



# Вестник Российского фонда фундаментальных исследований

№ 2 (94) апрель-июнь 2017 года

**Основан в 1994 году**

Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, рег. № 012620 от 03.06.1994

Сетевая версия зарегистрирована Роскомнадзором, рег. № ФС77-61404 от 10.04.2015

## Учредитель

**Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Российский фонд фундаментальных исследований»**

Главный редактор В.Я. Панченко,  
заместители главного редактора В.В. Квардаков и В.Н. Фридлянов

**Редакционная коллегия:**

В.П. Анаников, В.Б. Бетелин, К.Е. Дегтярев, И.Л. Еременко,  
В.П. Кандидов, П.К. Кашкаров, В.П. Матвеенко, Е.И. Моисеев,  
А.С. Сигов, В.А. Ткачук, Р.В. Петров, И.Б. Федоров,  
Д.Р. Хохлов, В.А. Шахнов

**Редакция:**

А.П. Симакова, Е.Б. Дубкова, Н.В. Круковская

**Адрес редакции:**

119334, г. Москва, Ленинский проспект, 32а

Тел.: (499) 995-16-05

e-mail: [pressa@rfbr.ru](mailto:pressa@rfbr.ru)



# Russian Foundation for Basic Research Journal

N 2 (94) April-June 2017

**Founded in 1994**

Registered by the Committee of the Russian Federation for Printed Media, 012620 of 03.06.1994 (print)

Registered by the Roskomnadzor FS77-61404 of 10.04.2015 (online)

**The Founder  
Federal State Institution  
“Russian Foundation for Basic Research”**

Editor-in-Chief V. Panchenko,  
Deputies chief editor V. Kvardakov and V. Fridlyanov

**Editorial Board:**

V. Ananikov, V. Betelin, K. Degtyarev, I. Eremenko,  
V. Kandidov, P. Kashkarov, V. Matveenko, E. Moiseev,  
A. Sigov, V. Tkachuk, R. Petrov, I. Fedorov,  
D. Khokhlov, V. Shakhnov

**Editorial staff:**

A. Simakova, E. Dubkova, N. Krukovskaya

**Editorial address:**

32a, Leninskiy Ave., Moscow, 119334, Russia

Tel.: (499) 995-16-05

e-mail: [pressa@rfbr.ru](mailto:pressa@rfbr.ru)

<b>Предисловие .....</b>	<b>2</b>
<i>В.Я. Панченко</i>	
<b>Message .....</b>	<b>3</b>
<i>H.E. Mr. Pankaj Saran</i>	
<b>Foreword .....</b>	<b>4</b>
<i>Ashutosh Sharma</i>	
<b>Предисловие к тематическому номеру «Вестника РФФИ» .....</b>	<b>5</b>
<i>Н.Э. Нифантьев</i>	
<b>10 лет сотрудничества Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента науки и технологий: какое будущее сулят итоги?.....</b>	<b>6</b>
<i>А.Н. Шаров</i>	
<b>Компьютеры и электроника .....</b>	<b>10</b>
<i>В.А. Гуцин</i>	
<b>Совместные исследования транзиентных явлений в солнечной атмосфере .....</b>	<b>15</b>
<i>Б.П. Филиппов</i>	
<b>Плазмонные наноструктуры, содержащие магнитные и полупроводниковые материалы, для нанофотоники .....</b>	<b>23</b>
<i>В.И. Белотелов</i>	
<b>О сотрудничестве с индийскими учеными.....</b>	<b>26</b>
<i>Б.А. Аронзон</i>	
<b>Исследование высокоэнергичных космических взрывов в рамках российско-индийского научного сотрудничества Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента науки и технологий в 2008–2013 гг. ....</b>	<b>29</b>
<i>В.В. Соколов, Ш.Б. Пандей</i>	
<b>Исследования молекулярного, нейтрального атомарного и ионизованного газов в областях звездообразования .....</b>	<b>42</b>
<i>И.И. Зинченко, А.В. Лапинов, Л.Е. Пирогов, П.М. Землянуха, Н.Д. Лебедев, Д.К. Оджха, С.К. Гхоси, К.К. Маллик</i>	
<b>Программа российско-индийского сотрудничества по комплексам соединений палладия и платины с халькогенатными производными карборанов.....</b>	<b>49</b>
<i>В.И. Брегадзе, В.К. Джейн</i>	
<b>Наночастицы металлов в полимерной матрице как прекурсоры сенсорных материалов... .</b>	<b>56</b>
<i>А.Д. Помогайло, Г.И. Джардималиева, Б.Ч. Ядав, П. Тандон</i>	
<b>Российско-индийское сотрудничество в области гликонаук при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента науки и технологий .....</b>	<b>62</b>
<i>Н.Е. Устюжанина, Р.К. Саксена, С. Саран, А.И. Усов, М.И. Билан, М.Л. Генинг, П. Талукдар, Д.В. Титов, Ю.Е. Цветков, Д.Е. Цветков, Р. Кумар, В.К. Варини, К.Н. Ганеш, Н.Э. Нифантьев</i>	
<b>Совместные российско-индийские проекты по исследованию производных желчных кислот и реакциям, катализируемым наночастицами палладия.....</b>	<b>70</b>
<i>Н.В. Лукашев, Д.А. Ерзунов, У. Майтра, Б.Н. Тхома, Р.К. Шарма, А.В. Казанцев, Г.Н. Бондаренко, О.Г. Ганина, И.П. Белецкая</i>	
<b>10 лет сотрудничества Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента науки и технологий в области системной биологии .....</b>	<b>74</b>
<i>В.Ю. Макеев</i>	
<b>Взаимовыгодное сотрудничество ученых России и Индии – основа успешного развития науки ..</b>	<b>78</b>
<i>С.И. Аллахвердиев, А. Джаджу</i>	
<b>Большое видится на расстояни: цикл российско-индийских проектов в области компьютерного зрения.....</b>	<b>88</b>
<i>Л.М. Местецкий, А.И. Майсурадзе, Н.Ф. Дышкант</i>	



## ПРЕДИСЛОВИЕ



Индия занимает особое место в международных связях России, унаследованных от бывшего СССР и получивших дальнейшее развитие после 1991 г. Такое же отношение к индийскому направлению у вовлеченных в осуществление этих связей российских организаций, в том числе у Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), если идет речь о сфере научного сотрудничества. Совет фонда понимает и уделяет этому направлению первостепенное внимание.

Чтобы быть на уровне стратегического партнерства, достигнутого между Россией и Индией, необходимо не только поддерживать исследовательские инициативы ученых двух стран, но и искать возможности направления таких инициатив в нужное обоим государствам русло, возможности внедрения новых форм взаимодействия не только между отдельными учеными и их коллективами, но и на уровне национальных институтов и организаций, оказывающ их поддержку совместным исследованиям, а также осуществляющим такие исследования.

Собранные в настоящем издании материалы призваны показать, как вышесказанное осуществляется на деле — в области российско-индийского научного сотрудничества последние годы при непосредственном участии и партнерстве РФФИ и Департамента науки и технологий (ДНТ) Правительства Индии. Наверное, не все стороны и примеры этого сотрудничества освещены достаточно полно, больше внимания следовало бы уделить сохраняющимся «узким местам» в нашем взаимодействии с ДНТ, тому, что у нас пока не получается, препятствиям на пути повышения эффективности нашего сотрудничества.

Данное издание, на наш взгляд, демонстрирует системную картину состояния российско-индийских научных связей, обеспечиваемых партнерством РФФИ и ДНТ. Оба партнера заинтересованы в том, чтобы научные связи с их участием развивались как на двусторонней, так и на многосторонней основе, в рамках международных организаций и инициатив (БРИКС, ШОС, ЕАПИ).

Считаю необходимым выразить искреннюю благодарность авторам данного сборника: как российским, так и индийским, — за представленные статьи и вклад каждого из них в выпуск этого юбилейного издания.

*Председатель Совета РФФИ академик В.Я. Панченко*



3 мая 2017

## MESSAGE



The India-Russia scientific relationship has a long history which dates back to the Soviet era. Over the decades, India and Russia have worked together to solve various societal problems through scientific discoveries. Both our Governments are engaged in efforts to increase research and development in priority areas of basic and applied sciences.

I warmly welcome the compilation of articles brought out by the Russian Federation for Basic Research dedicated to the tenth anniversary of cooperation between the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) and Department of Science and Technology of India (DST) and also dedicated to the 70th anniversary of establishment of diplomatic relations between India and Russia. The articles showcase the successful partnership that the two sides have developed over the last ten years.

I congratulate both organizations for their strenuous efforts that have brought together talented scientists, academicians and experts. They are now actively engaged in joint projects that have resulted in significant outcomes in recent years. Two bilateral programmes – in Basic and Exploratory Scientific Research and in Multidisciplinary Research – have helped to intensify scientific cooperation across the full spectrum of research areas and created an active network of research institutions in both countries. Over ninety percent of all bilateral projects have been implemented through partnership between DST and RFBR in these past ten years.

I am glad that the tenth Anniversary of the DST-RFBR relationship is being commemorated through a jubilee conference with the theme “Advancing the future of scientific partnership”. This conference is an excellent opportunity to connect researchers from India and Russia, strengthen ties between our scientific communities and identify fresh areas of cooperation in cutting edge technologies and sectors. Today, India has a highly advanced science and technology sector, and massive development plans. I am sure modern day realities will open opportunities for greater cooperation between India and Russia.

I extend my warm greetings to Indian and Russian scientists and wish them all success in strengthening collaboration with each other.

Ambassador of India to Russia

H.E. Mr. Pankaj Saran



## FOREWORD



Science and Technology cooperation between India and the Russian Federation has been one of the important pillars of our long standing and time tested bilateral relationship. The vibrant partnership in science and technology has created a win-win situation which is driven by a sense of confidence and purpose in achieving together. This deepening relationship has enabled the free confluence of researchers across disciplines and institutions both from academia and research laboratories. The principles of collaborative advantage, reciprocity and mutual trust are the hall mark of the India-Russia S&T relationship.

With the sunset of the Integrated Long Term Programme (ILTP) with the Russian Academy of Sciences, the birth of the Department of Science & Technology (DST), India and the Russian Federation of Basic Research (RFBR) programme on Basic Sciences took place in 2007. The initial few years of DST-RFBR partnership was a modest one, competing with the footprint left by the ILTP. However, the DST-RFBR programme emerged steadily and today it provides one of the robust platforms for bilateral scientific cooperation in Basic Sciences. It has given access to Indian scientists to work with the entire spectrum of Russian academic and scientific institutions in pursuing front ranking curiosity driven fundamental research of international standards.

The first call under DST-RFBR programme was awarded in 2008. In last ten years, DST and RFBR have jointly supported 254 research projects out of 870 project proposals received against the — calls. The rigour of the programme is reflected by an average success rate of about 25%. In terms of scientific areas, projects have been supported across the fields of basic sciences covering Physics & Astronomy (69 projects), Chemistry & Material Sciences (55 projects), Biology & Medical Sciences (34 projects), Earth Sciences (32 projects), Mathematics (27 projects), Engineering Sciences (23 projects) and Computer Sciences and Telecommunications (14 projects). Around 800 research publications have emerged from these projects, averaging 2.1 publications per project.

Last year a new element of inter-disciplinary research was added to the programme. Against the maiden call, 52 proposals were received out of which 17 were selected for joint implementation. This will further unfold new opportunities in our bilateral cooperation. In times to come, we shall measure the impact also.

I am happy to note that DST and RFBR partnership has successfully achieved the first major milestone of ten years of working together in building and promoting new networks and partnerships. This has certainly helped to harness the power of collaborative advantage and provided value to our strategic relationship. I am confident that in years to come this partnership will continue to grow by promoting ‘high quality’ and ‘high impact’ research.

*Secretary of the Department of Science and Technology of the Government of India Ashutosh Sharma*



## Предисловие к тематическому номеру «Вестника РФФИ»



Данный номер журнала «Вестник Российского фонда фундаментальных исследований» посвящен 10-летию сотрудничества РФФИ и ДНТ. Начатая в 2007 году российско-индийская грантовая инициатива, динамично развивалась и расширялась по формам и стала сегодня одной из наиболее крупных среди программ двустороннего сотрудничества в деятельности РФФИ. Особо важным является и то, что объем и тематическое разнообразие сотрудничества с учеными Индии, которое поддерживает РФФИ, превышает даже аналогичные программы, поддерживаемые сегодня Министерством науки и образования РФ и другими отечественными организациями-грантодателями. РФФИ и ДНТ в какой-то мере оказались приемниками и продолжателями российско-индийской Комплексной долгосрочной программы научно-технологического сотрудничества, организация которой претерпела значительные изменения в конце 90-х годов и в особенности в 2013 году в результате реформы Российской академии наук.

В результате 10-летнего сотрудничества РФФИ и ДНТ уже поддержано около 250 интересных двусторонних проектов, в которых с российской стороны приняло участие более 1500 исследователей. Конкурсный «накал» по программе РФФИ-ДНТ всегда никак не меньше конкуренции на получение грантов по внутрироссийским конкурсам РФФИ. Тематическое разнообразие поддержанных проектов по программе РФФИ-ДНТ очень широко и отвечает всем исследовательским направлениям тематического классификатора РФФИ. Для данного номера журнала были отобраны сообщения о двусторонних исследованиях в разных научных областях, которые представляют картину совместных российско-индийских фундаментальных исследовательских проектов. Значительная часть этих работ посвящена исследованиям в области физики и смежных направлений, включая астрофизику и геофизику, химию и науки о материалах, биологию и медицину, математику и компьютерных исследований. Представленные в данном номере статьи наглядно иллюстрируют прекрасные результаты проведенных исследований и общий высокий уровень проводившихся российско-индийских исследований. Многие из проектов, о которых рассказано в статьях ниже, не оказались лишь эпизодическими исследованиями, а инициировали продолжительные совместные работы в своих областях. В этом видится особое значение программы грантов РФФИ-ДНТ.

Н.Э. Нифантьев,

член-корреспондент РАН, Координатор российско-индийской Комплексной долгосрочной программы научно-технологического сотрудничества, ответственный редактор выпуска



## 10 лет сотрудничества Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента науки и технологий: какое будущее сулят итоги?

А.Н. Шаров

Усилия РФФИ по стимулированию сотрудничества российских исследователей с учеными из наиболее продвинутых в научном отношении стран не могли обойти вниманием такую страну, как Индия, стремительно развивающую свой научный потенциал наряду с потенциалом производственным. За последние 10 лет Индия увеличила расходы на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (по паритету покупательной способности) более чем в шесть раз, выйдя по этому показателю на шестое место в мире. С 2009 г. она входит в первую десятку стран по числу научных публикаций, измеряемому по базе данных Scopus.

Ввиду отсутствия в Индии единого фонда финансирования научно-технического развития партнером РФФИ в этой стране стала профильная правительственная организация — Департамент науки и технологий (ДНТ) — имеющая право официально представлять Индию в вопросах международного научного сотрудничества. В августе 2007 г. между РФФИ и ДНТ было подписано соглашение, которое открыло возможность ученым двух стран получать поддержку в форме научного гранта для инициируемых ими совместных фундаментальных исследований в рамках двухгодичных проектов.

Отбор таких так называемых «инициативных» (*bottom up*) проектов согласно общепринятой международной практике осуществлялся на конкурсной основе ежегодно по результатам их двусторонней экспертизы участниками соглашения. С 2008 г., когда стали проводиться такие конкурсы, поступило в общей сложности более 1000 заявок, рекордным числом которых

был отмечен конкурс 2016 г. — 171 заявка! Это свидетельствует о неснижаемом и даже возрастающем интересе ученых двух стран к сотрудничеству на условиях указанного конкурса.

За 10-летний период сотрудничества РФФИ и ДНТ было поддержано 254 российско-индийских исследовательских проекта, что при сопоставлении с числом поданных при этом заявок выводит средний коэффициент их успешного прохождения на уровень 29%, хотя в отдельные годы он довольно сильно колебался: был максимально высоким в 2009 и 2015 г. (38% и 39% соответственно) и заметно ниже среднего в 2014 и 2017 г. (соответственно 20% и 24%). Не менее 1500 российских участников двусторонних проектов воспользовались за это десятилетие грантами РФФИ, закономерно подтверждая тем самым давно сложившуюся широкую популярность индийского направления международного научного сотрудничества России. Для ДНТ, имеющего достаточно большое число зарубежных партнеров, в том числе в США, Германии, Франции, Великобритании, Японии, Р. Корея, совместная с РФФИ поддержка исследований весьма значима,



**ШАРОВ  
Александр Николаевич**  
начальник  
Информационно-аналитического  
отдела РФФИ



так как на них в 2015–2016 г. приходилась четверть от общего числа международных проектов, профинансированных ДНТ.

Хотя соглашение между РФФИ и ДНТ охватывает все основные области естественнонаучных исследований, при сравнении числа поддержанных проектов в каждой из этих областей можно отметить предпочтение, отдаваемое участниками проектов отдельным из них. К таковым в наибольшей мере относятся «Физика и астрономия», а также «Химия и науки о материалах», на которые приходится почти половина (49%) поддержанных российско-индийских проектов. Другая половина проектов пришлась на остальные пять областей («Математика», «Биология и медицина», «Науки о Земле», «Основы инженерных наук» и «Компьютеры и информационно-коммуникационные технологии»).

Интерес представляет также принадлежность грантополучателей РФФИ к основным типам исследовательских организаций России. Так, 61% из них являлись сотрудниками институтов системы РАН, 33% — университетские ученые и 6% — из числа сотрудников других научных учреждений. С индийской стороны примерно в равной степени представлены как чисто исследовательские центры и организации, так и университеты.

Измеряемые публикационной активностью и качеством публикаций научные результаты совместных исследований, финансируемых РФФИ и ДНТ, довольно противоречивы. Анализ 142 итоговых отчетов, поданных в 2011 — 2016 гг. в РФФИ российскими участниками законченных

проектов, показывает довольно впечатительную цифру (более 1200) общего числа публикаций и в среднем на проект (более восьми), из них чуть более двух совместных публикаций (подготовленных российскими и индийскими участниками). Вместе с тем 9% законченных проектов при подаче итоговых отчетов совместных публикаций не имели вообще, а средний показатель востребованности подготовленных публикаций, учитывая престижность и авторитетность научных изданий, где они были размещены (их импакт-фактор), не превышал в среднем 2.2 в системе Web of Science. В этой связи требуются меры стимулирования роста качества публикаций и исключения регулярной практики, когда за два года сотрудничества исследователей России и Индии в рамках проекта ими не опубликовано ни одной совместной статьи!

В 2015 г. была достигнута договоренность о дополнительной программе сотрудничества между РФФИ и ДНТ, предусматривающей поддержку тематических исследований междисциплинарного характера, что отвечало сложившейся национальной и международной практикам выделения подобного рода исследований как соответствующих проводимой научной политике и определенным научным приоритетам (так называемый подход “top down”). По взаимной договоренности были определены восемь тем таких исследований, положенных в основу прошедшего в 2016 г. pilotного конкурса, по итогам которого были отобраны 17 проектов, в том числе шесть — в рамках темы «Материалы для использования в энергетике», четыре — по теме «Фундаментальные основы механики деформаций и разрушений», три — по теме «Хранение энергии», два — по теме «Основы ядерной технологии» и два — по теме «Высокопроизводительные вычисления и большие базы данных». Таким образом, сделан первый шаг в приближении поддерживаемых РФФИ и ДНТ российско-индийских фундаментальных исследований к совпадающим интересам и «потребностям» обеих стран, называемых национальными научными приоритетами. Он призван повысить эффективность сотрудничества на уровне отдельных коллективов исследователей, которым оставлена достаточно широкая



возможность инициировать исследовательские проекты в русле определенных тем и областей (то, что в международной практике называется сочетанием “bottom up” и “top down”).

Сложившись на двусторонней основе, сотрудничество РФФИ и ДНТ получило в последние годы хорошую перспективу развиваться в формате параллельного участия в международных многосторонних программах и проектах. Реально это стало впервые возможным благодаря принятой в 2015 г. рамочной программе по научному, технологическому и инновационному сотрудничеству стран БРИКС. По договоренности между участвующими в ней национальными агентствами этих стран, финансирующими научные исследования, в том числе РФФИ и ДНТ, в 2016 г. был проведен пилотный конкурс многосторонних проектов междисциплинарных исследований по 10 согласованным тематикам, на который поступило более 100 заявок с участием индийских и российских исследователей. Такое число гарантирует существенные масштабы их совместной работы и ее поддержки со стороны РФФИ и ДНТ в рамках трехлетних проектов, подлежащих утверждению по итогам конкурса.

Другими такими же форматами могут стать участие ДНТ в Евразийской Ассоциации поддержки научных исследований (ЕАПИ), учрежденной в июле 2016 г. по инициативе РФФИ, а также реальная возможность участия РФФИ и ДНТ в готовящейся программе научного сотрудничества в рамках Шанхайской организации сотрудничества (ШОС), куда Индия вступила в 2016 г.

Не подвергая сомнению достоинства сложившегося плодотворного сотрудничества с ДНТ, в РФФИ не отказываются от возможности расширить круг партнеров в этой стране, отводя взаимодействию с ними отдельное место, не пересекающееся с полномочиями ДНТ. Число таких партнеров начало расти с подписанием в декабре 2015 г. соглашения РФФИ с Индийским Советом по медицинским исследованиям — одной из старейших научных организаций Индии, созданной в начале прошлого века и успешно курирующей медицинскую науку в стране с населением более 1 млрд человек. Большой интерес представляет имеющаяся у РФФИ с недавних пор возможность оказания поддержки проведения совместных обществен-

но-гуманитарных исследований, координацией и финансированием которых в Индии занимаются разные государственные организации. Наконец, внимания РФФИ заслуживает тесно сотрудничающий с ДНТ в организации и поддержке междисциплинарных исследований и отвечающий профилю научного фонда индийский Совет по научным и инженерным исследованиям (Science and Engineering Research Board — SERB). Первый опыт взаимодействия с ним получен в ходе подготовки и проведения в Дели в мае 2016 г. годового собрания Глобального исследовательского совета (GRC), на котором SERB выступил в качестве хозяина мероприятия.

