. 22: 1–31.
5. *Konstantinova N. A., Vilnet A. A.* 2009. New taxa and new combinations in Jungermanniales (Hepaticae) // *Arctoa*. 18: 65–67.
6. *Schuster R. M.*, 1974. The Hepaticae and Anthocerotae of North America east of the hundredth meridian // Columbia University Press. 3: 1–880.
7. *Söderström L., De Roo R., Hedderston T.* 2010. Taxonomic novelties resulting from recent reclassification of the Lophoziaceae/Scapaniaceae clade // *Phytotaxa*. 3: 47–53.
8. *Váňa J., Soederstroem L., Hagborg A., Konrat M., Engel J.* 2010. Early land plants today: taxonomy, systematics and nomenclature of Gymnomitriaceae // *Phytotaxa*. 11: 1–80.
9. *Vilnet A. A., Konstantinova N. A., Troitsky A. V.* 2010. Molecular insight on phylogeny and systematics of the Lophoziaceae, Scapaniaceae, Gymnomitriaceae and Jungermanniaceae // *Arctoa* 19: 31–50.
10. *Vilnet A. A., Konstantinova N. A., Troitsky A. V.* 2008. Phylogeny and systematics of the genus *Lophozia* s. str. (Dumort.) Dumort. (Hepaticae) and related taxa from nuclear ITS1-2 and chloroplast trnL-F sequences // *Mol. Phylogenet. Evol.* 47: 403–418.
11. *Yatsentyuk S. P., Konstantinova N. A., Ignatov M. S., Hyvönen J., Troitsky A. V.* 2004. On phylogeny of Lophoziaceae and related families (Hepaticae, Jungermanniales) based on trnL-trnF intron-spacer sequences of chloroplast DNA // *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden*. 98: 150–167.
12. *Вильнет А. А., Константинова Н. А., Троицкий А. В.* 2009. Геносистематика и новый взгляд на филогению и систему печеночников // *Молекулярная биология*. 43(5): 845–855.

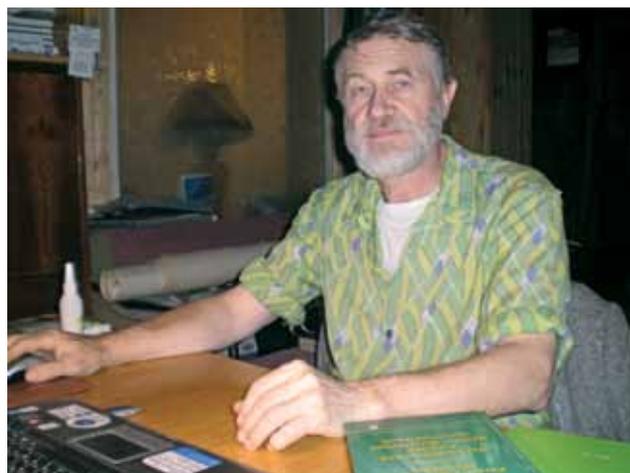
## ОПЫТ СОТРУДНИЧЕСТВА ГЕОГРАФОВ ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА И МГУ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ МЕТОДАМИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

*Стажировка российского молодого учёного Александра Анатольевича Ерофеева на кафедре физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*



Ерофеев Александр Анатольевич

Впервые я посетил МГУ имени М.В. Ломоносова (МГУ) в апреле 2009 г. в рамках поездки на международный молодежный научный форум. Мой научный руководитель, доцент Томского государственного университета (ТГУ) Вадим Валерьевич Хромых неоднократно бывал на географическом факультете и часто рассказывал о высоком научном потенциале школы географов МГУ. Решив в



Руководитель стажировки профессор В.В. Сысуйев в своем рабочем кабинете в загородном доме.

полной мере воспользоваться возможностями той поездки, я, не раздумывая, пошел знакомиться со своими коллегами на кафедру физической географии и ландшафтоведения. Представившись сотрудником кафедры географии ТГУ, я обратился к заведующему кафедрой К.Н. Дьяконову с вопросом о возможности совместного сотрудничества в области цифрового морфометрического анализа водосборов малых рек. Удивленный моему появлению, он сказал, что данная тематика в настоящее время действительно является актуальной и в значительной мере перекликается с научными изысканиями профессора В.В. Сысуева, пообещав сегодня же познакомить меня с ним. Так как это был мой последний день пребывания в МГУ в рамках молодежного форума, мне повезло, и в этот день Владислав Васильевич присутствовал на кафедре. За кружкой чая мы пообщались, обговорили точки соприкосновения наших научных интересов,

<sup>1</sup> Ерофеев Александр Анатольевич, младший научный сотрудник Томского государственного университета геолого-географического факультета, e-mail: erofeew@yandex.ru.

после чего пришли к выводу, что обязательно встретимся вновь для реализации совместного научного проекта. Для того, чтобы написать качественную совместную заявку и к нужному сроку отправить ее в организационный комитет, в последующем мы созванивались и вели интернет переписку. Наконец, летом 2010 г. пришло долгожданное решение РФФИ о том, что наша заявка поддержана, и я поеду стажироваться в университет на Воробьевых горах.