Какие бы коллaborации не складывались в Индии у РФФИ, ДНТ остается основным партнером фонда в этой стране и по праву остается таковым для ДНТ в России. Как известно, помимо РФФИ-ДНТ сотрудничает с российским Министерством образования и науки (совместно поддерживают около полутора десятка проектов в области прикладных исследований) и с Российским научным фондом (РНФ) (в поддержке фундаментальных исследований, отобрав семь совместных проектов по итогам конкурса, впервые проведенного с РНФ в 2016 г.) Имея несопоставимо более продолжительную историю и масштабы сотрудничества, РФФИ и ДНТ должны, тем не менее, взаимно учитывать многовекторность деятельности партнера и договариваться о том, как ее сочетать со своим двусторонним взаимодействием.

Успех и наполнение партнерских связей РФФИ и ДНТ в дальнейшем зависят от того, как стороны настроены развивать их



с достигнутого уровня и с учетом открывающихся новых направлений и областей. К последним относятся поддержка фундаментальных исследований с использованием уникальных объектов инфраструктуры класса мегасайнс, уже имеющихся и создаваемых в стране партнера, налаживание сотрудничества молодых ученых двух стран, повышение публикационной активности россий-

ско-индийских исследовательских команд, налаживание сотрудничества в области научной экспертизы, в том числе с целью организации выпуска совместных научных изданий.

Высокие цели стратегического партнерства России и Индии обеспечивают самые широкие перспективы для сотрудничества двух стран, необъятное поле научного взаимодействия, ключевыми «двигателями» которого по праву считаются РФФИ и ДНТ. Партнерам предстоит многое сделать, чтобы оставаться лидерами российско-индийского научного сотрудничества.

## Summary

The main reason for the RFBR entering into the partnership with the Department of Science and Technology (DST), Government of India, ten years ago has been proved by India's fast advancement in the field of scientific research supported by vast funds spent on it. Since then the RFBR and DST jointly funded more than 270 Russian-Indian bottom-up research projects in different fields of natural sciences, mostly in physics and chemistry.

More than 1500 Russian researchers participated in the above mentioned collaborations headed by the principal investigators representing institutes of the Russian Academy of Sciences (RAS) (61%), universities (33%) and other research organizations. Their publication activity was quite high during last years marked with about 8 publications per every finished project on the average, including two joint publications.

It was decided by two sides in 2015 to launch a new program focused on supporting targeted interdisciplinary collaborative research aimed at making it more efficient and related to the practical needs of both countries. In addition to the bilateral programs and projects, some multilateral research collaborations started from 2016 enjoying the RFBR-DST support. It was a result of the cooperation between the BRICS states and could develop further owing to the DST possible participation in the Eurasian Association for Promotion of Fundamental Research established in 2016 on the RFBR initiative as well as due to India's participation in the Shanghai Organization for Cooperation.

Despite the fact that the RFBR is looking for more partners in India, the DST remains definitely its major counterpart in this country and is ready to accept and try all possible new kinds and spheres of its cooperation with the RFBR.



90-летию со дня рождения академиков О.М. Белоцерковского и Г.И. Марчука,  
а также 10-летию сотрудничества РФФИ–ДНТ посвящается

## Компьютеры и электроника

В.А. Гущин

Сотрудничество с ДНТ началось в 1987 году с подписания руководителями двух крупнейших стран — СССР, возглавляемого М.С. Горбачевым, и Индии, возглавляемой Р. Ганди, Межправительственной комплексной долгосрочной программы научно-технического сотрудничества (КДП НТС, Программа, ИЛТР). В то время Академию наук СССР возглавлял академик Г.И. Марчук. Ему и было поручено руководство Программой с советской стороны.

В мае 1988 года в Москве состоялся первый (ознакомительный) симпозиум, на котором ученые и специалисты обеих стран рассказывали о своих направлениях деятельности. Советская сторона, возглавляемая Г.И. Марчуком, была представлена почти всеми вице-президентами АН СССР, а также директорами многих институтов. Индийскую делегацию возглавлял профессор С.Н.Н. Рао, который и по сей день является сопредседателем Программы с индийской стороны.

В ходе выступлений и дискуссий начали образовываться команды с общими научными интересами. О.М. Белоцерковский, будучи крупным специалистом в области вычислительной механики (аэро- и гидродинамики, механики деформируемого твердого тела, биомеханики и т.д.) обратил внимание на доклад профессора Р. Нарасимы, который продемонстрировал не только блестящие результаты в области ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое и управления этим процессом, но и являлся директором Национальной аэронавтической лаборатории (NAL, г. Бангалор) — аналога нашего Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ).

Проблемы гемодинамики обсуждались в докладе доктора Г. Джайараман. Профессор Гаур рассказывал о некоторых проблемах сейсмологии. По итогам московского симпозиума было решено провести целый ряд тематических конференций.

Для обсуждения хода выполнения Программы и утверждения новых проектов очередное заседание рабочей группы КДП НТС, возглавляемой Г.И. Марчуком, состоялось во второй половине ноября 1990 г. в Дели. Одним из членов индийской делегации был доктор В. Бхаткар — директор Центра разработки перспективных вычислительных систем (C-DAC, Пуна). Одной из национальных программ Индии в 1986 году была принята программа создания индийского суперкомпьютера. С этой целью и был организован C-DAC.

Виджей Бхаткар обратился к Г.И. Марчуку с предложением посетить C-DAC. Гурий Иванович, учитывая «вычислительный авторитет» Олега Михайловича Белоцерковского, любезно пригласил его в эту поездку в г. Пуна.

Так, после ноябрьского визита в C-DAC Г.И. Марчук предложил О.М. Белоцерковскому возглавить раздел КДП НТС «Компьютеры



**ГУЩИН  
Валентин Анатольевич**  
член-корреспондент РАН, профессор,  
вице-президент Российской-  
индийского центра компьютерных  
исследований, Институт  
автоматизации проектирования РАН



и электроника», срочно собрать команду специалистов и направить ее для детального ознакомления с системой ПАРАМ.

Через две недели после возвращения из Индии О.М. Белоцерковский с новой командой был снова в Пуне. Поселили нас в той же гостинице «Диаманд», где проходила выставка-конференция и сотрудники С-DAC демонстрировали свои разработки: многопроцессорный вычислительный комплекс ПАРАМ, «ускорительные» платы на трансьютерах и соответствующее программное обеспечение. Трансьютерные платы (от одного до 10 процессоров), будучи вставленными в обычный РС, позволяют повысить производительность РС в несколько раз.

Поняв, что адаптацию программ к новым системам можно осуществить достаточно быстро, а быстродействие этих систем существенно превосходило производительность БЭСМ-6 и ЕС (1060,1061), О.М. Белоцерковский предложил В. Бхаткару провести выставку-семинар в Москве на базе Института автоматизации проектирования РАН (ИАП РАН). Было решено, что выставка пройдет в середине апреля 1991 года. Однако выставка не имела бы такого большого успеха, если бы мы сами не показали, что и как можно делать на таких системах. С этой целью уже в январе 1991 года четыре сотрудника ИАП РАН (А.В. Бабаков, М.А. Березовский, К.А. Коньков и В.Н. Коньшин) были направлены в С-DAC на один месяц для распараллеливания своих программ.

В марте наши четыре сотрудника уже заканчивали совместно с сотрудниками C-DAC подготов-

ку демонстрационных версий наших программ. Был оговорен сценарий выставки и большинство деталей. Уже на этом этапе начали складываться мини-группы сотрудников из ИАП РАН и С-DAC (А.В. Бабаков, К.А. Коньков и В. Рамеш «Метод потоков для расчетов аэродинамических характеристик автомобилей», М.А. Березовский и К. Рамеш «Построение сеток и конструкций», В.А. Гущин, В.Н. Коньшин и С. Нааянан «Разработка пакета прикладных программ CRAG для расчетов воздухо-, тепло- и массопереноса в чистых комнатах»).

Индийская сторона с участием наших со-  
трудников подготовила буклеты по трем на-  
правлениям: описание «железа» и архитектуры  
машины, системное программное обеспечение,  
приложения.

Открытие выставки было назначено на 16 апреля 1991 года. 12 апреля команда С-DAC из 10 человек прибыла в Москву. Первое, что мы попробовали, это вставить транспьютерную плату в PC Unisys с процессором Intel 086. Получилась машина на уровне БЕСМ-6. Сотрудники ИАП РАН, воодушевленные таким поворотом судьбы (в то время у нас персональных компьютеров было существенно меньше, чем сотрудников), быстро осваивали новые возможности. Тем более что консультанты из С-DAC были все время рядом. Был подготовлен зал, расставлены компьютеры, развешены стенды. Отдельное место было отведено для многопроцессорного вычислительного комплекса ПАРАМ и транспьютерных плат.

Открытие прошло успешно. За десять дней выставку посетили более двухсот специалистов из различных организаций и ведомств. Отзывы специалистов были весьма лестные. С учетом этих обстоятельств О.М. Белоцерковский принял решение о приобретении ПАРАМ. Состоялся ряд встреч на высшем уровне. В итоге 15 августа 1991 года (за четыре дня до ГКЧП) было подписано Постановление ГКНТ о выделение необходимых средств на покупку ПАРАМ. Так началось внедрение мощной вычислительной техники в ИАП РАН, и стал создаваться вычислительный центр ИАП РАН. В С-DAC на стажировку из института выезжали электронщики, системщики и разработчики прикладных



программ. Машинный парк ИАП расширялся, и в 1994 году уже была установлена система ПАРАМ 8000, состоящая из 128 процессоров Т-800 и i-860. Все сотрудники имели РС, во многих из которых стояли транспьютерные платы. У сотрудников появилась возможность решать более сложные задачи, выполнять совместные международные проекты. Российско-индийские выставки стали традиционными и проводятся каждые два года. Благодаря помощи Миннауки к ИАП РАН была подведена оптоволоконная линия. Вычислительный центр (ВЦ) института развивался.

Вычислительная техника развивается стремительными темпами, и вот в апреле 1997 года С-DAC демонстрирует суперкомпьютер ПАРАМ 9000 на базе процессоров SUN Ultra Sparc (до этого они уже опробовали процессоры SUN Super Sparc и DEC-Alpha). И здесь О.М. Белоцерковский предлагает руководству С-DAC поставить в ИАП очередной образец. Контракт был подписан, и осенью 1997 года был установлен прототип системы с производительностью 1.3 Gflops (четыре процессора Ultra Sparc 167 Mhz). Опробовав систему, наши сотрудники убедились в ее существенно больших возможностях, в том числе и благодаря наличию системы MPI, позволяющей легко и быстро адаптировать прикладные программы от одной вычислительной системы к другой. А системы такого типа все шире стали распространяться в мире из-за своей эффективности.

В 1998 году С-DAC сдал в эксплуатацию суперкомпьютер ПАРАМ 10000 на базе процессоров Ultra Sparc II с пиковой производительностью 100 млрд операций с плавающей точкой в секунду (100 Gflops). Для освоения этого нового суперкомпьютера и обучения сотрудников С-DAC современным методам вычислительной гидродинамики в С-DAC в 1998-2000 годах в С-DAC были откомандированы несколько сотрудников ИАП РАН и Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (ИВМ РАН).

Во время очередной встречи с руководством С-DAC и ДНТ О.М. Белоцерковский в очередной раз предложил индийской стороне осуществить свою старую идею о создании российско-индийского центра перспективных

компьютерных исследований (РИЦКИ), оснащении его новыми образцами вычислительной техники с целью выполнения совместных проектов. На этот раз, видимо, эта идея «проросла» и в головах индийских коллег. В апреле 1998 года началась проработка документов, поиск юридической формы такой организации. Вопрос о создании российско-индийского центра обсуждался и на Президиуме РАН. Постановление о создании на базе ИАП РАН российско-индийского центра компьютерных исследований было подписано президентом РАН академиком Ю.С. Осиповым в июне 1998 года.

В качестве учредителей РИЦКИ выступили РАН, ИАП РАН и С-DAC. К сожалению, по юридическим соображениям учредителями не смогли выступить ни Миннауки РФ, ни ДНТ Правительства Индии. Высшим органом РИЦКИ (Российско-индийского центра компьютерных исследований) является объединенная комиссия. Российская часть этой комиссии была утверждена Президентом РАН Ю.С. Осиповым в 1998 г. в следующем составе:

- В.Е. Фортов — вице-президент РАН, академик, сопредседатель;
- М.П. Кирпичников — министр науки и технологий РФ, академик;
- А.И. Коношенко — начальник Финансово-экономического управления РАН, к.э.н.;
- О.М. Белоцерковский — директор ИАП РАН, академик;
- В.А. Гущин — заместитель директора ИАП РАН, член-корреспондент РАН;
- В.В. Шаповаленко — заместитель начальника Управления внешних связей РАН.



Приблизительно в то же время индийская сторона также утвердила состав индийской части:

- В.С. Рамамурти — профессор, секретарь ДНТ Правительства Индии;
- представители ДНТ;
- представители Министерства информационных технологий;
- Р. Арупа — директор С-DAC.

После того, как учредительные документы были подготовлены на российской стороне, их передали на индийскую сторону, где также потребовалось несколько месяцев. Далее было принято решение о приобретении для создаваемого РИЦКИ фрагмента суперкомпьютера PARAM 10000, обсуждены темы будущих контрактов на разработку прикладного программного обеспечения для этой вычислительной системы. Это аэродинамика (академик О.М. Белоцерковский, ИАП РАН), сейсмика (член-корреспондент А.В. Николаев, Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН)), прогноз погоды и моделирование климата (академик Г.И. Марчук), а также разработка параллелизующих компиляторов (академик В.П. Иванников).

2 июля 2000 года в ИАП РАН состоялось первое заседание объединенной комиссии РИЦКИ, где президентом был избран О.М. Белоцерковский; 3 июля этого же года состоялась инаугурация Центра со всей присущей Индии атрибутикой.

Услугами ВЦ ИАП РАН пользуются (в том числе и через удаленный доступ) Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), НИИ Механики МГУ, Объединенный институт высоких

температур РАН (ОИВТ РАН), ИВМ РАН, ВЦ РАН, Госпиталь им. Н.Н. Бурденко. Выполняются проекты по грантам Президиума РАН, Отделения математических наук РАН, РФФИ, Миннауки.

На протяжении этого времени (1991-2004 гг.) большую финансовую и моральную поддержку нам оказали Министерство науки РФ, РАН и РФФИ (закупка техники, организация и проведение совместных выставок-семинаров, исследовательские проекты). Однако с середины 2000-х финансирование пошло на спад. И подписанное в 2004 году соглашение между РФФИ и ДНТ по поддержке совместных российско-индийских исследовательских проектов в области фундаментальных исследований и совместных семинаров было весьма своевременным.

За прошедшие 10 лет РИЦКИ и С-ДАС выполнили четыре проекта и провели пять семинаров. В этих проектах принимали участие с российской стороны сотрудники таких организаций, как ИАП РАН, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ РАН), ВЦ РАН, ОИВТ РАН, ИВМ РАН, Институт системного программирования РАН, ИФЗ РАН, ЦАГИ, Московский физико-технический институт, а с индийской стороны – С-ДАС, Международный институт информационных технологий (г. Пуна), Институты информационных технологий (г. Мумбай, г. Каннур).

В РИЦКИ в 2005-2007 гг. при поддержке РФФИ проведена совместно с С-ДАС сборка многопроцессорной вычислительной системы PARAM PADMA.RU на базе процессора IBM Power PC 5.



На фото слева направо: посол Республики Индия в Российской Федерации г-н С.К. Ламбах; председатель РФФИ академик М.В. Алфимов; заместитель Министра науки и технологий Российской Федерации академик М.П. Кирпичников; секретарь Департамента науки и технологий Правительства Индии профессор В.С. Рамамурти; директор ИАП РАН, президент РИЦКИ академик О.М. Белоцерковский; министр науки и технологий Правительства Индии г-н М.М. Джоши; сопредседатель Объединенного Совета КДП НТС академик Г.И. Марчук; вице-президент РАН академик Г.А. Месяц.



## 10-ЛЕТИЕ СОТРУДНИЧЕСТВА РФФИ И ДНТ В ПОДДЕРЖКЕ РОССИЙСКО-ИНДИЙСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ



На семинаре в Москве, ИАП РАН, РИЦКИ, 2011 г.

В последние годы РФФИ прекратило финансирование российско-индийских семинаров, хотя индийская сторона (ДНТ) продолжает оказывать эту поддержку индийским участникам.

В рамках подписанного в 2012 году нового соглашения ILTP предполагается, что российские участники должны полностью оплачивать все расходы по участию в семинарах (перелеты, переезды, проживание, питание и т.д.), что существенно сказывается на сотрудничестве. Тем

не менее российская делегация приняла участие в очередном семинаре в г. Пуна (С-ДАС) в ноябре 2014 года.

Хотелось бы пожелать, чтобы руководство РФФИ, РАН и ДНТ, учитывая давние и плодотворные связи России с Индией, уделяло больше внимания этому перспективному сотрудничеству. Пусть эта российско-индийская «дорога» будет долгой.

Москва, 31 марта 2015 года.

P.S. После написания этой статьи прошло почти два года. К сожалению, за это время не стало многих из создателей и участников этого проекта. Ушли из жизни Г.И. Марчук, О.М. Белоцерковский, Ф.А. Кузнецов, В.В. Шаповаленко, В.П. Иванников, А.М. Кадакин. Мы с благодарностью помним о них.

### Summary

The article is devoted to the 10th anniversary of the establishment of the joint research programmes sponsored by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) and the Department of Science and Technology, Government of India (DST).

The article briefly discusses the emergence of the Integrated Long Term Programme of Cooperation in Science & Technology (ILTP), 1987, the first joint research

projects. Special attention is paid to the establishment of a computer center at the Institute for Computer Aided Design (ICAD RAS) equipped with computers of the series PARAM (C-DAC, Pune, India) and the Organization of Joint Russian Indian Center for Advanced Computer Research (RICCR).

On the basis of the RICCR the joint RFBR-DST research projects started as well as projects of the Presidium of the RAS.



## Совместные исследования транзиентных явлений в солнечной атмосфере

Б.П. Филиппов

Сотрудничество российских и индийских исследователей в области физики Солнца при поддержке РФФИ и ДНТ началось в 2008 г. Инициатива исходила от молодого и активного сотрудника Института наблюдательных наук им. Арибхатты (Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences (ARIES)) доктора А.К. Сриваставы. Российским партнером стал заведующий лабораторией солнечной активности Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН) (рис. 1а), д.ф.-м.н. Б.П. Филиппов. Примечательно, что и тот и другой институт — многопрофильный, сочетающий исследования в области астрофизики с работами по геофизике. Это вполне естественно, поскольку сейчас хорошо известно, что многие геофизические явления, особенно электромагнитной природы, инициируются активными процессами на Солнце.

Институт наблюдательных наук (рис. 1б) находится в предгорьях Гималаев на высоте 2000 м. Хорошие астроклиматические условия позволяют проводить регулярные наблюдения Солнца в оптическом диапазоне (в основном в спектральной линии излучения

водорода  $H_{\alpha}$ ). С вершины Манора Пик, на которой расположен институт и его обсерватория, и окрестных вершин видны на горизонте величественные пики гималайских семитысячников. ИЗМИРАН находится на равнине недалеко от Москвы, однако помимо телескопов, базирующихся на основной территории, для наблюдений Солнца используются инструменты, установленные на Кисловодской горной астрономической станции Пулковской обсерватории (ГАС ГАО), тоже на высоте около 2000 м. Со станции открывается прекрасный вид на Эльбрус, который, хотя и не дотягивает чуть-чуть до 6000 м, все же считается высочайшей европейской горной вершиной. В середине 60-х на Горной станции был установлен крупнейший в мире для своего времени внезатменный коронограф, сконструированный тогдашним заведующим лабораторией солнечной активности ИЗМИРАН профессором Г.М. Никольским, с главным объективом диаметром 53.5 см и фокусным расстоянием 8 м (рис. 2).

На этом сходство сторон, пожалуй, заканчивается, и начинаются различия. Индийскими участниками проекта были в основном молодые люди (аспиранты, стажеры), группирующиеся вокруг доктора А.К. Сриваставы и руководителя направления солнечных исследований в ARIES доктора В. Уддина. Они хорошо владели современными компьютерными методами обработки различных данных, были знакомы с большими базами данных различных космических миссий, легко осваивали новые программные продукты, выпускавшиеся для обеспечения космических проектов. Российскими участниками в силу специфики состояния научной сферы в стране оказались люди гораздо более зрелые и опытные.



**ФИЛИППОВ  
Борис Петрович**  
Институт земного магнетизма,  
ионосферы и распространения  
радиоволн им. Н.В. Пушкова

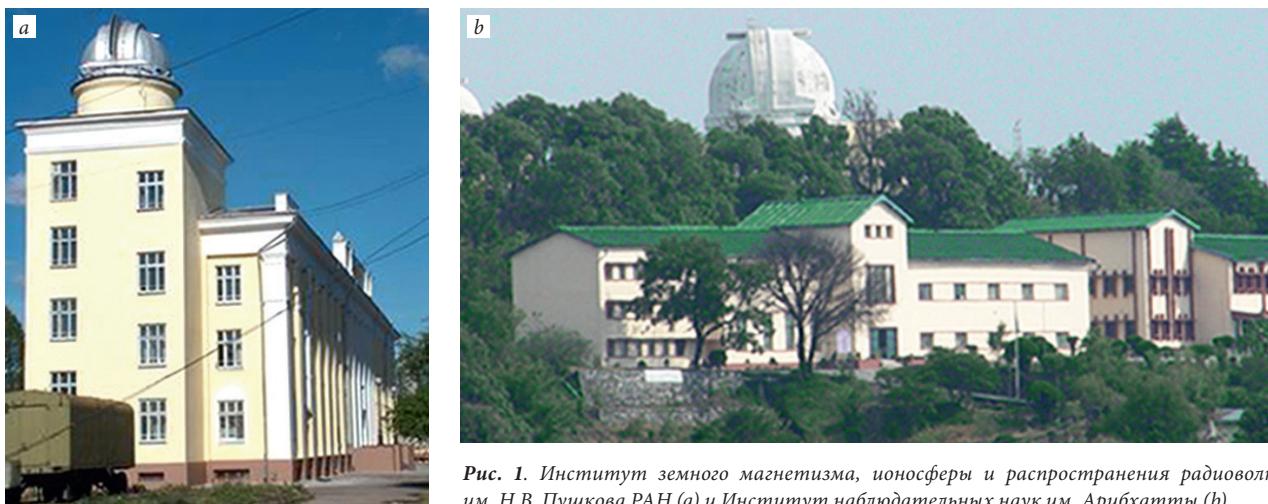


Рис. 1. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН (а) и Институт наблюдательных наук им. Арибхатты (б).

Их критический и вдумчивый взгляд на многие явления и факты, встречавшиеся в наших исследованиях, был очень полезен для выработки здоровых и обоснованных концепций.

Наш первый проект, поддержанный РФФИ и ДНТ, назывался «Многоволновые наблюдения и моделирование транзиентных и волновых явлений в солнечной атмосфере». Мы планировали проведение и анализ наблюдений (спектры и фильтровые изображения) динамических явлений (спикилы, сердьи, петельные и активные протуберанцы, выбросы) в верхней хромосфере и короне Солнца, исследование воздействия корональных выбросов на лучевые структуры короны (стримеры), колебательных процессов в корональных лучах под влиянием удаленных источников возмущений. Поскольку до начала выполнения проекта российские и индийские участники, несмотря на интенсивную электронную переписку, не встречались лично, большое значение имел взаимный обмен научными визитами. Непосредственное общение, совместная работа и подробное обсуждение возникающих вопросов очень полезны для взаимопонимания и дальнейшей плодотворной работы. Оказалось, что организация этих визитов была не простой задачей. По действовавшим в 2009 г. правилам сотрудничества между РФФИ и ДНТ расходы по приему гостей несли принимающая сторона, а транспортные расходы оплачивала командирующая сторона. К сожалению, финансовые годы в российской и индийской частях проекта не совпадали. Хотя формально проект начинался 1 апреля 2009 г. и заканчивался 1 апреля 2011 г., финансирование российской части прекращалось в декабре каждого

года. С учетом климатических особенностей обеих стран — сезона дождей в Индии и суровой зимы в России — приемлемыми «окнами» для визитов оставались только март и ноябрь. В последующих конкурсах правила были изменены и все расходы должна была нести командинирующая сторона. Это значительно упростило проблему согласования сроков визитов.

В ходе непосредственного общения индийских и российских участников во время научных визитов (рис. 3) мы подробно проана-

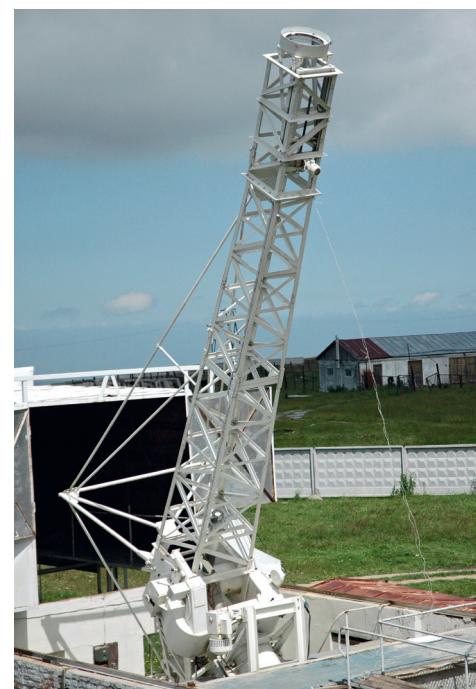


Рис. 2. Большой внеземной коронограф ГАО-ИЗМИРАН.



лизировали несколько вспышечных явлений на Солнце, наблюдавшихся как наземными обсерваториями, так и с борта космических аппаратов Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), Transition Region and Coronal Explorer (TRACE), Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO), Hinode. Изображения верхних слоев солнечной атмосферы, хромосферы и короны получают с помощью узкополосных спектральных фильтров, пропускающих, как правило, излучение одной спектральной линии какого-нибудь атома или иона. Такая линия появляется при определенной температуре, так что полученное изображение характеризует распределение плазмы с данной температурой. Поскольку температура солнечной атмосферы очень неоднородна, в разных спектральных линиях отображаются разные слои и разные плазменные структуры. Сочетание и сопоставление изображений в разных спектральных полосах дает возможность получить более полную картину распределения плазмы в атмосфере и ее температурных особенностей. Именно поэтому в нашем проекте мы делали ставку на много волновые наблюдения.

Все данные наблюдений были подобраны и обработаны индийскими участниками проекта, в ходе дискуссий составлен сценарий явлений и предложена интерпретация наблюдений с точки зрения концепции накопления перед вспышкой свободной магнитной энергии в короне.

При анализе длительной компактной вспышки (ЗВ/M8.9) 4 июня 2007 г. в активной области NOAA 10960 мы не обнаружили существенных изменений фотосферного магнитного потока непосред-



**Рис. 3.** Руководители проекта с российской и индийской сторон Б.П. Филиппов и А.К. Сривастава во время первого визита российских участников в ARIES.

ственно перед вспышкой и во время ее развития, хотя высококачественные изображения в континууме с японского спутника Hinode показывали заметные изменения структуры поля в полутени пятна, связанного со вспышкой. Примерно за час до вспышки и непосредственно перед ее началом происходила активизация скрученной корональной структуры, наблюдавшейся в линии ионизованного кальция Ca II H 3968 Å и ультрафиолетовых линиях железа Fe IX/X 171 Å. Мы считаем эту структуру проявлением магнитного жгута, в котором была запасена свободная магнитная энергия, выделившаяся во время вспышки. Несмотря на значительную величину скрученности жгута (около 10-12 радиан на всей длине), он оставался в равновесии до начала вспышки, в ходе которой, вероятно, пересоединение силовых линий жгута с соседними петлями создало условия для ограниченной эruptionи части магнитного потока жгута. Однако вследствие наличия сильного дипольного момента активной области подъем скрученных петель остановился на некоторой высоте и образования коронального выброса не последовало. Структура активной области после вспышки упростилась: исчез скрученный жгут, появилось много корональных петель, соединяющих соседние противоположные полярности, ранее замыкавшиеся на удаленные источники.

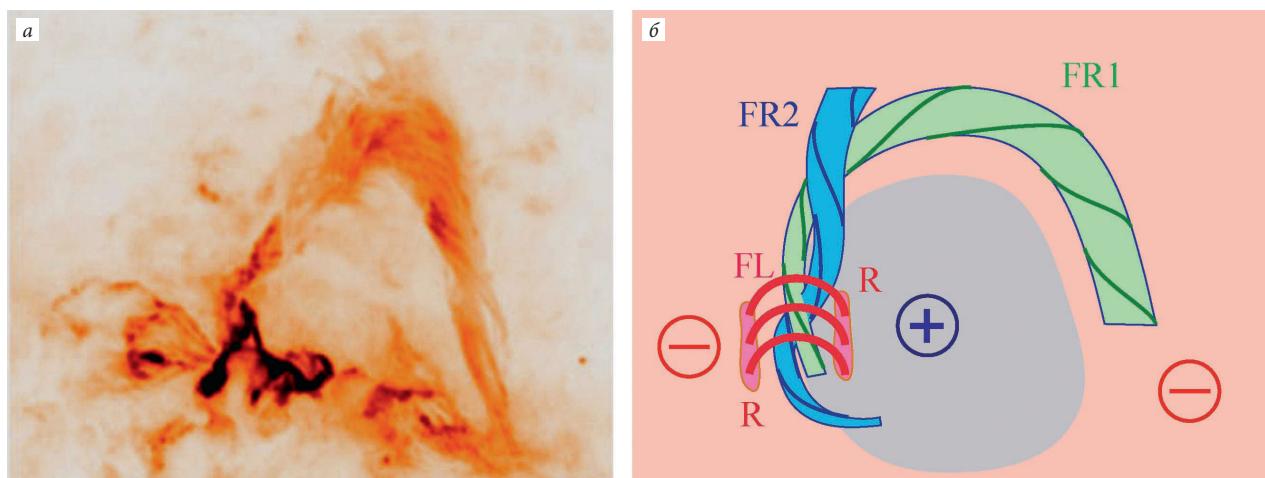


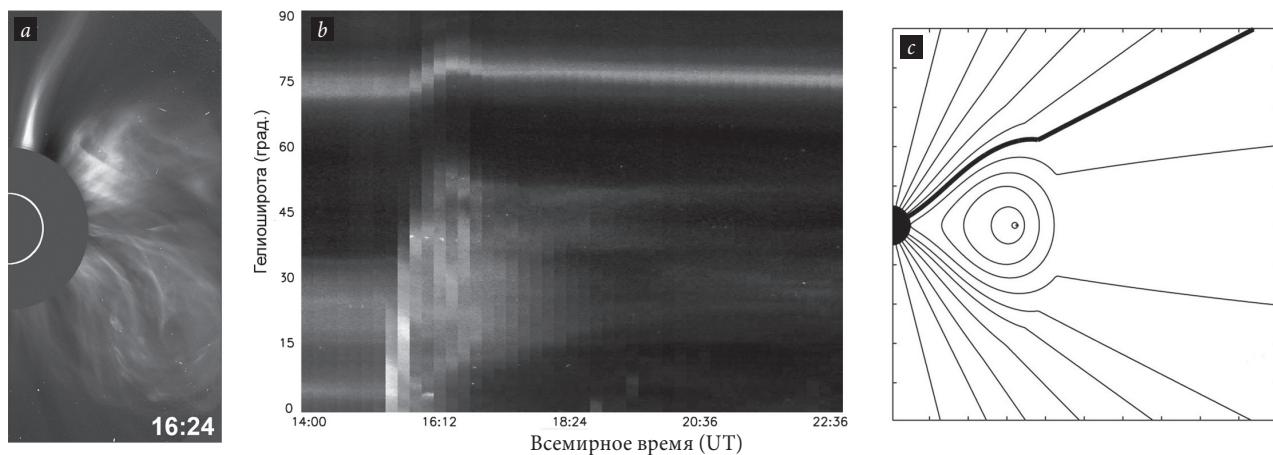
Рис. 4. Негативное изображение активной области NOAA 11045 во время активизации (а) и схематическое представление ее магнитной конфигурации (б). FR1 и FR2 — магнитные жгуты, FL — вспышечные петли, R — вспышечные ленты.

Еще один пример ограниченной эruptionи магнитного жгута и связанной с этим явлением вспышки M-класса 12 февраля 2010 г. был исследован нами в активной области NOAA 11045 (рис. 4). Причиной активизации жгутовой корональной структуры стало быстрое приближение к одному из ее концов всплывающего магнитного потока, в результате чего происходило сжатие всей зоны инверсии, в которой располагался жгут. Однако запас устойчивости равновесия жгута был достаточно велик для развития настоящей эruptionи. Часть его силовых линий была укоренена в фотосфере в средней части длины жгута. Эти силовые линии, а также силовые линии окружающего поля активной области удержали жгут от полной эruptionи, несмотря на интенсивные движения плазмы внутри него и колебания всего объема.

Другим направлением наших исследований было изучение колебательных и волновых процессов в корональных лучах (стримерах) под воздействием внешних возмущений. Стримеры подвергаются влиянию корональных выбросов, распространяющихся через корону даже на большом угловом удалении от стримеров. Они отклоняются от исходного положения и становятся на какое-то время изогнутыми. Горбик, возникший на ранее прямой оси стримера, движется вдоль нее от Солнца, как бегущая волна вдоль натянутого шнура (кинк-волна). Многие авторы интерпретируют это явление как проявление распространяющихся ударных волн, генерируемых быстрыми сверхальвеновскими корональными выбросами в короне. Характерной особенностью явления, производимого ударной волной, должно быть постепенное уменьшение

скорости продвижения горбика, так как ударная волна теряет энергию и замедляется при распространении в короне. Другие исследователи считают эти искривления лучей свидетельством возбуждения волнового процесса внутри лучевой структуры после внешнего толчка. Они назвали его «стримерной волной», которая представляет собой быструю моду изгибной волны в плазменном слое стримера, возбужденную отклонением слоя от равновесия проходящим выбросом.

На основе детального анализа нескольких примеров мы пришли к выводу, что изгиб лучей чаще всего связан с воздействием магнитного поля коронального выброса на поток плазмы, текущий вдоль оси луча. Мы не нашли никаких доказательств колебаний оси стримера. Ось стримера отклоняется импульсивно и затем возвращается очень медленно в исходное положение (рис. 5). Такое поведение стримера не поддерживает идею стримерных волн, а также механизм его деформации под воздействием распространяющейся ударной волны. Мы разработали аксиально-симметричную модель с радиальным полем и расширяющимся тороидальным магнитным



**Рис. 5.** Искривление коронального стримера при прохождении коронального выброса 2 января 2012 г. в поле зрения коронографа SOHO/LASCO C2 (a); временной профиль углового отклонения стримера (в верхней части диаграммы) и угловое расширение коронального выброса (в нижней части диаграммы) на удалении в 3.3 солнечных радиуса от поверхности (b); схема силовых линий магнитного поля короны, содержащего удаляющийся магнитный жгут (c).

жгутом в экваториальной плоскости и показали, что искривление силовых линий хорошо соответствует наблюдаемой картине. Движение крупномасштабного магнитного жгута, удаляющегося от Солнца, создает изменения в структуре окружающих силовых линий в короне, которые похожи на полупериод волны, бегущей вдоль коронального луча.

Годы выполнения нашего следующего совместного проекта пришлись на эпоху максимальной солнечной активности в текущем цикле. Его название непосредственно отражает эту специфику: «Изучение динамических явлений в солнечной атмосфере во время максимума 24-го цикла солнечной активности».

Этот цикл, максимум которого мы не так давно миновали, продемонстрировал немало особенностей, заставляющих пересмотреть некоторые представления о закономерностях солнечной цикличности. При этом он был встречен научным сообществом как никогда «во всеоружии», поскольку целая «флотилия» космических обсерваторий наблюдала Солнце в различных спектральных участках и с разных углов зрения. Продолжала

успешную работу космическая обсерватория SOHO, находящаяся в лагранжевой точке между Солнцем и Землей. Обсерватория Solar Dynamic Observatory (SDO) на геосинхронной орбите непрерывно передает множество изображений Солнца в восьми ультрафиолетовых спектральных линиях и континууме, а также магнитограммы фотосферного поля. Две межпланетные станции STEREO с комплексом ультрафиолетовых телескопов и коронографов движутся в разных направлениях по орбите Земли и обеспечивают наблюдения с боковых точек зрения, в том числе участков поверхности Солнца, не видимых со стороны Земли. Оптический телескоп спутника Hinode обладает беспрецедентно высоким пространственным разрешением, а его рентгеновский телескоп регистрирует горячую корональную плазму. Высочайшее временное разрешение обеспечивает ультрафиолетовый телескоп SWAP микроспутника PROBA2. Многие наземные обсерватории модернизовали свои телескопы и системы регистрации.

Благодаря таким богатым данным наблюдений мы имели возможность получить убедительные доказательства структуры коронального магнитного поля в окрестностях солнечных волокон (протуберанцев) в виде скрученных жгутов силовых линий. Были найдены яркие примеры соответствия морфологических признаков волокон направлению закрученности жгутов (знаку спиральности). Наблюдения одних и тех же плазменных образований в короне в различных проекциях позволили надежно восстановить их трехмерную структуру и точное пространственное положение. На этом основании мы выполнили сравнения с модельными расчетами

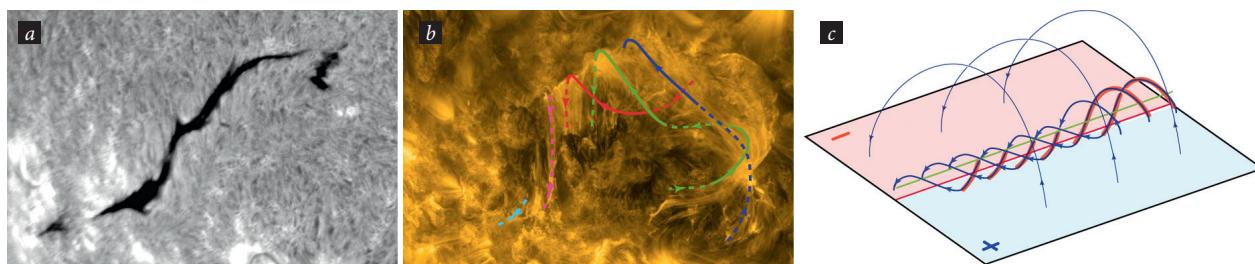


Рис. 6. Фильтрограммы обсерватории Биг Бэр (Big Bear Solar Observatory): в спектральной линии  $H_{\alpha}$  3 августа 2012 г. с декстральным волокном (а); та же область Солнца на изображении в канале 171 Å (SDO) 4 августа во время активизации с проведенными вдоль корональных петель силовыми линиями (б); схематическое представление правовинтового магнитного жгута с декстральным волокном (с). Утолщенные красные отрезки представляют собой отдельные нити волокна.

и нашли критерии устойчивости магнитных жгутов в корональном поле. Комплексный анализ ряда транзиентных явлений активности с ограниченным разлетом плазмы протуберанцев и с полной эruptionью показал, что характер движений определяется главным образом распределением коронального магнитного поля. В реальной солнечной короне существуют области, в которых возможно устойчивое равновесие магнитного жгута (хотя оно не обязательно осуществляется), и области, где такое равновесие в принципе невозможно. Мы продемонстрировали, например, что во время эruptionии 17–18 июня 2012 г. магнитный жгут смог остановиться высоко в короне на удалении более четырех солнечных радиусов от поверхности фотосферы благодаря тормозящему действию магнитного натяжения и сопротивлению окружающей плазмы, потому что существовала зона устойчивого равновесия на большой высоте.

Во время активизации хорошо развитого солнечного волокна 4 августа 2012 г. плазма вообще не смогла существенно сместиться от первоначального положения, несмотря на интенсивные движения вдоль спиральных силовых линий, поскольку магнитный жгут, содержащий волокно, был внутри зоны устойчивости далеко от порога неустойчивости. Однако вследствие активизации на ультрафиолетовых изображениях короны стала отчетливо различима вся структура магнитного жгута, содержащего волокно (рис. 6).

Измерение магнитных полей в протуберанцах, направление тонкоструктурных нитей, характер внутренних движений свидетельствуют о наличии сильной осевой компоненты магнитного поля в волокнах. Наличие осевой составляющей магнитного поля в волокнах делит их на два класса в зависимости от направления этой составляющей:

декстральные, если она направлена направо при взгляде на волокно со стороны положительной фоновой полярности, и синистральные, если направление противоположное. Анализ тонкой структуры волокон показал, что в декстральных волокнах тонкие нити повернуты относительно оси на небольшой угол по часовой стрелке, а в синистральных — против часовой стрелки. Эта закономерность позволяет установить принадлежность конкретного волокна к определенному классу (хиральность волокна) исключительно по его внешнему виду без какой-либо информации о магнитных полях.

Подавляющее большинство структурных особенностей волокон согласуются с представлением о строении магнитного поля в окружающем их пространстве в виде магнитных жгутов. Силовые линии жгута в первом приближении обладают формой цилиндрических спиралей, нижние части которых, имеющие кривизну, направленную вверх, могут удерживать в устойчивом равновесии в гравитационном поле достаточно плотную плазму. Эти нижние части спиралей и составляют тонкую структуру волокон при наблюдениях в хромосферных линиях. Верхние участки спиральных силовых трубок могут содержать более горячую

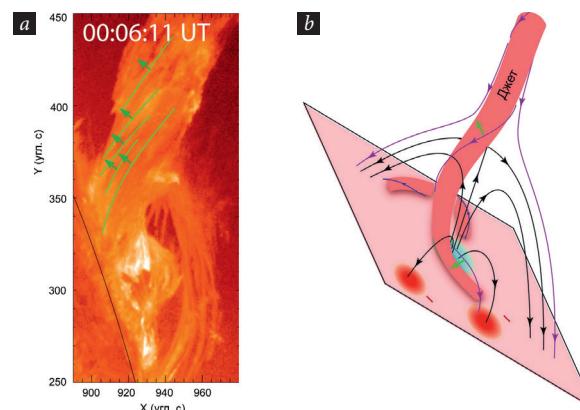


плазму с большей барометрической шкалой высот и движущуюся холодную плазму, не находящуюся в гидростатическом равновесии, при активизации или эruptionи волокна, как показано на *рисунке 6с*. Как видно из этой схемы, если сверху мы видим нижние участки винтовых линий, то внутри левовинтовой спирали должно находиться декстральное волокно, а внутри правовинтовой спирали — синистральное. Убедительный пример такого соответствия дает тонкая структура волокна и форма корональных петель во время активизации волокна 4 августа 2012 г. Принадлежность волокна к декстральному типу очевидна на  $H_\alpha$ -фильтограмме (*рис. 6а*), тогда как правовинтовая спираль отчетливо различима в структуре корональных петель.