В ходе совместных консультаций с руководителем стажировки было решено работать над темой «Ландшафтно-экологический анализ водосборов малых рек методами геоинформационного моделирования и полевого геофизического мониторинга». Согласно плану, весь комплекс научно-исследовательских работ должен был проходить в три этапа: подготовительный, этап экспедиционных исследований, а также этап камеральной обработки экспедиционного и уже имеющегося фондового материала. При этом необходимо отметить, что последний этап камеральных работ под названием «Создание и анализ цифровых моделей рельефа (ЦМР) водосборов малых рек», значительно преобладал по затраченному времени и усилиям над другими, поскольку требовалось уделить этому компоненту исследований особое внимание.

При подготовительном этапе, в первую очередь, для меня было важно определиться, по каким именно теоретическим направлениям необходимо активизировать подготовку, чтобы с наименьшими усилиями влиться в команду исследователей под руководством профессора. В связи с этим значительная часть времени первого этапа была использована для освоения методических принципов и практических навыков работы с георадаром подповерхностного зондирования «ОКО-2», а также изучения методических основ работы, с незнакомым до этого мне специализированным программным обеспечением: FracDim, ECo, Surfer, SAGA. Также, несмотря на то, что в практике экспедиционной деятельности мне постоянно приходилось иметь дело со сбором и анализом полевой информации, тем не менее, важно было ознакомиться с существующими особенностями, действующими в рамках структурно-генетической и динамической концепции, которой придерживаются ландшафтоведы МГУ.

Вторым этапом научно-исследовательских работ в рамках стажировки стали экспедици-

онные исследования в Национальном парке «Валдайский». Так, основной целью экспедиций было проведение сезонных ландшафтно-гидрологических исследований в бассейне р. Лонинка для получения количественных параметров гидрологического функционирования геосистем.

В летний период в ходе экспедиции, коллективом исследователей уже был выполнен комплекс измерений, включая: 12 измерений расхода воды в русле р. Лонинка и ее притоках; 23 измерения общей минерализации воды в бассейне р. Лонинка и 15 измерений общей минерализации в окрестных озерах. Мое участие было осуществлено в осенний этап исследований, по итогам которого было выполнено: 7 измерений расходов воды в русле р. Лонинка и ее притоках; 29 измерений общей минерализации воды в р. Лонинка и других водопоях, уточнены границы 17 геосистем, входящих в долину реки, а также проведено георадарное зондирование камового холма близ русла р. Лонинка.

К большому сожалению, получить гидрологические характеристики в нескольких участках русла, в силу объективных факторов, не удалось. Данное обстоятельство было вызвано проживанием на этих участках популяций бобров, возводящих в своей жизнедеятельности плотины. Плотины перекрывали участки русла реки и, как следствие, полностью изменяли гидрологический режим на данных участках (рис. 1).



Рис. 1. Автор на фоне истока реки Лонинки перегороженного бобровой плотиной.

Также, в ходе осеннего этапа экспедиции, в рамках исследования литологической основы

лесных южнотаежных ландшафтов было проведено георадарное зондирование подповерхностной толщи отложений камового холма бассейна р. Лонинки.

В целом стоит сказать, что актуальность применения данного инструментария заключается в том, что в геоэкологии с помощью георадара можно решать широкий круг задач, которые имеют значение для оценки ресурсного потенциала территории, мониторинга состояния окружающей среды и охраны природы. Для реализации запланированных мероприятий нами был использован георадар подповерхностного зондирования «ОКО-2» с антенной типа «Тритон». При этом в начале исследований необходимо было познакомиться с самим прибором, посмотреть, как он работает в лесу, найти оптимальный способ передвижения по лесу двоих человек (один с антенным блоком, второй — рядом с компьютером), при условии полной сохранности оптического кабеля.

После экспедиционного этапа мне удалось принять участие во Всероссийской молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы географии и гидрологии суши».

Данное мероприятие состоялось 22–25 сентября на площадке учебно-научной базы МГУ «Красновидово». Участниками научной школы, кроме сотрудников МГУ, стали специалисты Томского, Пермского, Казанского, Воронежского, Астраханского, Белгородского государственных университетов, Российского ГУ имени И. Канта, института физики атмосферы РАН, Саратовского ГУ им. Н.Г. Чернышевского, института геоники (Академия наук Чешской республики) и др. (рис. 2).

Программа научной школы включала лекции ведущих специалистов, круглые столы, тесты, ландшафтно-исторические экскурсии по Подмосковию, брейн-ринг, соревнования по настольному футболу и теннису. Помимо общения с экспертами, участники научной школы представляли собственные проекты и разработки по различным направлениям:

- последствия изменений климата для природной среды, хозяйства и здоровья населения России;
- проблемы рационального природопользования и устойчивого развития южных и арктических регионов России;
- использование дистанционных методов в географических исследованиях и др.



**Рис. 2.** Участники научной школы в Красновидово, приехавшие из разных уголков России и стран Европы.

Лекции различной тематики для участников научной школы прочитали:

- А.А. Алексеевский, заведующий кафедрой гидрологии суши;
- А.В. Кислов, заведующий кафедрой метеорологии и климатологии МГУ;
- К.Н. Дьяконов, заведующий кафедрой физической географии и ландшафтоведения МГУ;
- С.А. Добролюбов, заведующий кафедрой океанологии МГУ;
- А.Н. Чумаченко, декан географического факультета СГУ;
- В.Н. Голосов, в.н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов;
- Я. Колейка, Институт геоиконики Академии наук Чешской республики, г. Брно;
- В.Е. Гершензон, генеральный директор ИТЦ «СКАНЭКС» и др.