Наш третий по счету совместный проект имел название: «Изучение роли магнитных полей во вспышечных и эруптивных областях солнечной атмосферы». В нем мы более детально исследовали топографию и структуру магнитных полей в солнечной атмосфере в местах накопления свободной магнитной энергии и ее высвобождение во время динамических явлений солнечной активности (вспышки, корональные выбросы, джеты). Руководителем проекта с индийской стороны на этот раз выступал доктор В. Уддин, исполняющий обязанности директора Института наблюдательных наук им. Арибхатты, принимавший активное участие и в предыдущих проектах.

Большой интерес у всех участников в ходе выполнения этого проекта вызвало исследование направленных потоков плазмы (джетов) из нижних слоев солнечной короны в верхние. Были использо-

ваны многоволновые и многоракурсные наблюдения коронального плазменного джета 10-11 апреля 2013 г. для изучения механизма его формирования (рис. 7). Мы пришли к выводу, что развитие джета последовало за незавершенной эruptionью солнечного волокна внутри магнитной конфигурации типа Эйфелевой башни с нулевой точкой магнитного поля. Осевое вращение джета и его спиральная структура свидетельствуют о наличии в нем спиральности того же знака, что и ранее существовавшем волокне. Удачное расположение исследуемой области на солнечном диске и высокое качество наблюдательного материала позволили проследить передачу спиральности от замкнутого предэруптивного магнитного поля волокна открытому полю джета.



**Рис. 7. а** — Фрагмент изображения края солнечного диска (обозначен черной линией) и короны в канале 304 Å телескопа AIA космической обсерватории SDO на последней стадии развития джета, **б** — схема магнитной конфигурации, в которой развивалось явление.

Внезапные спорадические процессы в солнечной атмосфере (вспышки, выбросы, джеты) оказывают самое сильное и труднопредсказуемое воздействие на состояние околоземного космического пространства, которое в последние годы именуется «космической погодой». Энергия, выделяющаяся при этом взрывным образом, предварительно аккумулируется в корональных магнитных полях в виде свободной магнитной энергии или энергии электрических токов. Одним из индикаторов присутствия электрических токов в короне являются плотные плазменные образования — солнечные волокна и протуберанцы. Несмотря на долгую историю изучения этих объектов, их природа во многом остается неясной. Хотя все больше фактов накапливается в пользу магнитной конфигурации протуберанцев в виде



скрученного жгута силовых линий, наблюдения тонкой структуры протуберанцев в различных ракурсах не удается интерпретировать однозначно. Мы проводим анализ данных наблюдений с высоким пространственным и временными разрешением для выявления структурных особенностей плазменных образований в солнечной атмосфере с целью определения магнитных конфигураций, в которых развиваются неустойчивости, приводящие к активным процессам. Анализируются наблюдаемые проявления аккумулирования свободной магнитной энергии в короне в виде магнитных жгутов или токовых слоев и ее высвобождения при развитии неустойчивостей и магнитного пересоединения. Проводятся поиски топологических особенностей в структуре корональных полей и сопоставление их с наблюдаемыми проявлениями выделения энергии, что способствует развитию представлений о необходимых условиях для развития магнитной диссипации в короне.

### Summary

The cooperation of Russian and Indian scientists in the field of solar physics started in 2008 under support of the RFBR and DST. The Russian team from the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN) was headed by Dr. B.P. Filippov; the leader of the Indian team was Dr. A.K. Srivastava from the Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences (ARIES). The project "Multiwavelength Observations and Modeling of Transient Events and Waves in the Solar Atmosphere" was devoted to the study of mechanisms of energy transfer from lower layers of the solar atmosphere into the corona via wave and transient events. The Indian team is mainly represented by rather young researchers experienced in processing and analysis of data from space observatories, computing technologies and database handling. Russian participants were more aged and experienced for known reasons. Their criticism and expertise were very useful for the generation of reasonable and well-founded concepts.

За время сотрудничества мы опубликовали в соавторстве 12 статей в ведущих профильных международных научных журналах: "The Astrophysical Journal", "Monthly Notices of the Royal Astronomical Society", "Solar Physics", "Astronomy Reports", "Journal of Astrophysics and Astronomy", "Advances in Geosciences", а также несколько десятков статей, подготовленных участниками в отдельности по тематике проектов. Успешность нашего сотрудничества во многом обязана наличию прекрасных наблюдений Солнца космическими обсерваториями SOHO, TRACE, STEREO, Hinode, SDO.

Мы благодарны международным научным группам этих проектов за возможность работы с их данными.

During our exchanging with scientific visits and electronic communications, we collected and analyzed observational data on several events and came to interesting conclusions. Success of realization of our first collaborative project inspired us for the second application in the RFBR-DST Call for Proposals 2012: "Study of Dynamical Events in the Solar Atmosphere during Maximum of Solar Cycle 24." It was planned to run during the maximum phase of the new solar cycle when successive old and challenging new space missions were aimed to study the increasing solar activity. In the framework of the third project, "Study of the Role of Magnetic Fields in the Flaring and Eruptive Regions of the Solar Atmosphere," we continued the study of the processes of accumulation, storage, and release of magnetic energy in the solar atmosphere in more detail. We paid more attention to collimated plasma flows (jets) in the solar corona.

We published in cooperation 12 papers in leading profile journals and several tens of separate papers.



## Плазмонные наноструктуры, содержащие магнитные и полупроводниковые материалы, для нанофотоники

В.И. Белотелов

Совместная российско-индийская работа началась в 2009 году и продолжается поныне. Российскую сторону представляет коллектив сотрудников Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФ РАН) и Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ), возглавляемый доктором физико-математических наук В.И. Белотеловым. Индийскую сторону представляет коллектив Института фундаментальных исследований имени Тата (Tata Institute of Fundamental Research (TIFR), Мумбай) под руководством профессора Ачанта Вену Гопала, а также (до 2012 года) профессора Арвинда Венгурлекара. Работа была дважды поддержанна совместными грантами РФФИ-ДНТ Индии: проекты №№ 09-02-92671 (2009-2010) и 13-02-92710 (2013-2014).

Работа представляет важное и актуальное направление исследований, связанное с локализацией света на наномасштабах, перспективность которого обусловлена одновременным достижением быстродействия и миниатюризации устройств обработки информации, а также возможностью эффективного сочленения электрон-

ных и оптических элементов. В работе проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование оптических свойств плазмонных кристаллов, представляющих собой перфорированные металло-диэлектрические пленки, содержащие магнитные или полупроводниковые слои. Важной особенностью рассматриваемых структур является возможность управления их свойствами посредством внешнего магнитного поля ( $\sim 10\text{--}150$  мТл) или мощными фемтосекундными импульсами лазерного излучения (плотность энергии в импульсе  $\sim 100\text{--}500$  мкДж/см $^2$ ).

В ходе выполнения работ созданы и исследованы плазмонные кристаллы, предназначенные для работы как в дальнем оптическом поле (перестройка коэффициентов прохождения, отражения и поглощения падающего оптического излучения), так и в ближнем оптическом поле (управление распространением плазмон-поляритонов). В частности, было показано, что в таких структурах наблюдается гигантское резонансное усиление ряда магнитооптических эффектов на несколько порядков величины.

Все исследования в рамках проекта включают в себя компьютерное моделирование, теоретическое проектирование, оптимизацию параметров, изготовление и экспериментальное изучение свойств структур, разработку теорий наблюдаемых явлений. Сотрудничество с индийскими партнерами было необходимо в силу того, что все изучаемые плазмонные образцы были изготовлены и охарактеризованы индийской группой.

Опыт и возможности двух коллективов во многом взаимодополняемы. Научная группа из России имеет большой опыт в области



**БЕЛОТЕЛОВ  
Владимир Игоревич**  
профессор РАН,  
МГУ им. М.В. Ломоносова



Рис. 1. Российско-индийский коллектив.

теоретического изучения и электромагнитного моделирования периодических гетероструктур. Научная группа из Индии на протяжении нескольких лет ведет экспериментальные работы по исследованию металло-диэлектрических перфорированных пленок и обладает всеми необходимыми техническими возможностями для реализации поставленных задач. Институт фундаментальных исследований имени Тата входит в список ведущих научно-исследовательских институтов мира, обладает современной экспериментальной базой для проведения работ по нанофотонике и плазмонике и имеет большой опыт в изготовлении новых металло-диэлектрических решеточных структур с отверстиями или щелями субволновых масштабов. Экспериментальная и техническая базы индийского коллектива располагают современным оборудованием, что гарантирует проведение исследований на высоком научном уровне.

Работа двух коллективов (рис. 1) идеально дополняет друг друга: в то время как российский коллектив обеспечивает формирование направления исследований, проводит теоретические исследования, разработку структур и численное моделирование их характеристик, индийский коллектив изготавливает структуры и характеризует их оптически. После этого российский коллектив проводит магнитооптические эксперименты. Органичное сочетание деятельности двух

коллективов обусловило высокую эффективность сотрудничества и высокий научный уровень полученных результатов. За прошедшие восемь лет опубликовано около 40 работ, среди которых 15 статей в ведущих российских и зарубежных журналах, включая *Nature Nanotechnology*, *Nature Communications*, *Applied Physical Letters*, *Journal of the Optical Society of America B*, *Physical Review B* и др.

Финансирование работ в рамках совместных проектов РФФИ и ДНТ Индии в немалой степени способствовало повышению эффективности сотрудничества. В рамках проектов состоялось несколько визитов как индийских исследователей в Россию, так и российских исследователей в Индию. Во время визитов проходили необходимые обсуждения, консультации и совещания, совместные семинары, выступления с докладами, посещение лабораторий, что способствовало обмену опытом, повышению квалификации и приобретению новых навыков исследователей из ИОФ РАН, МГУ и TIFR и, в частности, развитию экспериментальной базы российского коллектива и теоретических навыков индийского коллектива.

Пример наших исследований красноречиво свидетельствует о том, что программа совместных проектов РФФИ и ДНТ Индии показала свою эффективность и значимость не только для развития международных научных связей, но и для развития российской и индийской наук в целом. Поскольку потенциал сотрудничества не исчерпан, мы надеемся на продолжение наших исследований в рамках совместных проектов РФФИ и ДНТ Индии.



## Summary

The joint Russian-Indian work of the A.M. Prokhorov General Physics Institute of the RAS (Moscow), M.V. Lomonosov Moscow State University and Tata Institute of Fundamental Research (Mumbai) started in 2009 and was twice supported by the joint RFBR-DST grants. The work is devoted to the localization of light at nanoscales that is the frontier of modern photonics. Novel plasmonic structures with extraordinary magneto-optical properties were designed, fabricated, and investigated that opened new prospects for various applications. About 15 papers have been published in leading scientific journals. The collaboration turned

out to be very fruitful, since the Indian team provided fabrication of the samples, while the Russian team carried out all theoretical investigations. Moreover, the Russian team has improved experimental skills, and the Indian team has obtained some experience in theoretical study. The results of the work demonstrate that the RFBR-DST collaboration is vital not only for developing international scientific communications but also for developing Russian and Indian science as a whole. The potential of our collaboration is not exhausted so we look forward for its continuation.



## О сотрудничестве с индийскими учеными

Б.А. Аронзон

Наше сотрудничество с индийскими учеными началось со случайного приглашения на конференцию, которая проводилась в г. Мабалишавар в Индии. На этой конференции я познакомился с профессором В. Трипати из Тата, Института фундаментальных исследований, который находится в городе Мумбай и является одним из ведущих институтов в Индии, по крайней мере, в области физических исследований. Теперь, после целого ряда лет сотрудничества с профессором Трипати, обмена несколькими визитами и подробного знакомства с исследованиями, ведущимися в области физики твердого тела в Индии, в частности в этом институте и в Центре развития науки из города Калькутта, я убежден в огромной пользе этих контактов. Дело в том, что при общем низком уровне жизни населения на науку выделяются огромные средства и в этой области Индия начинает занимать передовые позиции.

В беседах с профессором Трипати мы обнаружили много общих интересов, а главное – взаимодополняющих возможностей. Мои экспериментальные результаты нуждались в теоретическом обосновании, а профессор Трипати хотел применить свои знания и умение проводить сложные численные расчеты к конкретным результатам. Мы оба были заинтересованы в области исследований, которая получила название «спинtronика».

Стремительное развитие микроэлектроники в последние тридцать лет, зачастую даже опережающее по своему темпу так называемый закон Мура, вызвало появление значительного числа аналитических обзоров, авторы которых предсказывают неминуемый и скорый кризис в этой области науки и промышленности; объем производства последней исчисляется десятками мил-

лиардов долларов. Увеличение объемов и скорости передачи информации приближается к пределу, связанному с принципиальными физическими ограничениями на дальнейшее уменьшение размеров активных элементов. Для развития электроники необходим поиск новых решений и принципов. Наличие у электрона двух квантовых характеристик – заряда и спина – открывает новые подходы и технологии передачи информации, в рамках которой для ее хранения и обработки будет использоваться не только заряд, но и спин электрона. Другая проблема современной электроники связана с тем, что производительность микропроцессоров и степень миниатюризации элементов электроники ограничиваются выделением тепла при их работе. Переход с зарядовых элементов на спиновые мог бы значительно уменьшить теплоизделие, а также увеличить скорость вычислений и уменьшить размеры вычислительных систем.

Спинtronика успешно развивалась в течение двух десятилетий, и к настоящему времени результаты привели к созданию новых элементов считывания и записи для компьютерных технологий, созданию целого ряда чувствительных элементов нового типа, и в перспективе – элементов энергонезависимой маг-



**АРОНЗОН  
Борис Аронович**  
НИЦ "Курчатовский институт"



нитной памяти и возможности отказаться от вращающихся жестких дисков. Такие элементы уже существуют (MRAM – magnetic random access memory) и обладают рядом принципиальных преимуществ по сравнению с широко распространенной flash-памятью. В перспективе спинtronика может привести к созданию принципиально новой элементной базы электроники.

Однако все эти преимущества нивелируются тем, что в настящее время элементы спинtronики изготавливаются из металлических ферромагнетиков. В отличие от полупроводниковых приборов для элементов, изготовленных из металлических материалов, отсутствует возможность управлять их свойствами с помощью слабых электрических сигналов (создавать транзисторные структуры). Это вызывает стремление к развитию полупроводниковой спинtronики. Такие работы ведутся довольно давно, но связаны они преимущественно с исследованиями объемных полупроводников, легированных магнитными примесями. Однако объемные материалы не вписываются в современную технологию электроники.

Взаимное понимание указанных проблем, интерес к их решению и комплементарность наших исследовательских возможностей побудили нас с профессором Трипати к решению этих вопросов в рамках совместной деятельности. В итоге в 2008 году нами был подана заявка в РФФИ на конкурс совместных международных проектов российско-индийского двустороннего сотрудничества. Проект поддержали



и наше сотрудничество было продолжено (проект № 09-02-92675-ИНД\_а «Влияние беспорядка и включений на транспортные и магнитные свойства разбавленных магнитных полупроводников», который продолжался в течение 2009 и 2010 годов). Работы по этому проекту проводились достаточно успешно и привели к публикации целого ряда статей. В отчете по этому проекту фигурирует девять публикаций, включая статьи в высокорейтинговых журналах, таких как Physical Review B, Journal of Applied Physics, Журнал экспериментальной и теоретической физики.

В последующие годы (2011 и 2012) мы опубликовали еще ряд статей, в частности в журнале Physical Review B. Эти работы посвящены разработке и обнаружению двумерных ферромагнитных полупроводниковых гетероструктур на основе обычных полупроводников с квантовым каналом проводимости и отдаленным от него слоем магнитной примеси. Такие системы также могут управляться с помощью затворного электрода и характеризуются подвижностью носителей заряда, на порядки превышающей подвижность обычных магнитных полупроводников. Данное направление науки стало прорывным и развивалось сперва в основном участниками нашего российско-индийского коллектива ученых.

Как следствие этих работ, в 2012 году нами была подана новая заявка на грант РФФИ в рамках двустороннего российско-индийского сотрудничества. Наш проект (№ 13-02-92694 ИНД\_а «Спин-зависимые явления в квазидвумерных структурах



и пленках с магнитными примесями») также получил поддержку РФФИ (2013 и 2014 годы). В настоящее время этот проект завершен, и отчет по нему рассматривается в РФФИ.

В ходе этого проекта был проведен анализ природы установления магнитного упорядочения и спиновой поляризации носителей заряда в системах квантовый канал проводимости (квантовая яма) — отдаленный слой магнитной примеси. Также нами исследована природа аномального эффекта Холла и его механизм, определяющий величину этого эффекта в упомянутых образцах. Аномальный эффект Холла — это электрическое напряжение, возникающее в материале в направлении, перпендикулярном направлению протекания тока. В отличие от обычного эффекта Холла, в случае аномального эффекта Холла это напряжение возникает в ферромагнитных материалах не вследствие действия внешнего магнитного поля, а в результате наличия в материале намагниченности. Это важный инструмент исследования спинtronных свойств, поскольку позволяет обычными, простыми электрофизическими методами исследовать наличие спиновой поляризации электронов, точнее говоря, носителей заряда в материале.

В ходе этих исследований нами обнаружено новое явление — смена знака аномального эффекта Холла при изменении температуры и неизменном типе носителей заряда — и экспериментально продемонстрирована определяющая роль активно обсуждаемого, так называемого собственного (*intrinsic*) механизма аномального эффекта Холла, что является первым экспериментальным наблюдением его в квазидвумерной структуре. Была разработана методика выявления аномального эффекта Холла на фоне присутствия нескольких эффектов иной природы, маскирующих проявление исследуемого явления и исследовано влияние концентрации носителей заряда на магнитные свойства полупро-

водников с магнитными нанокластерами. На основе этих результатов опубликованы семь статей и сделано несколько докладов на международных форумах.

В настоящее время наше сотрудничество активно продолжается и включает в себя все новых и новых исследователей и, соответственно, наша группа разрастается.

Новым и перспективным направлением нашего сотрудничества становится деятельность по исследованию топологических изоляторов. Это совсем недавно обнаруженный новый тип материалов, которые отличаются тем, что на их поверхности возникает двумерный топологически защищенный канал проводимости с высокой концентрацией спин-ориентированных носителей заряда, которые обладают чрезвычайно высокой подвижностью. Это определяет высокие проводящие свойства таких материалов, которыми возможно управлять с помощью затворного электрода, как в обычном полевом транзисторе. С другой стороны, в этих системах можно управлять направлением спиновой поляризации носителей и, следовательно, их магнитными свойствами.

Я заинтересован в дальнейшем сотрудничестве с индийскими коллегами, и его будущее мне представляется весьма перспективным.

## Summary

This paper is the ten-year story of the Russian-Indian collaboration between two scientific groups from Russia and India supported by the RFBR and DST, which turned out to be very fruitful. During this period we have published 7 papers in famous international physical journals with high impact-factor and presented our results at many various

international conferences as invited and plenary reports. Just now we are continuing our collaboration supported by the Russian Ministry of Education and Science. When this grant will be finished, we are going to apply for a new RFBR grant, because such type of support is more efficient, in our opinion, for fundamental investigations.



# Исследование высокоэнергичных космических взрывов в рамках российско-индийского научного сотрудничества Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента науки и технологий в 2008–2013 гг.

*В.В. Соколов, Ш.Б. Пандей*

## Введение

В конце своей эволюции массивные звезды (с массой  $> 8 M_{\text{Sun}}$ ) претерпевают разрушительный взрыв, вызванный гравитационным коллапсом их ядра. Двойные компактные звезды (белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры) также могут испытать подобный взрыв при некоторых условиях. В этих процессах огромное количество энергии (от  $10^{50}$  до  $10^{55}$  эрг) высвобождается за несколько секунд. Наблюдаемым следствием подобных взрывов являются такие высокоэнергичные явления, как гамма-всплески и сверхновые. Массивные сверхновые (Core-collapse SNe, CCSNe) являются, в целом, однородным классом объектов, которые дают широкий ряд энергий взрыва и скоростей расширения и разбиваются на типы Пр, IIp, I Ib и Ib/c согласно спектральной классификации [1]. Энергетика подкласса массивных сверхновых (CCSNe) сравнима с энергетикой гамма-всплесков, хотя выбрасываемая масса и масштаб времени совершенно различны. Эти взрывы представляют собой плохо изученную проблему в астрофизике и вызывают большой научный интерес [2-6].

## Совместные проекты по сотрудничеству РФФИ–ДНТ

При поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ, Россия) и Департамента науки и технологий (ДНТ, Department of Science and Technology, DST, Индия) было проведено несколько совместных исследований, наилучшим образом использующих астрономические наблюдательные возможности двух стран. В рамках этого сотрудничества с российской стороны главным наблюдательным инструментом был 6-метровый телескоп и другие телескопы метрового класса Специальной астрофизической обсерватории, а с индийской стороны для сбора необходимых данных использовались 1.04-метровый телескоп Сампурнананд, 1.3-метровый оптический телескоп Девастал, 2.0-метровый телескоп HCT (рис. 1).