О перспективных направлениях развития географии участникам школы рассказал С.А. Добролюбов, подчеркнув, что для информационного обеспечения развития различных направлений экспертной деятельности планируется создать единый геопортал с использованием данных дистанционного зондирования (ДДЗ). В перспективе возможно развитие практики применения геопортальных технологий в новый центр космического зондирования Земли МГУ им. М.В. Ломоносова. В настоящее время продолжается работа над программой развития ФГОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на 2010–2020 гг. Программа включает Приоритетное направление развития 6 (ПНР-6) — «Рациональное природопользование и устойчивое развитие регионов России». «Эта программа нужна прежде всего вам, потому что на вас ляжет основная задача ее претворения в жизнь», — резюмировал С.А. Добролюбов, обращаясь к участникам Международной школы.

Мною был представлен доклад на тему «Использование данных дистанционного зондирования (ДДЗ) при ландшафтном планировании водоохранных зон малых рек в пределах урбанизированных территорий», с последующим присуждением диплома участника Всероссийской молодежной научной школы.

Как отмечали участники школы, мероприятие позволило не только пообщаться с экспертами и узнать о новейших результатах исследований в различных сферах географической науки, но и существенно расширить круг профессио-

нальных и личных контактов. По завершению всех мероприятий, организационный комитет научной школы наградил меня как участника, приехавшего из самой далекой географической точки от места проведения мероприятия, наряду с дипломом участника, памятным дипломом «Расстояние — ничто, жажда знаний — все».

Последним этапом научно-исследовательских работ было создание и анализ цифровых моделей рельефа (ЦМР) водосборов малых рек Лонинка и Ушайка. Работа осуществлялась в камеральных условиях при помощи сканирования и векторизации разномасштабных картографических источников, космических снимков, материалов полевых исследований и специализированного программного обеспечения ArcGIS 9.3., MapInfo 10, SAGA 2.0.5., Map Window 4.6., FracDim и др.

Объектами для создания ЦМР выступили изученный в ходе полевого этапа исследований бассейн малой реки Лонинка (НП «Валдайский»), а также бассейн малой реки Ушайка (Томская область), исследования которого проводились автором в 2008–2009 гг. На начальном этапе создания ЦМР, производилась оцифровка сканированной топографической карты долины р. Лонинки и р. Ушайка путем полуавтоматической и ручной векторизации горизонталей и высотных отметок в программе векторизаторе Easy Trace (EasyTrace Group). Для каждого векторизованного объекта создавалась атрибутивная база данных, куда записывались значения высот, урезов воды и других показателей. Данные, созданные в EasyTrace, затем экспортировались в векторный формат «шейп-файлов» (Shape) в целях обработки всех существующих слоев данных в полнофункциональном программном комплексе ArcGis 9.3. (ESRI inc.).

На основе оцифрованных с топокарт горизонталей, высотных отметок, контуров гидросети и структурных линий в ГИС-пакете ArcGis 9.3. (ESRI inc.) при помощи модуля 3D Analyst была построена ЦМР долин р. Лонинки и р. Ушайки в формате нерегулярной триангуляционной сети (TIN). При этом векторные слои полигональной и линейной гидросети рассчитывались как резкие перегибы рельефа, а во избежание построения программой поверхностей с нулевым уклоном («эффект плоских террас», который выражается в появлении так называемых «псевдотреугольников» — плоских участков в заведомо невозможной геоморфологической ситуации) были вве-

дены дополнительные линии перегиба рельефа, которые на местности соответствуют тальвегам ручьев, оврагам, перегибам склонов и др.

В результате, по завершению камерального этапа исследований были разработаны уникальные методики сложного пространственного анализа геосистем долин малых рек с применением цифровых моделей рельефа (ЦМР).

Так, впервые для бассейнов малых рек Лонинка (НП «Валдайский») и Ушайка (Томская область) были опробированы методики расчета ЦМР с заполненными локальными понижениями рельефа (Filled sinks), с последующим определением удельной площади водосбора (Catchment Area), а также отрисовкой дренажной сети (Channel Network). Были рассчитаны показатели «времени добегания» и «скорости стекания» поверхностных стоков бассейнов малых рек, имеющих важное значение для определения миграции загрязняющих веществ в пределах всего водосборного бассейна малой реки. Была установлена высокая значимость опционных коэффициентов («Manning's N» и «Curve number»)

для конечных расчетов времени добегания и скорости стекания поверхностных стоков (рис. 3). В последующем актуальной задачей представляется адаптация разработанных показателей и коэффициентов при решении широкого спектра задач рационального природопользования.

Таким образом, после проведения всех запланированных этапов работ появилась возможность написать отчет по итогам научной стажировки.