В 2008–2010 гг. был выполнен российско-индийский проект (проект РФФИ № 08-02-91314-ИНД\_a, DST-проект RUSP-836) под названием «Спектрополическое и фотометрическое исследование сверхновых типа Ib/c в контексте связи между гамма-всплесками и сверхновыми» (научные руководители: доктор Ш.Б. Пандей, институт ARIES, г. Наинитал, Индия (Dr. S.B. Pandey, ARIES, Nainital, India) и д.ф.-м.н. В.В. Соколов (Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН), Россия), а вторая часть заявки по той же научной теме была успешно выполнена с 2011 по 2013 г. под названием «Спектральный и фотометрический мониторинг послесвечений гамма-всплесков, массивных сверхновых и их родительских галактик» (научные руководители:



**СОКОЛОВ  
Владимир Владимирович**  
Специальная астрофизическая  
обсерватория РАН



**ПАНДЕЙ  
Шаши Бхушан**  
Институт наблюдательных наук  
им. Ариабхатты

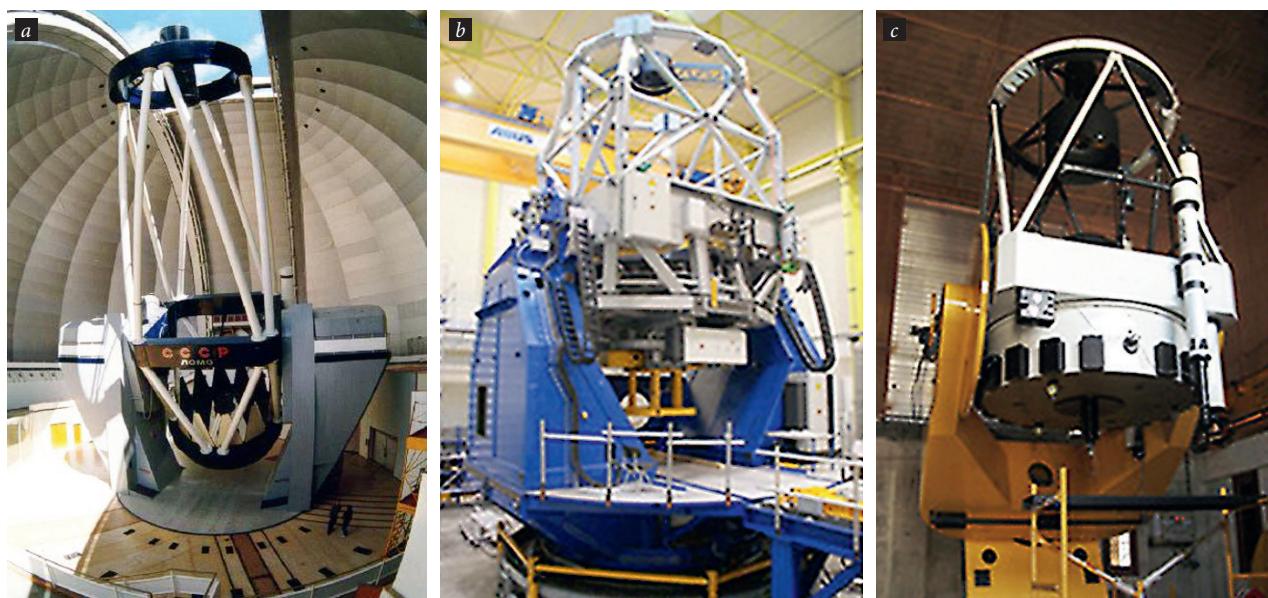


Рис 1. а — 6-метровый телескоп САО РАН, б — 1.3-метровый телескоп, установленный в Devasthal, Индия, с — 3.6-метровый телескоп в Devasthal, Индия.

доктор Ш.Б. Пандей, институт ARIES, г. Наинитал, Индия и д.ф.-м.н. В.В. Соколов, САО РАН, Россия) (проект РФФИ № 11-02-92696-ИНД\_а). Для укрепления двустороннего сотрудничества между исследователями двух стран 2-4 марта 2011 г. в институте ARIES (Наинитал, Индия) было проведено совместное совещание «Гамма-всплески, эволюция массивных звезд и звездообразование на больших красных смещениях».

### Послесвечения гамма-всплесков

Гамма-всплески (GRBs) — это короткие (от  $10^{-3}$  до  $10^3$  с) всплески гамма-излучения ( $\sim 10$  кэВ —  $10$  ГэВ), открытые спутниками серии VELA, предназначенными для исследования наземного гамма-излучения [7]. Классификация гамма-всплесков зависит от таких наблюдательных свойств, как длительность

короткого излучения, жесткость наблюдаемого спектра и т.п., указывающих на различные источники излучения [8,9], способные произвести изотропную энергию порядка от  $10^{50}$  до  $10^{55}$  эрг. Поток ультраквазаров, излученной в виде гамма-лучей, преобразуется в излучение. Это преобразование энергии происходит из-за каких-то внутренних процессов, например внутренних ударных волн и столкновений внутри потока [10,11]. Однако не вся энергия релятивистской оболочки может быть преобразована в излучение внутренними ударными волнами. Остальная кинетическая энергия рассеивается через внутренние ударные волны, которые могут произвести послесвечения, видимые на разных длинах волн [12,13]. Одна из моделей гамма-всплеска представлена на рисунке 3.

В отличие от очень кратковременного излучения самого гамма-всплеска, продолжительность излучения его послесвечения намного больше, его можно наблюдать на разных частотах существенно



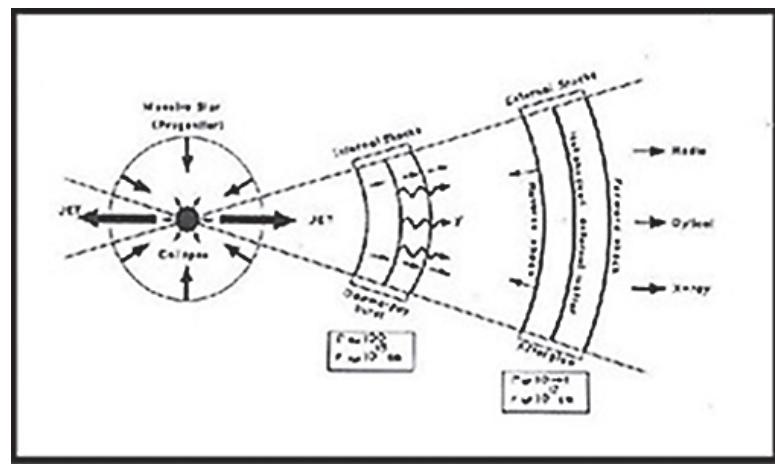
Рис. 2. Руководители совместных российско-индийских проектов Ш.Б. Пандей и В.В. Соколов.



более длительное время, и оно дает огромное количество информации о природе прародителей и его физическом механизме. Послесвечения гамма-всплесков на оптических частотах дают существенную информацию о механизмах излучения и природе возможных прародителей. Преимущественное положение Индии по долготе очень важно для оперативных наблюдений этих ограниченных по времени космических взрывов. Многоволновые оптические фотометрические данные по послесвеченям вместе с наблюдениями на других частотах помогут ответить на некоторые нерешенные проблемы с этими космическими взрывами.

### **Массивные сверхновые и гамма-всплески**

Появляется все больше данных о том, что некоторые гиперэнергичные сверхновые типа Ib/c (которые также называют гиперновыми) имеют фотометрическую и спектроскопическую связи с близкими длинными гамма-всплесками (с красным смещением от 0.0085 до 1.0): GRB 980425/SN 1998bw [14]; GRB 020903/SN 1998bw type [15]; GRB 021211/SN 2002lt [16]; GRB 030329/SN 2003dh [17]; GRB 031203/SN 2003lw [18]; GRB 050525A/SN 2005cn [19]; GRB 060218/SN 2006aj [20]; XRF 080109/SN 2008D [21]; GRB 091127/SN 2009nj [22]; XRF 100316D/SN 2010bh [23]. Наиболее приемлемым объяснением длинных [2,3] гамма-всплесков является коллапс ядра массивной звезды; при этом возникает естественное основание для проверки возможного непрерывного характера этих высокоэнергичных взрывов с экстремальными физическими механизмами.



*Рис. 3. Схема модели файербола, в которой гамма-всплеск объясняется внутренними ударными волнами, а послесвечения — внешними ударными волнами из релятивистского джета, порожденного коллапсом массивной звезды. Такие же джеты могут возникать и в других моделях прародителя.*

Существует также категория плохо изученных гиперновых типа Ib/c, для которых нет наблюдательных свидетельств их связи с гамма-всплесками, например SN 1994I, SN 1997ef, SN 1999 as, SN 2002ap, SN 2003jd, SN 2005ap, SN 2007gr [24,25]. Наблюдаемая частота событий типа Ib/c намного больше, чем событий GRB в локальной вселенной, и после применения коррекции с учетом биминга (концентрации излучения в пучок) оказывается, что с гамма-всплесками ассоциированы не более 4% этих сверхновых. Эта численная статистика вынуждает нас задать вопрос, является ли эта ассоциация просто эффектом угла зрения или существует какая-то корреляция между объектами типа GRBs-XRFs и CCSNe.

### **Основные научные результаты, полученные по совместным проектам РФФИ-ДНТ**

В этом разделе описаны основные результаты, полученные в 2008-2010 и 2011-2013 гг. по совместным проектам, — открытие новых сверхновых, оптического фотометрического и спектроскопического отслеживания длинных гамма-всплесков и массивных сверхновых, что важно для текущего понимания природы этих высокоэнергичных взрывов и эволюции массивных звезд.

#### **2008-2010 гг.**

Исследование массивных сверхновых очень важно не только для понимания экстремальных физических механизмов конечных стадий эволюции массивных звезд, но и для того, чтобы узнать

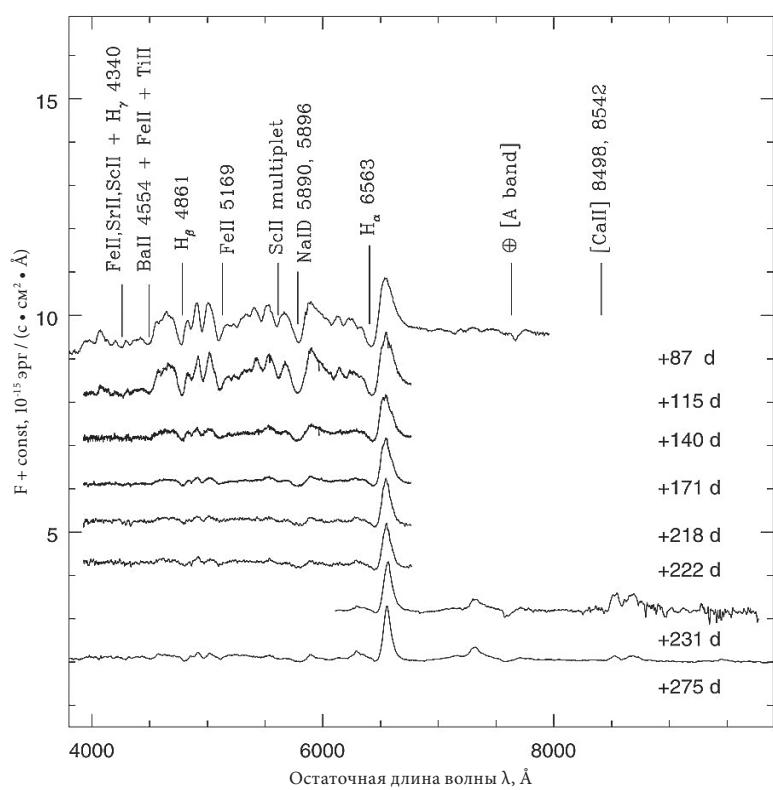


Рис. 4. Исправленные с учетом Допплер-эффекта спектры сверхновой SN 2008gz от позднего плато (+87 дней) до небулярной фазы (+275 дней). Отмечены выделяющиеся линии водорода и металлов. Спектры, полученные в CAO через 231 день, показаны наряду с другими спектрами SN 2008gz.

историю звездообразования на космологических расстояниях. Взрывы звезд — одна из наименее изученных областей астрофизики. В данном двустороннем проекте, озаглавленном «Спектроскопическое и фотометрическое исследование сверхновых типа Ib/c в контексте связи между гамма-всплесками и сверхновыми», мы в институте ARIES наблюдали более десятка массивных сверхновых (типов Ib/c и IIp) на телескопе 1.04m Samapurnanand, включая очень интересные сверхновые, например SN 2008D (тип Ic), SN 2008 gz (тип IIp), SN 2008in (тип IIp), SN 2009de (тип Ic), SN 2009jf (тип Ib) на малых и средних красных смещениях. Кроме того, используя российские возможности, был проведен фотометрический мониторинг еще семи массивных сверхновых других типов, в том числе сверхновой SN 2009de типа Ic. Из более чем 10 вышеупомянутых фотометрически промониторенных сверхновых спектроскопический мониторинг более шести сверхновых был выполнен на российском шестиметровом телескопе в очень поздние фазы. По этой заявке мы также приняли участие в открытии сверхновых SN 2009db, SN 2009du-SN 2009dy и SN 2009ew [26-28]. Ранние спектры этих сверхновых были

также получены на других телескопах Индии и других стран. Спектроскопические наблюдения и моделирование этих сверхновых позволило определить их тип, красное смещение, эволюцию выброшенной материи, а также в двух случаях проявление ветровой оболочки.

Фотометрические и спектроскопические свойства близкой массивной сверхновой Пр-типа SN2008gz [29] похожи на свойства хорошо изученных сверхновых Пр-типа SN 2004et и SN 1999em. Моделирование с кодом SYNOW и прямое измерение по абсорбционным линиям в спектральных данных дало фотосферную скорость  $\sim 4000$  км/с через 87 дней, что является одним из самых больших значений, наблюдавшихся для сверхновых типа Пр. Для сверхновой SN 2008gz оценка энергии взрыва равна  $2\text{-}3 \cdot 10^{51}$  эрг/с, что, наряду с шириной запрещенной линии OI, дает верхний предел для массы звезды-праородителя на главной последовательности  $\sim 17$  масс Солнца. Наблюдения в линии  $H_\alpha$ , выполненные примерно через 560 дней после взрыва, показывают, что событие произошло в протяженных рукавах низкой светимости со звездообразованием и очень близко к области H-II, что свидетельствует о происхождении массивной звезды (рис. 4).

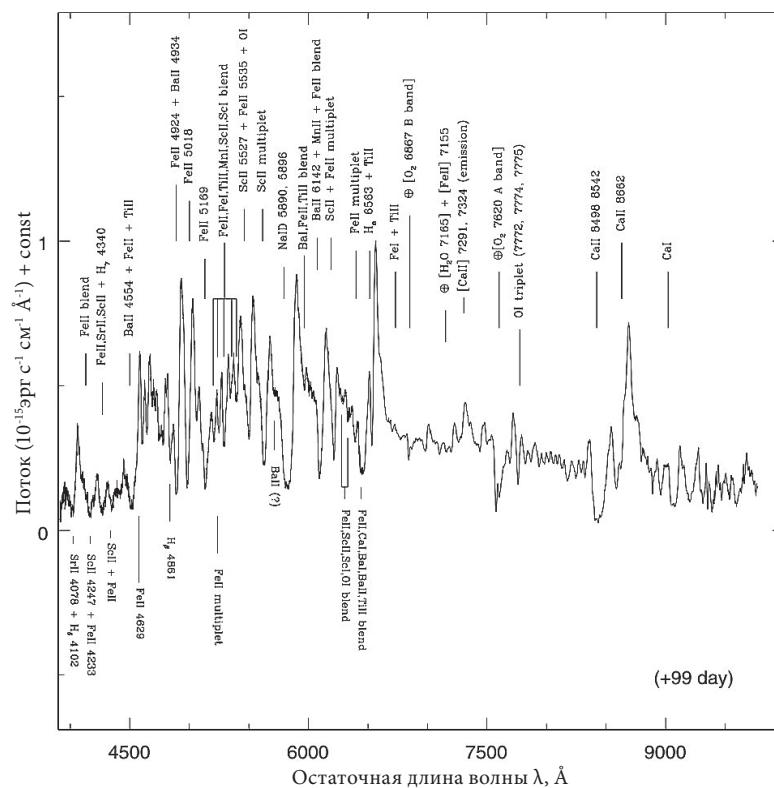
Подобным же образом подробное многоволновое исследование сверхновой Пр-типа SN 2008in [30] и ее сравнение с другими похожими сверхновыми выявило, что эти события Пр-типа показывают некий диапазон светимостей. Сверхновая SN 2008in принадлежит к классу сверхновых типа Пр довольно низкой светимости. SN 2008in была открыта



на ROTSE-IIIb в обсерватории McDonald и длительное время отслеживалась в радио-, ультрафиолетовом (УФ), оптическом, инфракрасном (ИК) и рентгеновском диапазонах на наземной и спутниковой аппаратуре (рис. 5). По оптическим кривым блеска этой сверхновой с использованием наблюдений открытия, время выхода ударной волны было оценено как  $3.2 \pm 2$  дня, что редко наблюдается для таких событий. Светимость кривой блеска в небулярной фазе показывает, что масса выброшенного  $^{56}\text{Ni}$  составляет 0.015 масс Солнца, что в два раза больше, чем для сверхновых Пр-типа низкой светимости. По наблюдаемым свойствам УФ-оптико-ИК-кривых блеска и спектров, а также верхним пределам, полученным по XRT-наблюдениям, был получен предел скорости потери массы предсверхновой  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  масс Солнца/год с погрешностью с фактором 2-3. Оцененное значение энергии взрыва  $5.4 \cdot 10^{50}$  эрг сверхновой SN 2008in меньше, чем для нормальных событий типа Пр ( $> 10^{51}$  эрг), а верхний предел для масс звезд-прародителей главной последовательности оценивается как 20 масс Солнца.

Фотометрический мониторинг видимого невооруженным глазом гамма-всплеска GRB 080319B выявил, что такие яркие всплески очень редки и имеют сложную структуру джета (*рис. 6*) [33]. Мы представили наблюдения послесвечения GRB 080319B в радио- миллиметровом и оптических частотах. Моделирование одновременного многочастотного послесвечения полезно для наложения ограничений на природу

механизма излучения всплеска и окружающей среды. Мы обнаружили, что послесвечение GRB 080319B согласуется с расширением файербола либо в межзвездную среду, либо в окружающую среду звездного ветра. Мы также исключили модель двойного джета из правильно-го объяснения наблюданого многополосного поведения послесвечения. На основе предположений нашей модели, мы смогли достаточно хорошо объяснить радио- и оптическое послесвечение, но не смогли объяснить рентгеновское послесвечение. Возможно, что оптическое и рентгеновское послесвечение имеют разные источники. По эволюции послесвечения оценили Лоренц-фактор ударной волны. По экстраполяции более поздней оценки яркости было найдено, что Лоренц-фактор в то время, когда источник был виден невооруженным глазом, равен  $\sim 300$ . Соответствующий радиус фронта ударной волны равен примерно  $10^{17}$  см. Мы также показали, что ранний пик яркости послесвечения не может быть вызван обратной ударной волной. Требуется дополнительный механизм излучения, например, внутренние ударные волны. Наши результаты также свидетельствуют о том, что необходимо модифицировать существующие модели послесвечения ударной волны ввиду сложного поведения, полученного для наблюдавших послесвечений. Подроб-



**Рис. 5.** На этом рисунке показан спектр сверхновой SN 2008in, полученный в САО через +99 дней, а также отождествления линий в спектре поздней плато-фазы (+99 дней). Спектральные линии отождествлялись в основном по ранее опубликованным отождествлениям для сверхновых типа IPr [31,32]. Теллурические линии обозначены знаком «⊕».



## 10-ЛЕТИЕ СОТРУДНИЧЕСТВА РФФИ И ДНТ В ПОДДЕРЖКЕ РОССИЙСКО-ИНДИЙСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

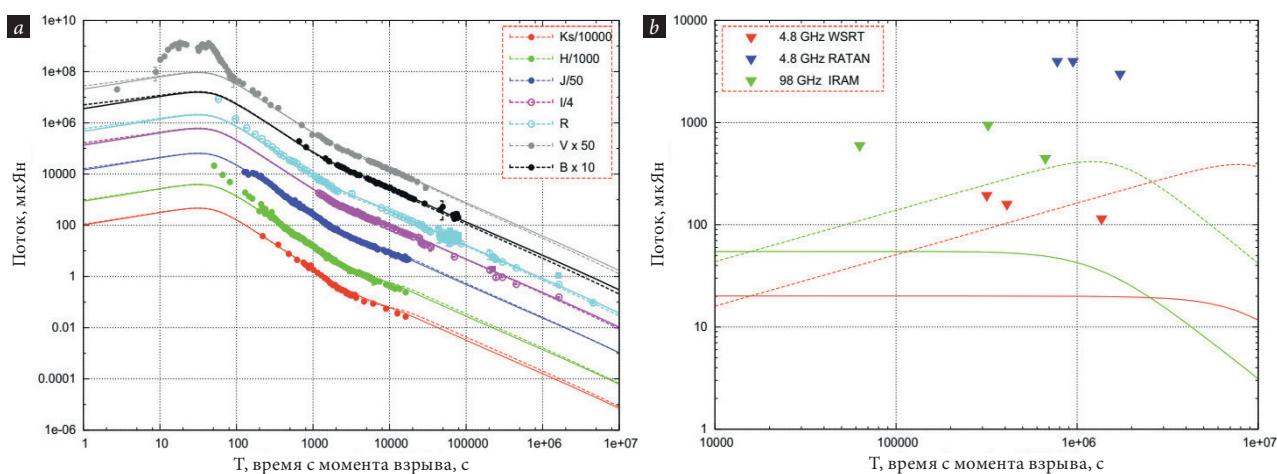


Рис. 6. Кривые блеска послесвечения GRB 080319B: послесвечение в ближнем оптическом ИК- и рентгеновском диапазонах (а) и радиоданные (б). Текущие оптические наблюдения изображены вместе с другими опубликованными оптическими и рентгеновскими данными. Для подгонки кривых блеска послесвечения использована модель FS-RS. Сплошными линиями показана результирующая лучшая подгонка WM-модели, а пунктирной линией — лучшая подгонка ISM-модели.