В заключение хотелось бы сказать, что благодаря поддержке РФФИ нашей совместной заявки на получение гранта по программе «Мобильность молодых ученых» у меня появилась возможность три месяца находиться в потрясающей творческой атмосфере, познакомиться с ведущими учеными географического факультета МГУ, обменяться последними разработками в области цифровых методов ландшафтного анализа водосборов малых рек, значительно повысить свой профессиональный уровень, принять участие во Всероссийской научной школе-конференции, а также активно и с пользой провести время.

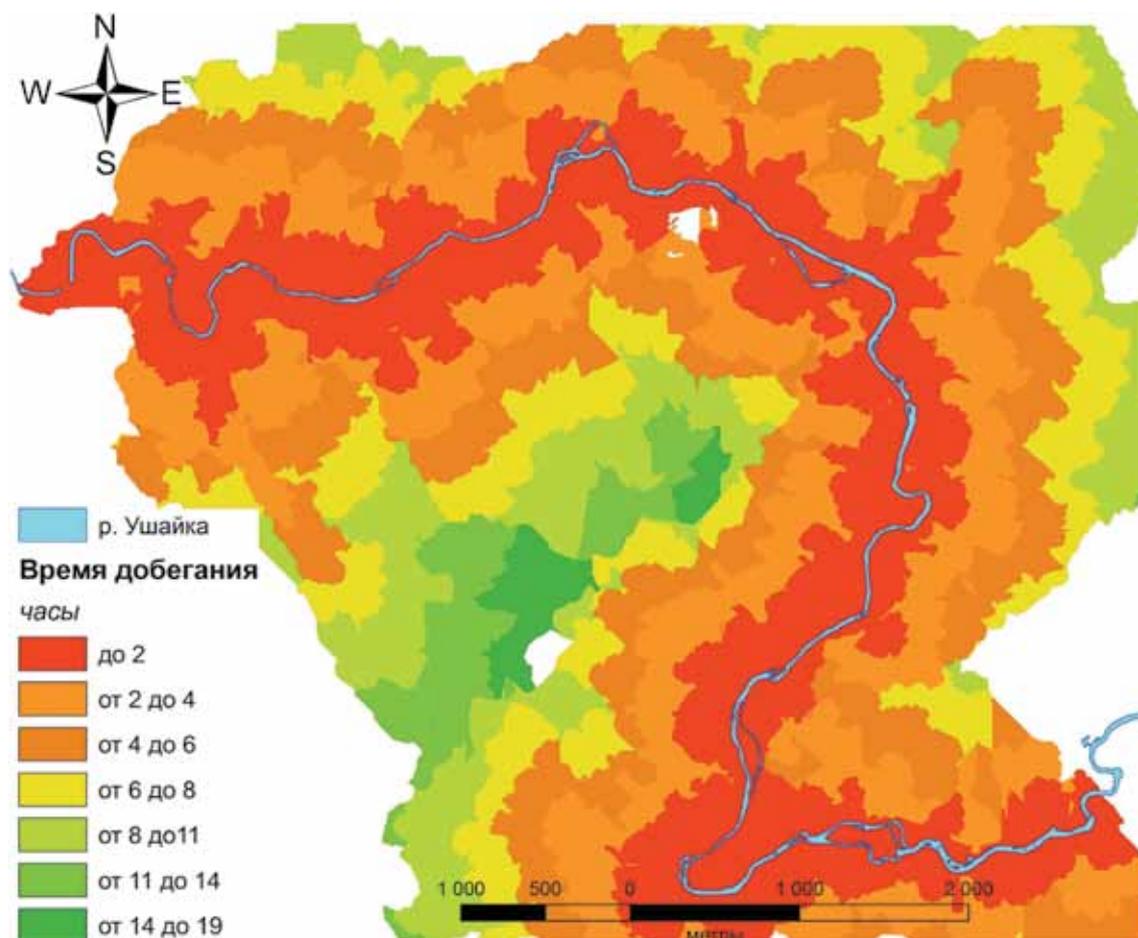


Рис. 3. Карты времени добегания поверхностных стоков бассейна р. Ушайки при заданной интенсивности осадков 10 мм/час, созданные и классифицированные в ГИС-пакете SAGA.

## ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ КЛОНИРОВАННЫХ IN VITRO ОРХИДНЫХ

*Стажировка украинского молодого ученого Натальи Станиславовны Иванниковой<sup>1</sup> в Брянском государственном университете им. академика И.Г. Петровского*



Иванникова Наталья  
Станиславовна



Мой научный руководитель д.б.н.,  
профессор Нам Ирина Ян Гуковна.

Очень важно, чтобы на жизненном пути вам встречались люди по-настоящему влюбленные в свое дело. Они вдохновляют, зажигают своей энергией и жизнелюбием всех окружающих. В нашей средней школе русскую словесность преподавала прекрасный учитель, педагог по призванию Кравченко Лидия Васильевна, поэтому в школе я мечтала быть учителем русского языка и литературы. Однако жизнь вносит свои коррективы, и случилось так, что по окончании Киевского Национального университета им. Тараса Шевченко мы вместе с мужем работаем в лаборатории биотехнологии Национального ботанического сада им. Н.Н. Гришко (НБС) в Киеве. Основное направление работы нашего подразделения – поддержка и воспроизводство уникальной и наибольшей на территории Украины коллекции тропических и субтропических орхидей, которая имеет официальный статус Национального достояния Украины. На сегодня коллекция насчитывает более 608 таксонов этих удивительных растений, происходящих с различных континентов.

С коллегами из Брянского государственного университета им. академика И.Г. Петровского (БГУ) нас связывают давние научные отношения: между нашими организациями заключен договор о научном и творческом сотрудниче-

стве. Тематика совместных исследований «Изучение особенностей репродуктивной биологии представителей семейства орхидных путем разработки способов мультилокусного профилирования ДНК методом полимеразной цепной реакции».

Со своим научным руководителем по стажировке Нам Ириной Ян Гуковной я познакомилась во время ее рабочей поездки в Киев за 2 года до стажировки.

Ирина Яновна, так ее называют ближайшие коллеги – удивительный человек. Это фонтан энергии, креативных научных идей и позитивных эмоций. Ирина Яновна у себя в университете – центр притяжения молодых дарований: она постоянно занята студентами и аспирантами, руководит курсовыми, дипломными и диссертационными работами, организует и проводит различные конкурсы и общественные мероприятия. Когда находишься рядом с ней, поневоле заражаешься ее жизнелюбием, целеустремленностью и оптимизмом. И конечно, во многом благодаря ей стала возможной моя стажировка в БГУ. Я очень хотела, чтобы прошла наша заявка в РФФИ, но я живу и работаю в Украине, подобного опыта раньше не имела и поэтому к возможности получения гранта относилась с известной долей скепсиса. Тем бо-

<sup>1</sup> Иванникова Наталья Станиславовна, ведущий инженер Национального ботанического сада им. Н.Н. Гришко НАН Украины, e-mail: ivannikov\_roman@rambler.ru.

лее была рада, когда узнала о позитивном решении РФФИ в отношении моей заявки.

Суть проблематики, над которой я работала в г. Брянске, сводится к следующему. Биотехнологическая лаборатория, в которой я работаю, была основана в 1974 г. одной из первых на Украине. Мои старшие коллеги, а теперь и я, уже много лет занимаемся размножением орхидных в условиях асептической культуры, изучаем особенности их биологии *in vitro*, очередность этапов онтогенеза.

За более чем 35 лет работы нашим коллективом получены очень интересные результаты касательно биологии этих загадочных растений, разработаны процедуры их культивирования *in vitro* и адаптации *ex vitro*. Лаборатория владеет банком стерильных культур тканей орхидных. Некоторые генотипы нашей коллекции находятся *in vitro* уже более 20 лет. В связи с этим, встал вопрос о тождественности генотипов растений, которые мы предаем после процедуры асептического размножения исходным растениям. Мы занимаемся размножением редких и исчезающих видов, поэтому стабильность генотипа размноженного нами растительного материала является для нас одной из задач первостепенной значимости (рис. 1). В работе не забываем и об орхидных умеренной зоны. Их в умеренном климате не так много, и почти все они требуют изучения и охраны. Многие виды встречаются как в Украине, так и в России. Исходя из выше изложенного, основной целью нашей работы, поддержанной грантом РФФИ № 10–04–90903, было освоение метода



**Рис. 1.** Рабочие будни. В лаборатории всегда много студентов и аспирантов Ирины Яновны. На заднем плане студентка Мария Князькина — безотказная помощница и очень хороший человек.

молекулярных маркеров для анализа самоклональной вариабельности в линиях ювенильных растений орхидных, которые длительное время культивируются *in vitro*.

Брянская область — уникальный с флористических позиций регион, расположенный у ряда важных природных и ботанико-географических границ. Это стало важным фактором, определившим высокий уровень его биоразнообразия. Однако многие виды растений региональной флоры находятся здесь на границах своих ареалов, поэтому являются уязвимыми и нуждаются в охране. То же можно сказать и о сопредельных украинских территориях. Глубокое антропогенное преобразование ландшафтов привело к уничтожению естественных мест обитаний многих редких видов покрытосеменных и существенному сокращению численности их популяций. Среди групп растений особенно нуждаются в охране, наиболее уязвимы высокоспециализированные виды семейства *Orchidaceae* Juss., имеющие сложный онтогенез и продолжительные циклы развития.

Семейство *Orchidaceae* в Брянской области представлено двумя подсемействами: циприпедиевые (*Cypripedioideae*) с трибой *Cypripedieae* и единственным родом *Cypripedium* — Венерин башмачок и орхидные (*Orchidoideae*), представленные четырьмя трибами: *Malaxideae*, *Neottieae*, *Arethuseae*, *Orchideae*. Всего во флоре Брянской области насчитывается 35 видов орхидных. Представители всех видов отнесены к редким и исчезающим.

На первом этапе работы было необходимо получить стерильные культуры тканей исследуемых видов и добиться их стабильного роста в условиях *in vitro*. На практике это оказывается непростой задачей, особенно для видов умеренной зоны. Однако нам удалось получить положительные стойкие результаты для подавляющего большинства видов, с которыми мы работали. Большая часть этих работ была проведена предварительно на базе лаборатории биотехнологии НБС (г. Киев, Украина). На рис. 2 вы можете видеть ювенильные растения *Anacamptis morio* (L.) Bateman, Pridgeon & Chase и *Platanthera bifolia* (L.), которые уже можно высаживать в септические условия.