ное исследование таких близких событий в ближайшем будущем поможет полностью понять связь между гамма-всплесками и сверхновыми.

### Индийско-российское совещание 2011 г.

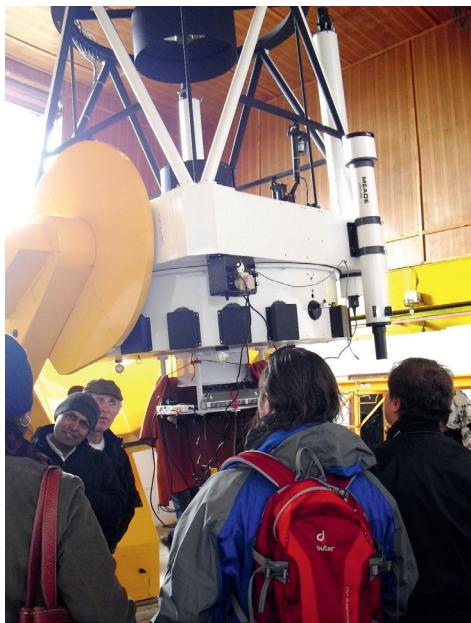
В ходе продолжающегося сотрудничества между индийскими и российскими специалистами, работающими по этой теме, 2-4 марта 2011 г. в институте ARIES (Наинитал, Индия) было проведено совещание «Гамма-всплески, эволюция массивных звезд и звездообразование на больших красных смещениях» в рамках торжеств, посвященных введению в эксплуатацию 1.3-метрового телескопа в Девастал (Наинитал) (рис. 7 и 8). Целью совещания был обзор достижений в данной области, мотивация молодых ученых и общение российских и индийских исследователей для укрепления продолжающегося

сотрудничества. Запланированный 3.6-метровый телескоп, а также вспомогательное оборудование первого поколения и их совместное использование с ASTROSAT дают Индии уникальную возможность более детальных исследований в этой области.

На совещании было представлено много приглашенных и рабочих докладов, больше времени было отведено на дискуссии, представлено также несколько стеновых докладов. Состоялась экскурсия на недавно установленный 1.3-метровый телескоп в Девастал. Кроме российских делегатов, в совещании принимали участие



Рис. 7. Участники Индийско-российского совещания 2-4 марта 2011 г. в ARIES Наинитал.



*Рис. 8. Рабочий момент совещания.*

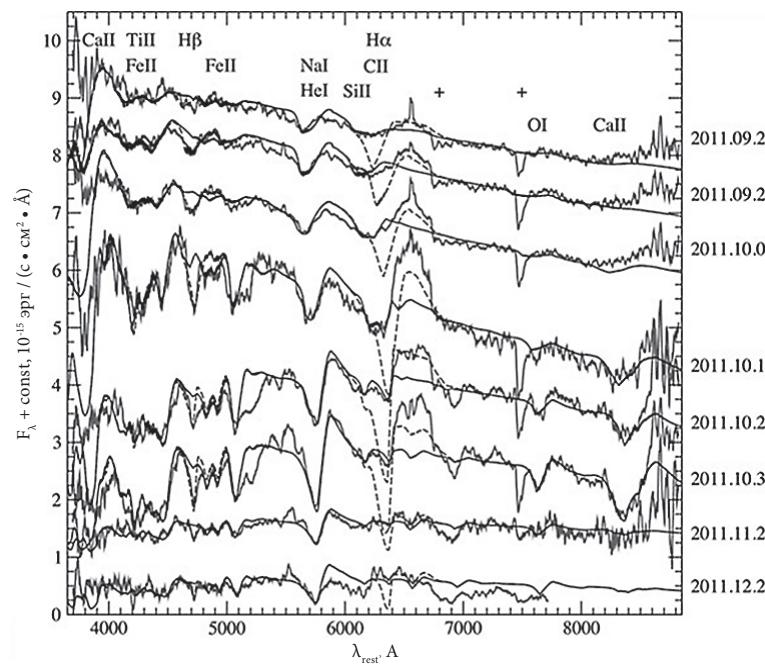
многие ученые из других институтов Индии. Труды совещания содержат большую часть докладов, представленных на совещании. Мы благодарим ДНТ и РФФИ за финансовую поддержку организации совещания, а также научный и местный организационные комитеты за помощь и поддержку.

2011-2013 гг.

В этой заявке главной целью были кандидаты в транзиенты, включая сверхновые из широко известных обзоров неба Catalina Real-time Transient Survey (CRTS), Palomar Transient Factory (PTF), Swift и Fermi. Фотометрический мониторинг этих объектов осуществлялся с помощью оптических возможностей института ARIES Наинитал (1.04-метровый телескоп Смапурананд и недавно начавший работу 130-см телескоп в Девастал), обеспечившие плотное временное покрытие на разных длинах волн. Данные этих наблюдений были проанализированы с использованием стандартных и собственных программ для получения важной информации о природе

затухания во времени, максимальной светимости, эволюции цвета и ослаблении окружающей среды этих высокоэнергичных взрывов. Информацию фотометрических наблюдений использовали вместе с поляриметрическим и спектроскопическим мониторингом этих объектов (начиная с максимальной яркости до небулярной фазы), полученным со спектрографа SCORPIO в фокальной плоскости шестиметрового телескопа CAO и FOCS на двухметровом телескопе HCT в Индии. Для моделирования спектроскопических данных использовали код SYNOW, а также пользовательскую разработанную программу для анализа спектров [34].

Были выполнены спектроскопические исследования низкого разрешения и широкополосные фотометрические исследования в фильтрах UBVRI сверхновой I<sub>b</sub>-типа SN 2011fu, открытой в UGC 01626 (*рис. 9*) [35]. Фотометрическое отслеживание этого события началось через несколько дней после взрыва и длилось примерно 175 дней. Кривая блеска в ранней фазе показала подъем, затем крутой спад во всех полосах и проявила свойства, которые очень похожи на свойства SN 1993J с возможным обнаружением фазы адиабатического остывания. Моделирование квазиболометрической кривой блеска наводит на мысль, что у прародителя была протяженная ( $\sim 1 \cdot 10^{13}$  см),



**Рис. 9.** Эволюция спектров сверхновой SN 2011fu, снятых на шестиметровом телескопе CAO и двухметровом телескопе HCT (толстые серые кривые, слаженные с окном шириной 20 Å), с наложением моделей SYNOW. Главные модели показаны сплошными черными линиями. Модели с подгонкой по  $H_{\beta}$  изображены пунктирными черными линиями. Отмечены самые заметные ионы. Атмосферные линии отмечены знаком «+».

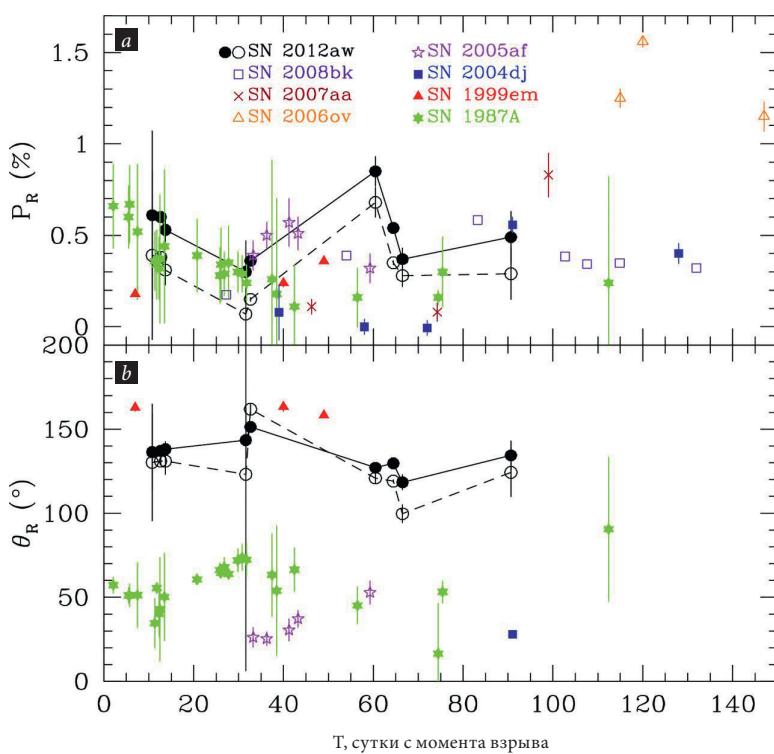


Рис. 10. Сравнение поляризации (a) и значений угла поляризации (b) сверхновой SN 2012aw по наблюдениям 1.04-метрового телескопа института ARIES (Индия) с теми же параметрами других сверхновых типа Пр: SN 1987A, SN 1999em, SN 2004dj, SN 2005af, SN 2006ov, SN 2007aa и SN 2008bk. Все значения указаны для конкретных сверхновых, обозначения на рисунках одинаковы. Толстые и изломанные линии обозначают соответственно вычлененные компоненты  $ISPM_{MW}$  и обоих ( $ISPM_{MW} + ISPM_{HG}$ ) для SN 2012aw.

маломассивная ( $\sim 0.1 M\odot$ ), богатая водородом оболочка над компактным ( $\sim 2 \cdot 10^{11}$  см), более массивным ( $\sim 1.1 M\odot$ ) ядром с богатым содержанием гелия. Было найдено, что масса никеля, синтезированного во время взрыва, равна  $\sim 0.21 M\odot$ , что немного больше, чем для других сверхновых типа IIb. Моделирование спектра с кодом SYNOW свидетельствует о том, что в ранней фазе скорости в линиях H и Fe II были  $\sim 16000$  и  $\sim 14000$  км/с соответственно. Затем скорости падали в течение 40 дней, а позднее стали почти постоянными.

В статье [36] было выполнено подробное широкополосное поляриметрическое исследование сверхновой SN 2012aw (рис. 10). Результаты основаны на поляриметрических следящих наблюдениях в полосе R этой близкой ( $\sim 10$  Мпк) сверхновой SN 2012aw типа Пр. Эти наблюдения, начатые примерно через 10 дней после взрыва сверхновой, охватывают  $\sim 90$  дней (время фазы плато) и распределены на девять эпох. Чтобы охарактеризовать межзвездную поляризацию Млечного Пути ( $ISPM_{MW}$ ), мы провели наблюдения 14 звезд поля, находящихся в радиусе  $10^\circ$  вокруг сверхновой. Мы попытались также вычесть компоненту пылевой поляризации родительской галактики, предполагая, что свойства пыли родительской

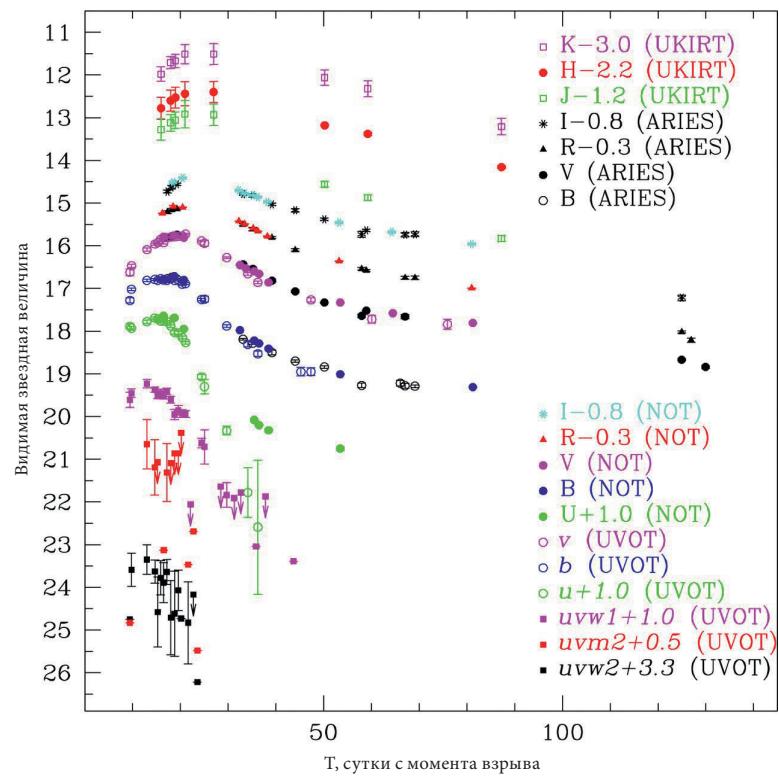
галактики похожи на то, что наблюдается для пыли нашей Галактики, а общее магнитное поле идет вдоль крупномасштабной структуры спиральных рукавов галактики. После исправления  $ISPM_{MW}$  наш анализ показал, что максимальная поляризация SN 2012aw равна  $0.85 \pm 0.08\%$ , но угол поляризации не показывает больших изменений при средневзвешенном значении  $\sim 138^\circ$ . Однако, если вычесть поляризационные компоненты  $ISPM_{MW}$  и родительской галактики из наблюдаемой поляризации сверхновой, то максимальная поляризация сверхновой становится равной  $0.68 \pm 0.08\%$ . Похоже, что параметры Стокса  $Q$  и  $U$  распределены вдоль петлеобразной структуры. Эволюция поляриметрических свойств кривой блеска этого события также при сравнении с другими хорошо изученными массивными сверхновыми подобного типа.

Сверхновые типа Ibcs редки, и подробные характеристики этих взрывов изучены только для нескольких событий. В отличие от прародителей сверхновых типа II, прародители сверхновых типа Ibcs никогда не обнаруживались на снимках до взрыва. Поэтому, чтобы понять природу их прародителей и характеристики взрывов, необходимо исследовать близкие события. Здесь представлены результаты многоволновых наблюдений сверхновой типа Ib SN 2007uy в близкой ( $\sim 29.5$  Мпк) галактике NGC 2770 (рис. 11). Анализ фотометрических наблюдений выявил, что это высокоэнергичное событие с максимальной абсолютной величиной в полосе R, равной  $-18.5 \pm 0.16$ , что на одну величину больше, чем среднее значение



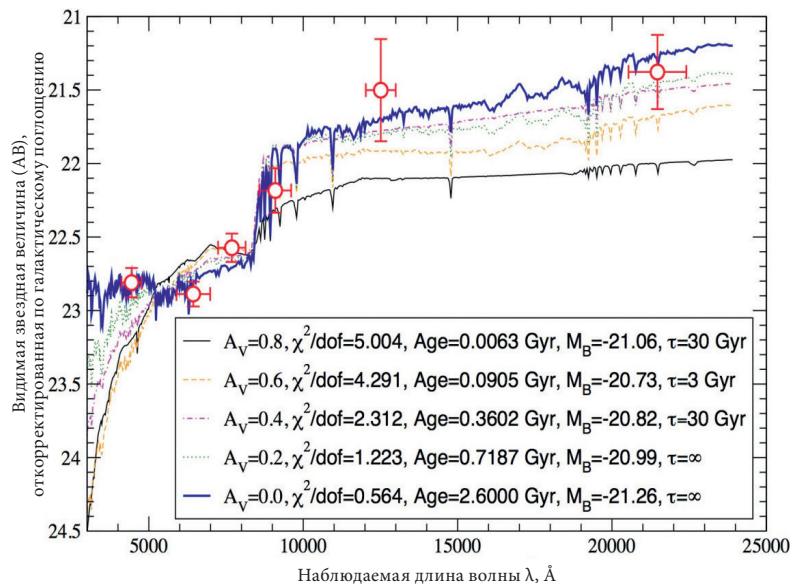
( $-17.6 \pm 0.6$ ), полученное по хорошо наблюдаемым событиям типа Ib/c. Эта сверхновая была сильно ослаблена, галактическое поглощение равно  $E(B-V) = 0.63 \pm 0.15$  зв.вел. в основном из-за вещества переднего фона, присутствующего в родительской галактике. По моделированию оптической кривой блеска мы определили, что было произведено около  $0.3 M_{\odot}$  радиоактивного  $^{56}\text{Ni}$ , и примерно  $4.4 M_{\odot}$  вещества было выброшено во время взрыва, высвободив энергию  $\sim 15 \cdot 10^{51}$  эрг, что указывает на то, что событие было высокoenергичным. По оптической спектроскопии мы заметили явную асферичную эволюцию нескольких областей формирования линий, но не было видно никакой тенденции к асимметрии  $^{56}\text{Ni}$  внутри выбросов. Взаимодействие ударной волны сверхновой с окружающим веществом (CSM) явно заметно при радиослежении, представляя кривую блеска, где доминирует синхротронное самопоглощение (SSA), с вкладом свободно-свободного поглощения (FFA) на ранних стадиях. Предположив, что прародителем является звезда Вольфа—Райе (WR) со скоростью ветра  $\sim 10^3$  км/с, мы вывели нижний предел скорости потери массы, полученный по радиоданным, равный  $\sim 2.3 \cdot 10^{-1} M_{\odot}/\text{год}$ , что согласуется с результатами для других сверхновых типа Ib/c, ярким на радиочастотах [37].

В рамках этого проекта очень подробно была исследована темная природа гамма-всплеска GRB 130528A (*рис. 12*) [38]. В этой работе мы показали, что темнота длинного «темного» гамма-всплеска GRB 130528A была, по-видимому, вызвана сильным поглощением



**Рис. 11.** Кривые блеска сверхновой SN 2007uy в ближнем инфракрасном диапазоне JHK, оптическом диапазоне UVBVR, а также  $uvw2$ ,  $uvm2$ ,  $uvw1$  и  $u, b, v$  NUV-оптических UVOT-полосах, включающие данные 1.04-метрового телескопа в Наинитал.

близко от места его рождения, в галактике на красном смещении  $z = 1.25$ , что было установлено благодаря миллиметровому обнаружению на PdBI. На основе оптических/NIR-наблюдениях



**Рис. 12.** Спектральное распределение энергии (SED) родительской галактики GRB 130528A в полосах  $B, r, i, z, J$  и  $K_s$ . Величины  $AB$  скорректированы с учетом галактического поглощения  $E(B - V) = 0.144$  [39], включая данные, полученные на шестиметровом телескопе CAO. Толстая линия показывает лучшую подгонку ( $\chi^2/\text{степени свободы} = 0.564$ ), полученную при  $A_v = 0$ , возрасте звездного населения 2.6 млрд. лет,  $M_b = -21.16$  и солнечной металличности. Остальные линии показывают эволюцию SED-подгонки при постепенном увеличении  $A_v$  от 0 до 0.8. Видно, что с ростом  $A_v$  подгонка ухудшается.



родительской галактики на телескопах Gran Telescopio CANARIAS (GTC, Большой Канарский телескоп), William Herschel Telescope (WHT, телескоп им. Вильяма Гершеля), Большой телескоп азимутальный (БТА, САО РАН) и Very Large Telescope (VLT, Очень большой телескоп), мы установили, что событие GRB 130528A произошло в старой (доминирующий возраст звездного населения 2.6 млрд лет), красной ((R-K)AB = 1 : 54) и яркой (MB = 21 : 16) галактике с низким поглощением ( $AV \approx 0$ ). Однако эта родительская галактика отличается от большинства родительских галактик длинных гамма-всплесков и по характеристикам близка к самым пыльным родительским галактикам, показанным в последних статистических исследованиях. По миллиметровым и инфракрасным наблюдениям на PdBI и 1.5-метровом телескопе OSN почти в те же эпохи, мы обнаружили, что сравнительное ослабление вдоль луча зрения на GRB 130528A (который является AGRBV0) равно девяти зв.вел. в системе покоя. Мы также показали, что этот результат согласуется с ожидаемым ослаблением из системы покоя (NH<sub>X</sub>). Противоречие между существенным ослаблением, ожидаемым из SED-модели послесвещения, и низким внешним ослаблением, определенным по SED родительской галактики, можно объяснить, если гамма-всплеск находится в среде с высокой плотностью, например локальном молекулярном облаке.

### Заявки на телескопы и наблюдательное время

В рамках индийско-российского сотрудничества и программ, выполненных в 2008-2010 и 2011-2013 гг., были выработаны заявки на наблюдательное время в обычном режиме и режиме незапланированной цели (Target of Opportunity). Время на телескопах, полученное на конкурсной основе, использовалось для получения фотометрических и спектроскопических данных и в Индии, и в России. Данные по некоторым сверхновым и послесвещениям гамма-всплесков еще анализируются и будут опубликованы в совместных статьях. Вот некоторые заявки, принятые в Индии в рамках индийско-российского сотрудничества:

1. Исследование массивных сверхновых, гамма-всплесков и их прародителей на 1.3-метро-

вом, 1.04-метровом, 2.0-метровом телескопах НСТ в Бангалоре ПА и ARIES (Наинитал) (основной заявитель Ш.Б. Пандей) во время циклов 2009 А,В,С, 2010 А,В,С; 2011 А,В,С, 2012 А,В,С, 2013 А,В,С около 50 ночей на фотометрию и спектроскопию.