Ключевым этапом работы является введение в культуру *in vitro* эксплантов, выделенных из тех немногих экземпляров краснокнижных растений, которые имелись в нашем распоря-

жении. Сложность этого этапа заключается в том, что для введения в культуру можно использовать ограниченное количество растительного материала, который, как правило, сильно инфицирован грибами и бактериями. В ходе проведенных работ мы пришли к выводу, что на этапе введения, с методической точки зрения, лучше всего использовать семенной материал растений. Кроме того, используя семена, мы не наносим вред популяциям, насчитывающим иногда всего до десятка особей, не уничтожаем коллекционные экземпляры (количество которых, как правило, ограничено) и получаем *in vitro* гетерогенные группы растений.

Стерилизацию семян проводили по следующей схеме: thimerosal (0,01 %) – 20 мин.; H<sub>2</sub>O – 10 мин.; H<sub>2</sub>O – 10 мин.; хлоракс (10 %) – 10 мин.; H<sub>2</sub>O – 10 мин.; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – 9 мин.; H<sub>2</sub>O – 11 мин. Семена проращивали в колбах Эрленмейера (250 мл) на агаризированной среде Мурашиге–Скуга. Посевы содержали в культуральном помещении при температуре 25–28 °С, влажности 70 %, в темной комнате. После появления признаков прорастания колбы выносили в световую. В дальнейшем растения культивировали на средах, основами которых являлись прописи Мурашиге–Скуга. Для анализа на предмет наличия генетических изменений использовали клонированные линии растений, которые изначально были получены от одного экземпляра в условиях культуры *in vitro*.

На следующих этапах работы необходимо было освоить процедуру выделения ДНК из растительного материала, полученного *in vitro*, и подобрать группу праймеров, которая была бы пригодна для анализа геномов, задействованных в работе видов орхидных. Следует сказать, что молекулярно-генетическое маркирование на основе ДНК-маркеров с помощью ISSR-PCR и RAPD-PCR на сегодня является наиболее современным и информативным подходом для изучения самоклональной вариабельности, генетического полиморфизма как внутри групп растений одного вида, так и между различными таксонами в семействе. Эти и другие методы генетического анализа с успехом применяются для выяснения самых разных вопросов, связанных с биологией орхидных.

Так, для изучения многих видов как дикорастущих, так и декоративных орхидных с успехом применяются протоколы RAPD-PCR, PCR-RFLP и метод изоферментного анализа.

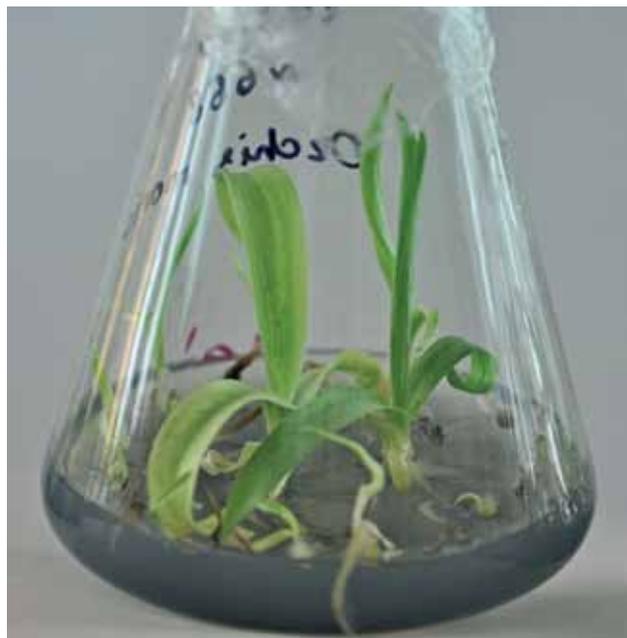


Рис. 2. Сеянцы анакамписиса (*Anacamptis morio* (L.) Bateman, Pridgeon & Chase.).

Есть данные по использованию для аналитических исследований ДНК хлоропластного и митохондриального геномов орхидных [3,5].

Методы PCR применяются для выяснения генетической структуры, установления уровня генетического разнообразия и родства между близкими таксонами. Одним из важных вопросов является образование природных межвидовых гибридов между представителями различных видов произрастающих на одной небольшой территории. Дикорастущая орхидея *Spiranthes diluvialis* (2n = 74) распространена в Центральной и Западной частях США. Данная орхидея предположительно является гибридом между представителями двух видов: *S. magnicamporum* (2n = 30) и *S. romanzoffiana* (2n = 44). Анализ рибосомальной ДНК подтвердил гибридное происхождение *S. diluvialis*. По результатам исследования хлоропластной и митохондриальной ДНК стало очевидным происхождение *S. diluvialis* от материнского вида *S. romanzoffiana*. В ходе исследований с помощью протоколов PCR был также установлен низкий уровень внутри- и межпопуляционного полиморфизма в популяциях *Spiranthes diluvialis* [1].

В другом случае было изучено с помощью RAPD и RFLP-PCR 154 образца *Platanthera aquilonis* и *P. dilatata*, взятых из штата Мэн (США). В работе использовали праймеры производства Operon Biotechnologies, Huntsville (Alabama, USA). Из 62 RAPD праймеров было

отобрано 4 10-членных праймера (ОРА20, ОРС02, ОРХ04, ОРХ06), показывающих наибольшее число достоверных и полиморфных полос. В результате проведенных работ оказалось, что межвидовые гибриды у этих видов образуются редко, а генетическое разнообразие выше у опыляемой насекомыми *P. dilatata*, чем у самоопыляющейся *P. aquilonis*, хотя этот вид был более многочислен [8].

PCR-AFLP анализ был использован при изучении представителей рода Пальчатокоренник (*Dactylorhiza*) на территории северной Европы (Швеция, Британские острова). Было установлено, что между представителями *D. incarnata* и *D. maculata* в природе могут образовываться гибриды. При этом группа *D. maculata* на исследуемых территориях состояла из двух самостоятельных подвидов: *D. maculata* sub. *Maculata* (тетраплоид) и *D. maculata* sub. *fuchsii* (диплоид) [4].

Не так давно начаты работы по использованию методов молекулярной систематики при изучении эволюционных процессов и для выяснения происхождения той или иной груп-

пы орхидных, к примеру, трибы Вандовых (*Vandaeae*), семейства *Orchidaceae* [2].

Для внесения точности в спорные вопросы классификации орхидных исследователями применяется также метод изоферментного анализа. Так, на основании полученных данных, было обосновано выделение *Cypripedium kentuckiense* в отдельный вид, хотя ранее его предполагалось рассматривать как *Cypripedium parviflorum* var. *Pubescens* [6]. Метод изоферментного анализа был применен при изучении эпифитной орхидеи *Laelia speciosa*, узкоареального эндема, спорадически встречающегося на территории Мексики. В ходе работ было установлено, что между популяциями наблюдается невысокий уровень генетической дифференциации, но прослеживается четкая зависимость генетической структуры популяции от географической ее приуроченности [7].

Таким образом, семейство *Orchidaceae* представляет собой чрезвычайно интересный, до сих пор малоизученный, притягательный объект для разностороннего изучения (рис. 3). Необходимо уточнить, что только комплексный



Рис. 3. Лелия Гульда (*Laelia gouldiana* Rchb.f.) – один из видов тропических орхидных коллекции НБС.

подход (сочетание традиционных и инновационных методов) к познанию вопроса позволяет наиболее полно и достоверно осветить различные аспекты данной проблемы. В ряде случаев данные молекулярного анализа совпадают с анатомо-морфологическими признаками, но часто они противоречат друг другу. Это возможно из-за неполноты выборок, подвергнутых анализу, несовершенству применяемых протоколов анализа, морфологической изменчивости видов.

В связи с вышеизложенным понятно, что для успешного решения стоящего перед нами задания было необходимо подобрать систему генетических маркеров, характерных для разных видов семейства *Orchidaceae*, что было возможным только при использовании в работе большого количества видов орхидей, в том числе, тропических и субтропических из коллекции НБС.

Конечно, решение подобного рода задач было бы невозможным без прекрасно укомплектованной лаборатории ИННО-центра биотехнологии и экологии БГУ. Во время стажировки нами был освоен целый ряд новых методик и проведено знакомство и работы с использованием прибора для ПЦР в реальном времени АНТ-32, электропораторов, ДНК-амплификаторов «Терцик», «Ампли 4», транскриптора фирмы «БиоРад», прибора для регистрации результатов электрофореза ДНК «Гель-Док» фирмы «БиоРад», оборудования для электрофореза: «Multifor» LKB, камер горизонтального и вертикального электрофореза и целого комплекса вспомогательного оборудования.

В своей работе мы остановили выбор на ISSR (Inter-simple-sequence-repeats) маркерах. Этот особый класс ДНК-маркеров основан на использовании праймеров, имеющих множественную локализацию в геноме. Это может быть достигнуто при использовании праймеров, комплементарных к повторяющимся элементам генома, таким как микросателлиты.

Для создания ISSR-маркеров используют праймеры, комплементарные микросателлитным повторам (4–12 единицам повтора) и несущие на одном из концов последовательность из одного-двух произвольных нуклеотидов (так называемый «якорь»). Такие праймеры позволяют амплифицировать фрагменты ДНК, которые находятся между двумя достаточно близко расположенными микросателлитными

последовательностями (как правило, это уникальная ДНК). В результате амплифицируется большое число фрагментов, представленных на электрофореграмме дискретными полосами. Полученные паттерны ПЦР-продуктов видоспецифичны. ISSR-маркеры также относятся к маркерам доминантного типа наследования, полиморфизм которых тестируется по наличию/отсутствию полосы. Для создания ISSR-маркеров не требуется предварительного знания нуклеотидной последовательности исследуемой ДНК. Метод обладает хорошей воспроизводимостью и может быть с успехом использован для выявления межвидовой и внутривидовой генетической изменчивости, идентификации видов, популяций, линий, а в ряде случаев и для индивидуального генотипирования. ISSR-маркеры могут быть использованы также для картирования геномов и маркирования хозяйственно-полезных признаков.