2. Исследование поляриметрии и кривых блеска массивных сверхновых в ARIES (Наинитал) (основной заявитель Браджеш Кумар) в течение 2012 В,С и 2013 А,В, 20 ночей.
3. Мониторинг сверхновых и исследование их родительских галактик (основной заявитель Ш.Б. Пандей) на 6-метровом телескопе САО в течение 6 ночей в 2012-2013 и много других наблюдательных ночей на телескопах метрового класса в России для фотометрии и спектроскопии.

### Человеческие ресурсы, обучение

Одной из ключевых целей российско-индийского сотрудничества при поддержке РФФИ-ДНТ было обучение людей для развития полученных навыков в наблюдательной астрономии. Возможностями этого продолжающегося сотрудничества воспользовалось несколько аспирантов и сотрудников с ученой степенью и в России, и в Индии. В Индии по крайней мере два аспиранта получили степень PhD, а двое прошли обучение по проекту. В рамках этого сотрудничества трое аспирантов защитили кандидатские диссертации в России.

Авторы благодарят Соколову Татьяну Николаевну за помощь в подготовке статьи.



## Список основных публикаций в рамках сотрудничества

1. A.J. Castro-Tirado, A. de Ugarte Postigo, T.A. Fatkhullin, V.V. Sokolov, S.B. Pandey, E. Sonbas, et al. "Flares from a candidate Galactic magnetar suggest a missing link to dim isolated neutron stars" *Nature. Letter.* 455, 506-509, 2008.
2. E. Sonbas, A.S. Moskvitin, T.A. Fatkhullin, V.V. Sokolov, A. Castro-Tirado, T.N. Sokolova, et al. "The stellar-wind envelope around the supernova XRF/GRB060218/SN2006aj — massive progenitor star" *Astrophysical Bulletin*, 2008, v. 63, No 3, pp. 228-244.
3. V.V. Sokolov "Gravitational collapse as the source of gamma-ray bursts". Collective monograph "Practical Cosmology", Proceedings of the International Conference "Problems of Practical Cosmology", 23-27 June 2008, St.-Petersburg, Russia, eds. Yu.Baryshev, I.Taganov, P.Teerikorpi, TIN, St.-Petersburg, 2008, Vol.1, pp. 295-303.
4. A.S. Moskvitin, E. Sonbas, I.V. Sokolov, T.A. Fatkhullin "Gamma-Ray Bursts and Practical Cosmology". Collective monograph "Practical Cosmology", Proceedings of the International Conference "Problems of Practical Cosmology", 23-27 June 2008, St.-Petersburg, Russia, eds. Yu.Baryshev, I.Taganov, P.Teerikorpi, TIN, St.-Petersburg, 2008, Vol.2, pp.228-238.
5. Tanvir, N.R.; Fox D.B.; Fatkhullin T.A.; Komarova V.N.; Moskvitin A.S.; et al. "A gamma-ray burst at a redshift of z~8.2", *Nature*, 461, 2009, 1254.
6. Moskvitin, A.S.; Sonbas, E.; Sokolov, V.V.; Fatkhullin, T.A.; Castro-Tirado, A.J., "Study of Envelope Velocity Evolution of Type Ib-c Core-Collapse Supernovae from Observations of XRF 080109 / SN 2008D and GRB 060218 / SN 2006aj with BTA", *Astrophysical Bulletin*, 65, 132 (2010)
7. S. Moskvitin, T.A. Fatkhullin, V.V. Sokolov et al., "Spectral and photometric monitoring of distant core-collapse supernovae in the SAO RAS", *Astrophysical Bulletin*, 65, 230 (2010)
8. Yu.V. Baryshev, I.V. Sokolov, A.S. Moskvitin et al., "Study of Faint Galaxies in the Field of GRB 021004", *Astrophysical Bulletin*, 65, 311 (2010)
9. Z. Cano, D. Bersier, C. Guidorzi, T.A. Fatkhullin, A.S. Moskvitin, V.V. Sokolov, et al.; "A tale of two GRB-SNe at a common redshift of z=0.54". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 413, Iss. 1, pp. 669-685; 2011
10. R. Roy, Brijesh Kumar, A.S. Moskvitin, T.A. Fatkhullin, Brajesh Kumar; K. Misra, V.V. Sokolov, S.B. Pandey, H.C. Chandola, Ram Sagar et al. "SN 2008gz — most likely a normal Type IIP event"; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 414, Iss. 1, pp. 167-183. 2011
11. R. Roy, Brijesh Kumar, S. Benetti, A. Pastorello, T.A. Fatkhullin, A.S. Moskvitin, Carl W. Akerlof, J. Craig Wheeler; V.V. Sokolov, , Brajesh Kumar, K. Misra, S.B. Pandey; N. Elias-Rosa, P.W.A. Roming; Ram Sagar et al. "SN 2008in — Bridging the Gap between Normal and Faint Supernovae of Type IIP", *The Astrophysical Journal*, Vol.736, Iss.2, article id. 76, 2011
12. C.C.Thöne; A.de Ugarte Postigo, A. Moskvitin, et al. "The unusual  $\gamma$ -ray burst GRB 101225A from a helium star/neutron star merger at redshift 0.33", *Nature*, Volume 480, Issue 7375, pp. 72-74, 2011.
13. C. Inserra, M. Turatto, A. Moskvitin, V. Komarova, V.V. Sokolov, T.N. Sokolova, et al. "The bright Type IIP SN 2009bw, showing signs of interaction", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 422, Issue 2, pp. 1122-1139, 2012.
14. V.V. Sokolov; The gamma-ray bursts, core-collapse supernovae and global star forming rate at large redshifts; in Proceedings of the Indo-Russian workshop Gamma-Ray Bursts, Evolution of Massive Stars and Star Formation at



- High Red Shifts, 2011 ARIES Nainital, ASI Conference Series, Vol.5, 15-28; 2012
15. A.S. Moskvitin, T.A. Fatkhullin, V.V.Sokolov and V.N.Komarova; Spectral and photometric monitoring of CCSNe at SAO RAS; in Proceedings of the Indo-Russian workshop Gamma-Ray Bursts, Evolution of Massive Stars and Star Formation at High Red Shifts, 2011 ARIES Nainital, ASI Conference Series, Vol.5, 103-114; 2012
16. V.N. Komarova, T.A. Fatkhullin, V.G. Kurt, Yu.A. Shibanov; Studies of Isolated Neutron Stars and Their Surroundings at the 6m Telescope of SAO RAS; in Proceedings of the Indo-Russian workshop Gamma-Ray Bursts, Evolution of Massive Stars and Star Formation at High Red Shifts, 2011 ARIES Nainital, ASI Conference Series, Vol.5, 141-148; 2012
17. Vinko J., Pandey S.B., et al., "Sn 2010kd — A Super-luminous, Pair-instability Supernova?" AAS, 2194, 3604, 2012
18. Brajesh Kumar, S.B.Pandey, D.K.Sahu, A.S.Moskvitin, G.C.Anupa, V.V.Sokolov, T.N.Sokolova, V.N.Komarova, et al.; Light curve and spectral evolution of the Type I Ib supernova 2011fu; MNRAS, Vol. 431, No. 1, pp. 308-321, 2013
19. A.S.Moskvitin, V.V.Sokolov, V.N.Komarova; "GRB-SN Connection in SAO RAS Observations"; in "Gamma-ray Bursts: 15 Years of GRB Afterglows". A.J.Castro-Tirado, J.Gorosabel and I.H.Park (eds.), EAS Publications Series, 61, 403; 2013
20. S.Bose, B. Kumar, et al. "Optical study of Type IIb supernovae 2011dh and 2012P"; ASI Conf. Ser., Vol. 9, pp 134, 2013.
21. S. Jeong, A.J. Castro-Tirado, S.B. Pandey, Ilya V. Sokolov, A.S. Moskvitin, et al., "The dark nature of GRB 130528A and its host galaxy", Astronomy & Astrophysics, Volume 569, id.A93, 2014.
22. J. Strader, L. Chomiuk, E. Sonbas, A. Moskvitin, et al. "1FGL J0523.5-2529: A New Probable Gamma-Ray Pulsar Binary", The Astrophysical Journal Letters, 788, id. L27, 2014
23. V.V.Sokolov "The Gamma-Ray Bursts and Core-Collapse Supernovae — Global Star Forming Rate Peaks at Large Redshifts", in "New results and actual problems in particle and astroparticle physics and cosmology", Proceedings of the XXIX International Workshop on High Energy Physics, June 26-28, 2013, Protvino, Moscow. eds. R.Ryutin, V.Petrov, V.Kiselev. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2014, p. 200
24. S.B. Pandey, Brajesh Kumar, D.K. Sahu, J. Vinko, A.S. Moskvitin, G.C. Anupama, V.K. Bhatt, A. Ordasi, A. Nagy, V.V. Sokolov, T.N. Sokolova, V.N. Komarova, Brijesh Kumar, Subhash Bose, Rupak Roy, Ram Sagar, "Evolution of the Type IIb SN 2011fu", Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 296, 336 , 2014
25. S.Bose, B. Kumar, et al. "Optical observations of supernova 2012aw". IAU Symp., Vol. 296, pp. 334-335, 2014.
26. Roy, R. Kumar, B. et al. 2014, "The optical photometric and spectroscopic investigation of Type IIP supernova 2012A", IAU Symp., Vol. 296, pp. 116-120, 2014

Опубликовано более 130 циркуляров GCN и электронных телеграмм.

## Литература

- [1] Filippenko A.V. et al. 1997, ARAA, 1997, 35, 309
- [2] Sokolov et al. 2001, Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era: Proceedings of the International Workshop Held

in Rome, Italy, 17-20 October 2000, ESO ASTROPHYSICS SYMPOSIA. ISBN 3-540-42771-6. Edited by E. Costa, F. Frontera, and J. Hjorth. Springer-Verlag, 2001, p. 136



- [3] Sokolov et al. 2014, New Results and Actual Problems in Particle & Astroparticle Physics and Cosmology — Proceedings of XXIXth International Workshop on High Energy Physics. Edited by RYUTIN ROMAN, PETROV VLADIMIR & KISELEV V. Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2014. ISBN #9789814578745, pp. 201-209
- [4] Modjaz et al. 2011 arXiv:11055297,
- [5] Smartt S.J. et al. 2009, MNRAS, 395, 1409
- [6] Pandey S.B. JaPA, 34, 157, arXiv:1307.0688
- [7] Klebesadel R.W., ApJ, 182, L85
- [8] Piran T., 1999, PhR, 314, 575
- [9] Zhang B., 2011, Comptes Rendus Physique, v. 12, iss. 3, p. 206-225
- [10] Goodman J., 1986, ApJ, 308, 47
- [11] Paczynski B., 1986, ApJ, 308, L43
- [12] Katz, J.I., 1994, ApJ, 422, 248
- [13] Meszaros & Rees 1997, 1997, ApJ, 482, L29
- [14] Galama T.J. et al. 1998, Nature, 395, 670;
- [15] Soderberg et al 2003, ApJ, 627, 877
- [16] Della Valle M. et al. 2003, A&A, 406, L33
- [17] Stanek K.J. et al. 2003, ApJ, 591, L17
- [18] Malesani et al. 2004, ApJ, 609, L5
- [19] Della Valle et al. 2006, ApJ, arXiv:06041209
- [20] Campana et al. 2006, Nature, arXiv:06032179
- [21] Mazzali P.A. et al. 2009, ApJ, 703, 1624
- [22] Cobb B.E. et al. 2010, ApJ, arXiv:10059461
- [23] Fan Yi-Zhong et al. 2010, ApJ, 726, Iss. 1, art. 32
- [24] Pandey S.B. et al. 2003, et al., 2003, Bull. Astr. Soc. India, 31, 351
- [25] Della Valle et al. 2007, invited review talk to appear in proceedings of the 16th annual October Astrophysics Conference in Maryland, "Gamma-ray bursts in the Swift Era" eds, S. Holt et al. arXiv:0604110
- [26] Drake A.J. et al., CBET 1760 (2009).
- [27] Drake A.J. et al., CBET 1791 (2009).
- [28] Drake A.J. et al., CBET 1815 (2009).
- [29] Roy R. et al. 2011, MNRAS, 414, 167
- [30] Roy R. et al. 2011, ApJ, 736, 76
- [31] Leonard D.C. et al., 2002, PASP, 114, 1333
- [32] Pastorello A. et al. 2004, MNRAS, 347, 74
- [33] Pandey et al. 2009, A&A, 504, 45
- [34] Moskvitin A.S. et al., 2010, arXiv:1008.0773
- [35] Kumar B. et al., 2013, MNRAS, 431, 308
- [36] Kumar B. et al., 2014, MNRAS, 442, 2
- [37] Roy R. et al. 2013, MNRAS, 434, 2032
- [38] Jeong S. et al. 2014, A&A, 569, 93
- [39] Schlafly E.P., Finkbeiner D.P., 2011, ApJ, 737, Iss. 2, art.103

## Summary

The collaboration between Russian and Indian astronomers supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) and Indian Department of Science and Technologies (DST) was devoted to one of the most important topics of the modern astrophysics: the study of high-energy cosmic explosions, namely, supernovae and gamma-ray bursts (GRB). The collaboration has been performed since 2008 to 2013 and was rather fruitful. The joint observations with the 6-meter telescope and other telescopes of the Special Astrophysical Observatory of the RAS (SAO RAS, Russia) and several telescopes of the class 1-2 meters of the institute ARIES (Devarshala,

India) was organized. In the course of operation we discovered several supernovae, fulfilled follow-up and long-term observations of optical afterglows of GRBs, studied photometric and spectroscopic properties of GRBs, supernovae related to them and host galaxies of these objects. The Indian-Russian workshop devoted to the topic under investigation was held. The results of the work were presented in more than 26 joint papers and more than 130 electronic telegrams and the GCN (Gamma-ray Coordinates Network) circulars. We hope for the continuation of the RFBR support in so fruitful collaboration and to hold the next workshop on this urgent topic in Russia.



## Исследования молекулярного, нейтрального атомарного и ионизованного газов в областях звездообразования

И.И. Зинченко, А.В. Лапинов, Л.Е. Пирогов, П.М. Землянуха,  
Н.Д. Лебедев, Д.К. Оджха, С.К. Гхош, К.К. Маллик

### Введение

Изучение процесса образования массивных звезд является «горячей» темой астрофизических исследований. Несмотря на их большую роль в астрономии процесс образования звезд с массой больше 8-10 солнечных масс пока плохо изучен. Частично это связано с тем, что области образования массивных звезд находятся дальше от нас, более активны и время их жизни меньше, чем у тех областей, где образуются звезды малой массы. Важным является вопрос о количестве и распределении ионизованного газа в этих областях. Возможным сценарием формирования массивных звезд является процесс индуцированного последовательного звездообразования. Расширение области Н II, созданной массивными звездами, может инициировать образование следующего поколения массивных звезд. Пока неясно, насколько, в целом, важен этот процесс. К настоящему времени фрагментированные и, вероятно, расширяющиеся молекулярные оболочки, видимо соответствующие так называемой модели «нако-

плеение и коллапс», были найдены вокруг нескольких галактических областей. Однако детальных исследований образования звезд в этих оболочках не проводилось.

Цель наших совместных российско-индийских проектов (№№ 11-02-92690, 13-02-92697 и 15-52-45057) заключалась в исследовании ионизованного газа и атомарного водорода в областях звездообразования с высоким угловым разрешением в сопоставлении с наблюдениями излучения пыли и молекул. Предполагалось исследовать, как распределены и взаимодействуют друг с другом ионизованный и нейтральный газы и пыль в областях образования массивных звезд. Данная информация представляется весьма важной для построения общей картины звездообразования.



**ЗИНЧЕНКО  
Игорь Иванович**  
Институт прикладной  
физики РАН



**ЛАПИНОВ  
Александр  
Владимирович**  
Институт прикладной  
физики РАН



**ПИРОГОВ  
Лев Евгеньевич**  
Институт прикладной  
физики РАН



**ЗЕМЛЯНУХА  
Петр  
Михайлович**  
Институт прикладной  
физики РАН



**ЛЕБЕДЕВ  
Никита  
Дмитриевич**  
Институт прикладной  
физики РАН



**ОДЖХА  
Девендра  
Кумар**  
профессор,  
Институт  
фундаментальных  
исследований  
им. Тата



**ГХОШ  
Сварма Канти**  
профессор,  
Институт  
фундаментальных  
исследований  
им. Тата



**МАЛЛИК  
Кшитиз Кумар**  
Институт  
фундаментальных  
исследований  
им. Тата.



## Инструменты и методы

Основным средством исследования плотного молекулярного газа в областях звездообразования являются наблюдения излучения пыли и молекул на сантиметровых, миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Радиоизлучение ионизованного водорода за счет тормозного механизма наблюдается в континууме на более низких частотах.

Для детального изучения структуры плотных ядер газопылевых облаков в областях образования массивных звезд в настоящем проекте использованы крупные одиночные антенны (Onsala-20м, IRAM-30м, Effelsberg-100м) и интерферометры (VLA и SMA), которые обеспечивают угловое разрешение до нескольких секунд дуги. Для наблюдений ионизованного газа со столь же высоким угловым разрешением была использована расположенная в Индии антенная решетка GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope). Этот инструмент состоит из 30 полноповоротных параболических антенн диаметром 45 м с максимальным расстоянием между антеннами 25 км. Рабочие частоты — от 50 до 1420 МГц. Угловое разрешение составляет от 60" до 2", что близко к разрешению упомянутых выше радиотелескопов милли- и сантиметрового диапазонов длин волн, которые использовались для наблюдений излучения молекул и пыли. Это дает возможность провести детальное сравнение распределения ионизованного и молекулярного газа, а также выявить признаки их взаимодействия. Такие детальные исследования областей звездообразования с высоким разрешением в настолько широком диапазоне частот проводятся впервые.

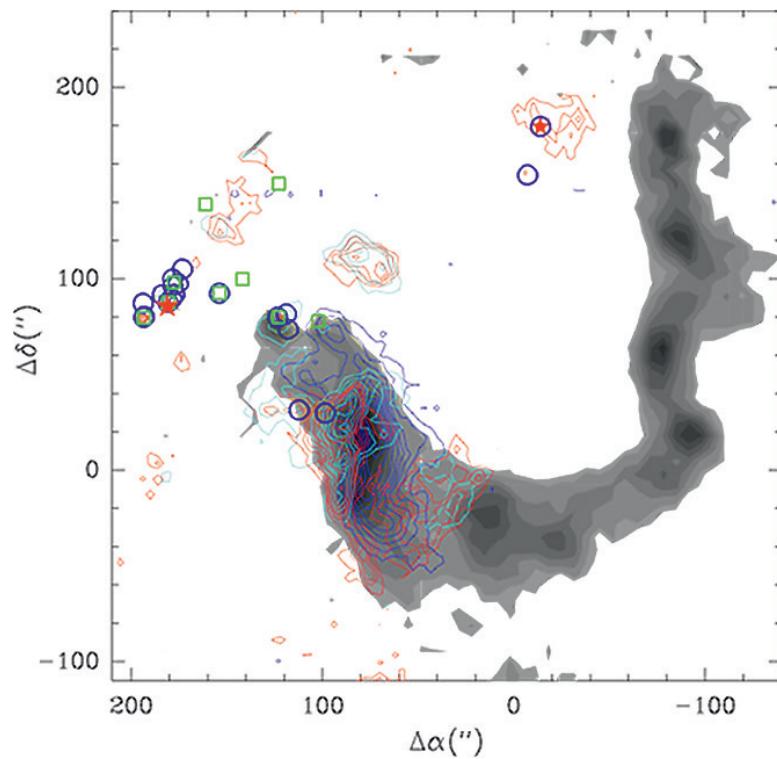
## **Основные результаты**

Наши исследования охватывали несколько областей образования массивных звезд, связанных с зонами ионизованного водорода. В них наблюдаются различные индикаторы активного звездообразования, такие как мощные инфракрасные (ИК) источники, молекулярные мазеры и пр. Основные результаты представлены ниже.

## Область W40

Данные наших наблюдений позволили изучить в молекулярных линиях и в континууме в миллиметровом диапазоне длии волн структуру и физические свойства плотного газопылевого облака W40, связанного с одной из наиболее близких областей Н II [1-3]. Также проведен анализ карт данной области, полученных на интерферометре GMRT на частотах 1280 и 610 МГц (*рис. 1*).

Газопылевое облако расположено к северо-западу от основной зоны Н II и имеет сложную морфологию и кинематическую структуру, включая кольцо из пылевых густиков и обширное плотное ядро. Вероятно, кольцо сформировано за счет механизма “collect and collapse” («накопление и коллапс») в результате расширения соседней зоны Н II меньшего размера и наблюдается под углом



**Рис. 1.** Карты изофот излучения W40 на частотах 1280 и 610 МГц, полученные на GMRT, а также карта в линии CS(5-4) (красные, голубые и синие контуры соответственно). Фон — излучение пыли.



к картинной плоскости. Сравнение наблюдаемых параметров кольцевой структуры с параметрами модели “collect and collapse” показало, что они близки, если принять, что плотность облака, в котором происходит расширение зоны Н II, достаточно высока ( $\geq 10^5 \text{ см}^{-3}$ ) [4].