Для выделения ДНК из растительного материала мы брали навеску сырой ткани от 0,10 до 0,11 г. Методика, основанная на использовании СТАВ, позволяет получить достаточно чистую ДНК, пригодную для дальнейшего ее использования в полимеразно-цепной реакции (ПЦР) только в том случае, когда для измельчения растительного материала мы использовали жидкий азот. Концентрацию и чистоту получаемой ДНК измеряли на спектрофотометре, расчет проводился исходя из коэффициента разбавления и соотношения: 1 оптическая единица при длине волны 260 нм = 50 мкг ДНК/мл. Для чистой ДНК отношение длин волн 260/280 и 260/230 более 1,5 (стремится к 2). В нашей работе значение варьировало от 1,25 до 1,4. Для более полной уверенности в качестве получаемой ДНК была проведена ее дополнительная очистка с использованием стандартного набора. Результаты ПЦР по данным электрофореза не отличались от таковых без проведения дополнительной очистки матрицы. Таким образом, в дальнейшей работе мы ограничились выделением ДНК без дополнительной очистки.

В ходе работы по молекулярно-генетическому анализу представителей семейства Орхидные было протестировано 30 праймеров. Отбирая праймеры на пригодность для использования в дальнейших исследованиях, мы обращали внимание на то, сколько полиморфных полос дает тот или иной олигонуклеотид. Нами отмечены случаи, когда праймер давал много полос, но среди них не было полиморф-

ных. Такие праймеры исключались из дальнейших исследований. С некоторыми праймерами ПЦР не проходила, о чем свидетельствовало отсутствие полос на фореze. В конечном итоге в результате проведенного скрининга для дальнейшей работы было отобрано порядка 18 праймеров, которые далее будут использованы в наших исследованиях.

Таким образом, во время прохождения стажировки я освоила новый для себя метод исследования, основанный на молекулярных технологиях. Знакомство с методом ПЦР оказалось новой и захватывающей областью исследований, не менее (а может быть и более) для меня интересной, чем разработка методов клонирования и исследования онтогенеза орхидных *in vitro*. В дальнейшем нам хотелось бы наладить исследования с помощью освоенных методов в нашей организации, поскольку актуальность подобных работ в ботанических садах не подлежит сомнению.

В заключение хотелось бы сказать, что конечно, одного метода ПЦР недостаточно для полного и разностороннего анализа генома растений, поэтому в планах нашей работы комбинировать разные подходы к выполнению поставленных задач. Дальнейшие исследования по выявлению самоклональной вариабельности среди ювенильных растений орхидных в асептической культуре будут основываться на продолжении подбора условий ПЦР, тестировании новых групп праймеров. На наш взгляд, перспективно изучить варианты генов, ответственных за проявление морфологических или биохимических признаков, имеющих систематическое или практическое значение. Однако это следующий этап работ, который, я надеюсь, нам удастся осилить вместе с коллегами из лаборатории ИННО-центра биотехнологии и экологии БГУ.

#### Литература

1. Allen L. Origin and conservation genetics of the threatened ute ladies'-tresses, *spiranthes diluvialis* (Orchidaceae). // American Journal of Botany. – 2001. – 88(1). – p. 177–180.
2. Barbara S. Molecular phylogenetics of Vandeeae (Orchidaceae) and the evolution of Leaflessness. // American Journal of Botany. – 2006. – 93(5). – p. 770–786.
3. Freudenstein J. V. An expanded plastid DNA phylogeny of Orchidaceae and analysis of jackknife branch support strategy. // American Journal of Botany. – 2004. – 91(1). – p. 149–157.
4. Hedren M. Amplified fragment length polymorphisms (AFLP) reveal details of polyploid evolution in *Dactylorhiza* (Orchidaceae). // American Journal of Botany. – 2001. – 88(10). – p. 1868–1880.
5. Kores P. J. A Phylogenetic analysis of Diurideae (Orchidaceae) based on plastid DNA sequence data. // American Journal of Botany. – 2001. – 88(10). – p. 1903–1914.
6. Martha A. Conservation genetics and taxonomic status of the rare Kentucky Lady's Slipper: *Cypripedium kentuckiense* (Orchidaceae). // American Journal of Botany. – 1998. – 85(12). – p. 1779–1786.
7. Vila-Diaz I. A., Oyama K. Conservation genetics of an endemic and endangered epiphytic *Laelia speciosa* (Orchidaceae). // American Journal of Botany. – 2007. – 94(2). – p. 184–193.
8. Wallace L. E. Spatial genetic structure and frequency of interspecific hybridization in *Platanthera aquilonis* and *P. dilatata* (Orchidaceae) occurring in sympatry. // American Journal of Botany. – 2006. – 93(7). – p. 1001–1009.

Объем 164 стр.

Тираж 40 экз.

Подписано в печать 28.06.2012

Оригинал-макет подготовлен ЗАО «ИТЦ МОЛНЕТ»

123104, г. Москва, Малый Палашевский пер., д. 6

Тел.: (495) 745 9839, факс: (495) 745 9836

e-mail: [info@molnet.ru](mailto:info@molnet.ru)

Отпечатано в ООО «ПОЛИГРАФ-ПЛЮС»

117209, г. Москва, ул. Керченская, дом 6, корп. 1,

Тел.: (499) 408 0116