Определены физические параметры пылевых сгустков и плотного газа. Размеры сгустков, массы и пиковые лучевые концентрации водорода лежат в диапазонах  $\sim 0.02\text{-}0.11$  пк,  $\sim 0.4\text{-}8.1 M_{\odot}$  и  $\sim (2.5\text{-}11) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$  соответственно. Кинетические температуры для двух западных сгустков составляют  $\sim 21$  и  $\sim 16$  К соответственно. Плотности газа для различных позиций в облаке лежат в диапазоне  $\sim (0.3\text{-}3.2) \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ . В сгустках происходит образование нового поколения звезд, на что указывает наличие в них источников Class 0 и Class I. Область, связанная с восточной ветвью кольца, отличается от западной. Восточные сгустки более массивны и имеют более высокую степень нетепловых движений. Профили линий CS(2-1) в направлении восточных сгустков асимметричны и демонстрируют самопоглощение, указывая на движения типа сжатия на луче зрения. Близость по форме карт излучения ионизованного и плотного газов и пыли в направлении этих сгустков свидетельствует о том, что излучение исходит из одной области, где происходит взаимодействие между ионизированным и нейтральным веществами. Существуют указания на наличие

ударных волн в этой области. Вероятно, восточная ветвь пылевого кольца опережает западную в эволюционном развитии и представляет собой область индуцированного образования звезд, возможно, с массами выше солнечной.

В исследованной области также сильны эффекты химической дифференциации. Распространенности CS повышены в направлении восточных сгустков, а распространенности аммиака,  $N_2H^+$  и  $H^{13}CO^+$  повышены в направлении западных сгустков.

## Область S255

Получены детальные карты распределения яркости в континууме на различных частотах (в том числе на частотах 610 и 1280 МГц, наблюдавшихся на GMRT) и в молекулярных линиях [5,6] (см. пример на рис. 2). По излучению в континууме на миллиметровых волнах и в молекулярных линиях обнаружено несколько новых сгустков. Большинство не связаны с ИК-источниками и с источниками радиоконтинуума на низких часто-

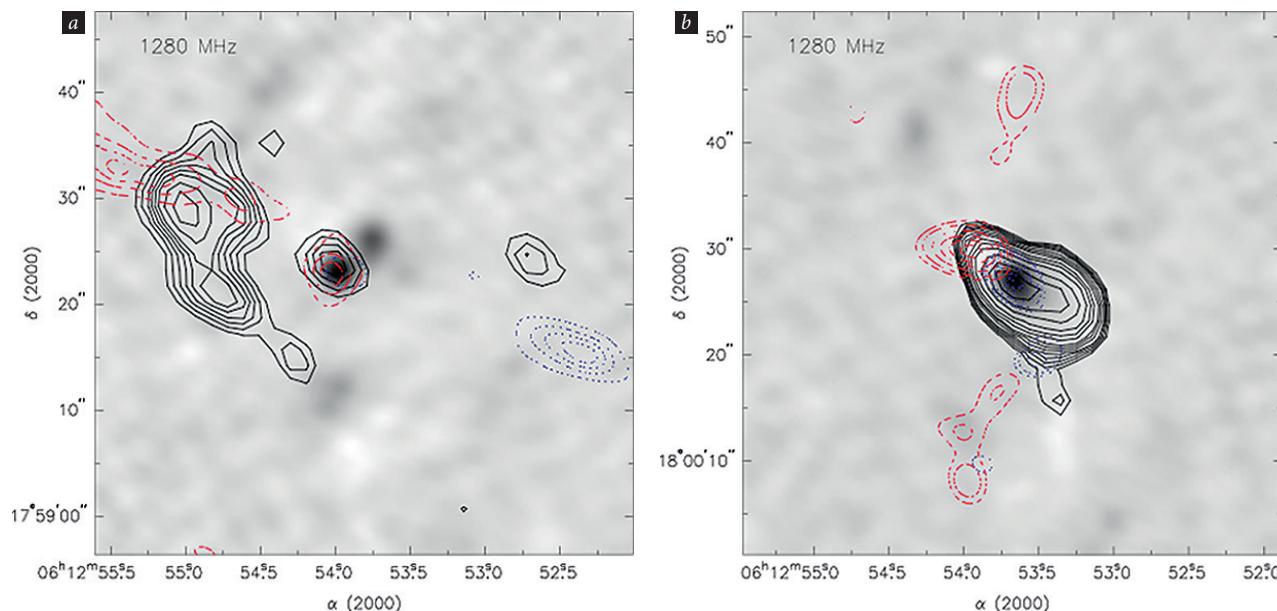
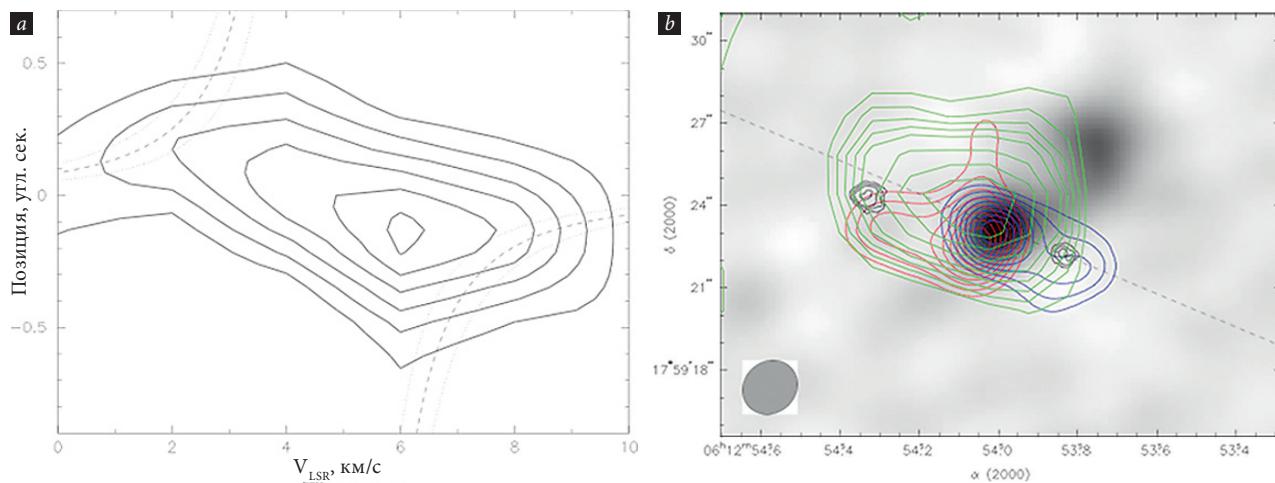


Рис. 2. Полученные на GMRT карты изофот областей S255IR (а, сплошные черные контуры) и S255N (б, сплошные черные контуры) на частоте 1280 МГц, наложенные на изображения в континууме на волне 1.1 мм, полученные нами на SMA. Красные и синие контуры соответствуют излучению высокоскоростного газа в красном и синем крыльях линии CO  $J = 2-1$  (квантовое число углового момента для вращательных уровней молекулы) соответственно. Рисунок взят из работы [6].



**Рис. 3. а** — Диаграмма позиция-скорость для сгустка S255IR-SMA1 по наблюдениям в линии CH<sub>3</sub>OH 4<sub>-3</sub>,3. Е. Штриховые линии соответствуют кеплеровскому вращению вокруг центрального объекта с массой 20 M<sub>⊕</sub> и углом наклона 25°. Пунктирные кривые соответствуют углам наклона 25 ± 5°. б — Карты излучения в области S255IR в крыльях линии HCO+(4-3) (красные и синие контуры), наложенные на изображение излучения в континууме на волне 0.8 мм. Синтезированная диаграмма направленности SMA показана в левом нижнем углу. Зеленые контуры — карта излучения в континууме на частоте 15 ГГц. Черные контуры — излучение в линии Fe II [7].

так, что указывает на весьма ранние стадии эволюции. В то же время наблюдения линий SiO и некоторых других молекул свидетельствует о наличии высокоскоростных истечений, обусловленных этими сгустками. На основе анализа излучения пыли и некоторых молекул получены оценки основных физических характеристик этих сгустков. Их массы составляют несколько солнечных масс. Исследования области массивного звездообразования S255IR в молекулярных линиях и в континууме позволили установить, в частности, что наблюдаемый биполярный молекулярный поток ускоряется в результате эпизодических выбросов вещества из центра. Этот поток сильно меняет химический состав газа вдоль пути распространения, а именно резко уменьшая содержание катионов  $N_2H^+$ .

На основе полученных на индийских инструментах данных в ИК- и оптическом диапазонах с учетом наших измерений на миллиметровых волнах выполнена оценка светимости и массы центральной звезды —  $(3.5 \pm 0.3) \times 10^4 L_\odot$  и  $20 \pm 2 M_\odot$  соответственно. Данные

молекулярных наблюдений указывают на наличие околовзвездного диска, масса которого существенно меньше массы центральной звезды. Карта распределения скоростей в диске не противоречит предложению о кеплеровском характере его вращения, хотя для надежного вывода достигнутое угловое разрешение ( $0.4''$ ) пока недостаточно. Полученная оценка массы центральной звезды дает угол наклона диска около 25 градусов (рис. 3). Ионизованный газ наблюдается вдоль оси джета. Мера эмиссии составляет  $E_M \approx (1-2.5) \times 10^7$  пк·см $^{-6}$ , электронная концентрация  $n \approx 3 \times 10^4$  см $^{-3}$ . В целом, наблюдения S255 согласуются с моделью формирования массивной звезды за счет дисковой аккреции.

Область S76

В области массивного звездообразования S76 по данным наблюдений в молекулярных линиях выявлено наличие массивной расширяющейся газопылевой оболочки вокруг протяженной ( $\sim 10$  пк) зоны H II. Оболочка имеет фрагментарную структуру на малых ( $<0.5$  пк) масштабах. Определены физические параметры фрагментов. В некоторых частях оболочки плотность повышенна, и там идет процесс звездообразования (очевидно, индуцированного расширением зоны H II). По данным наблюдений на индийском радиотелескопе GMRT на частотах 1280 и 610 МГц и на более высоких частотах на VLA изучено распределение ионизованного газа в этой области и спектры основных компонент — S76E и другого яркого малоизученного

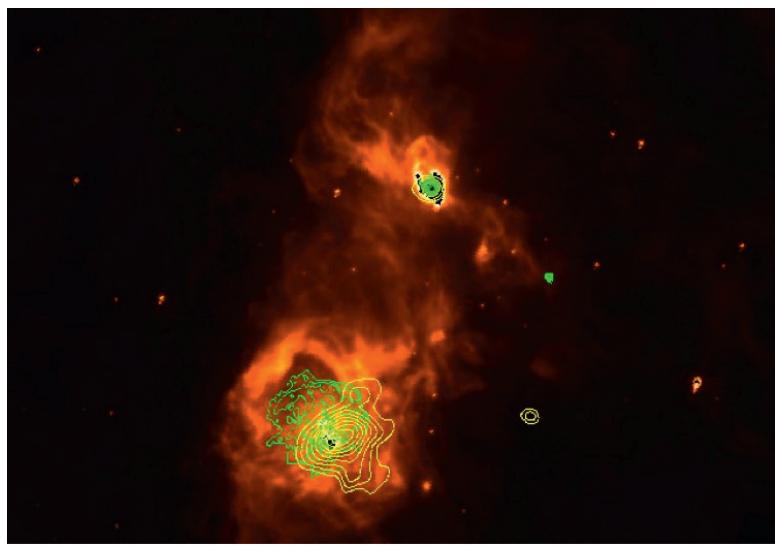


Рис. 4. Карты изофот излучения ионизированного газа в области S76 по наблюдениям на GMRT на частоте 1280 МГц (зеленые контуры) и излучения пыли на волне 1.2 мм по наблюдениям на 30-метровом радиотелескопе IRAM (желтые контуры), наложенные на ИК-изображение на волне 8 мкм, полученное телескопом Spitzer.

источника к северу от S76E, который мы обозначаем как S76N. По результатам наблюдений на ряде миллиметровых телескопов (OSO-20m, IRAM-30m, NMA) проанализировано излучение различных молекул и пыли в этой области. На рисунке 4 показаны карты изофот излучения ионизированного газа, составленные по данным наблюдений на GMRT на частоте 1280 МГц и излучения пыли на волне 1.2 мм по наблюдениям на 30-м радиотелескопе IRAM, наложенные на ИК-изображение на волне 8 мкм, полученное телескопом Spitzer. Видно, что область ионизированного водорода окружена оболочкой, наблюданной в ИК-диапа-

зоне, и примыкает к плотному и, очевидно, более холодному ядру, видимому на миллиметровых волнах. Получены оценки меры эмиссии ионизированных областей и параметров газо-пылевых сгустков. Обнаружена значительная разница в химическом составе газа в областях S76E и S76N. Результаты готовятся к публикации.

### Область S187

Проведены совместные наблюдения области S187 на частотах 610 и 1420 МГц на индийской антенной решетке GMRT в континууме и в линии H I (рис. 5). Следует отметить, что успешных наблюдений галактических объектов в линии H I на GMRT практически нет, поскольку серьезной проблемой является фон Галактики. На основании результатов наблюдений в континууме впервые получено радиоизображение и оценена плотность потока на частоте ниже 1.4 ГГц. Изучено распределение ионизированного газа путем сравнения с данными наших наблюдений молекулярных линий в этом объекте [8], а также с данными ИК-наблюдений.

Концентрация электронов по данным этих наблюдений составляет около  $60 \text{ см}^{-3}$ , масса ионизированного газа около 8 масс Солнца, мера эмиссии примерно  $5000 \text{ пк}\cdot\text{см}^6$ . Эти величины согласуются с имеющимися в литературе данными.

Излучение в линии H I не коррелирует с излучением молекулярного газа. Лучевая концентрация атомарного водорода составляет  $\sim 10^{21} \text{ см}^{-2}$ , а его масса —  $\sim 10$  масс Солнца, что в несколько раз меньше нашей оценки массы молекулярного газа ( $\sim 50$  масс Солнца [8]).

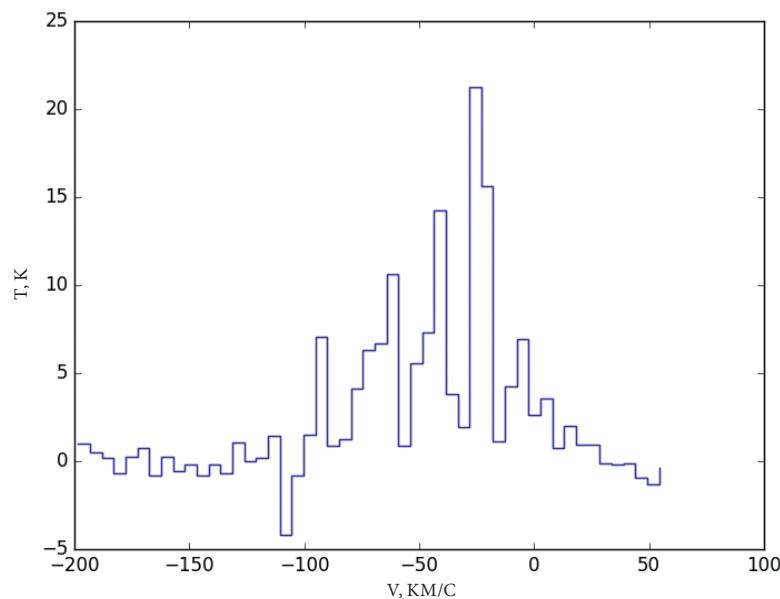


Рис. 5. Спектр излучения в линии H I на волне 21 см в области звездообразования S187, полученный нами на индийском радиотелескопе GMRT.



## Другие объекты

По данным наших наблюдений, проведенных на интерферометре GMRT (Индия) на частотах 1280 и 610 МГц, в окрестности области звездообразования W40 обнаружено девять новых радиоисточников, не имеющих ассоциаций в базе астрономических данных SIMBAD [9]. Определен размер наиболее яркого источника (PS0), составивший  $1.15''(0.04)$  и  $1.85''(0.05)$  на 1280 и 610 МГц соответственно. Для источников PS0, PS5(1+2) и PS8 найдены ассоциации на ранее полученных картах TIFR GMRT Sky Survey (TGSS) на частоте 150 МГц (<http://tgss.ncra.tifr.res.in>). Для значений плотностей потоков выполняются следующие соотношения:  $F(1280) < F(610)$  либо  $F(1280) < F(610) < F(150)$ . Спектральные индексы источников меньше,

чем -0.1, что указывает на их нетепловую природу. За исключением значения  $F(1280)$  для источника PS8, которое, вероятно, занижено, спектральные индексы в среднем близки к значению -1.

Нами проведен анализ данных наблюдений области звездообразования NGC7538 в различных диапазонах [10]. В области IRS 1-3 идентифицировано 144 кандидата в молодые звездные объекты (МЗО) типа Class II и 24 кандидата в МЗО типа Class I. На картах GMRT существует компактная область H II, связанная с источниками IRS 1-3, спектральный индекс которой  $(0.87 \pm 0.11)$  указывает на большую оптическую толщину. На карте 1280 МГц, полученной с высоким пространственным разрешением, эта компактная область разделяется на три отдельных пика. «Восточный» пик совпадает с источником IRS 2. Излучение  $H^{13}CO^+(J=1-0)$  выявило пики в области как IRS 1-3, так и IRS 9, ни один из которых не совпадает с излучением оптической туманности, что предполагает наличие близко расположенного плотного облака. Вироильные массы сгустков в областях IRS 1-3 и IRS 9 составляют порядка  $1000$  и  $500 M_\odot$  соответственно.

## Заключение

Результаты работы демонстрируют, что взаимодействие ионизированного и нейтрального газов сильно изменяет структуру и физические характеристики родительского облака вблизи формирующихся массивных звезд, приводя к образованию сгустков плотного газа и пыли, в которых может быть индуцирована новая фаза звездообразования. На примере области W40 показано, что механизм индуцированного звездообразования «накопление и коллапс» может реализовываться на близком расстоянии от звезды в относительно однородной среде с высокой плотностью.

Данные результаты получены благодаря финансовой поддержке РФФИ и ДНТ (совместные российско-индийские проекты №№ 11-02-92690, 13-02-92697 и 15-52-45057).

## Литература

- Pirogov L., Ojha D. K., Thomasson M., Wu, Y.-F., Zinchenko I., Molecular-line and continuum study of the W40 cloud, MNRAS, Volume 436, Issue 4, p.3186-3199 (2013).
- Mallick K. K., Kumar M. S. N., Ojha D. K., Bachiller Rafael, Samal M. R., Pirogov L., The W40 Region in the Gould Belt: An Embedded Cluster and H II Region at the Junction of Filaments,



- The Astrophysical Journal, Volume 779, Issue 2, article id. 113, 17 pp. (2013).
3. Mallick K. K., Kumar M. S. N., Ojha D. K., Bachiller R., Samal M. R., Pirogov Lev, Multi-wavelength study of Galactic H II region W40, 31st ASI Meeting, ASI Conference Series, Vol. 9, pp 83 (2013).
  4. Пирогов Л. Е. «Область индуцированного звездообразования W40: наблюдения и модель». Астрон. журн., 92(5), стр. 400-405 (2015)
  5. Ojha D. K., Samal M. R., Pandey A. K., Bhatt B. C., Ghosh S. K., Sharma Saurabh, Tamura M., Mohan V., Zinchenko I. "Star formation activity in the Galactic H II complex S255 — 257", The Astrophysical Journal, 738, article id. 156 (2011).
  6. Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N., Kurtz S., Ojha D. K., Samal M. R., Ghosh S. K. A Multi-wavelength High-resolution study of the S255 Star-forming Region: General Structure and Kinematics, The Astrophysical Journal, Volume 755, Issue 2, article id. 177, 19 pp. (2012).
  7. Zinchenko I., Liu S. -Y., Su Y. -N., Salii S.V., Sobolev A. M., Zemlyanukha P., Beuther H., Ojha D. K., Samal M. R., Wang Y. The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation. The Astrophysical Journal, Volume 810, Issue 1, article id. 10, 18 pp. (2015)
  8. Zinchenko I., Caselli P., Pirogov L. Chemical differentiation in regions of high-mass star formation — II. Molecular multiline and dust continuum studies of selected objects. MNRAS, Volume 395, p.2234-2247 (2009)
  9. Pirogov L., Zinchenko I., Ojha D. K., Ghosh S. K., Discovery of new non-thermal radio sources in the W40 region, The Astronomer's Telegram, #4236 (2012).
  10. Mallick K. K., Ojha D. K., Tamura M., Pandey A. K., Dib S., Ghosh S. K., Sunada K., Zinchenko I., Pirogov L., Tsujimoto M., NGC 7538: multiwavelength study of stellar cluster regions associated with IRS 1-3 and IRS 9 sources, MNRAS, Volume 443, Issue 4, p.3218-3237 (2014).

## Summary

Studies of high mass star formation are currently a “hot topic” of astrophysical research. Despite their great importance in almost all areas of astronomy, the formation of stars larger than 8–10 solar masses is still poorly understood. An important question in this respect is the amount and distribution of ionized and neutral atomic gas in these areas. The expansion of an H II region created by massive stars can trigger the formation of a next generation of massive stars. The goal of our joint Russian-Indian projects No. 11-02-92690, 13-02-92697, and 15-52-45057 was the study of ionized gas and atomic hydrogen in star forming regions at a high angular resolution in comparison with observations of dust and molecular emission performed at the angular resolution down to a few arc seconds. For observations of the ionized

and neutral atomic gas at a similar high angular resolution we used the GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope) antenna array located in India. Such detailed investigations of star forming regions at a high angular resolution in the so wide frequency range have not been performed earlier.

Our studies covered several areas of high mass star formation associated with regions of ionized hydrogen. They contain various indicators of active star formation including powerful IR sources, molecular masers, etc. In general, our results show that the interaction between ionized and neutral gas significantly changes the structure and physical characteristics of the parent cloud near massive star-forming regions, leading to the formation of dense gas and dust clumps in which a new phase of star formation could occur.



## Программа российско-индийского сотрудничества по комплексам соединений палладия и платины с халькогенатными производными карборанов

В.И. Брегадзе, В.К. Джейн

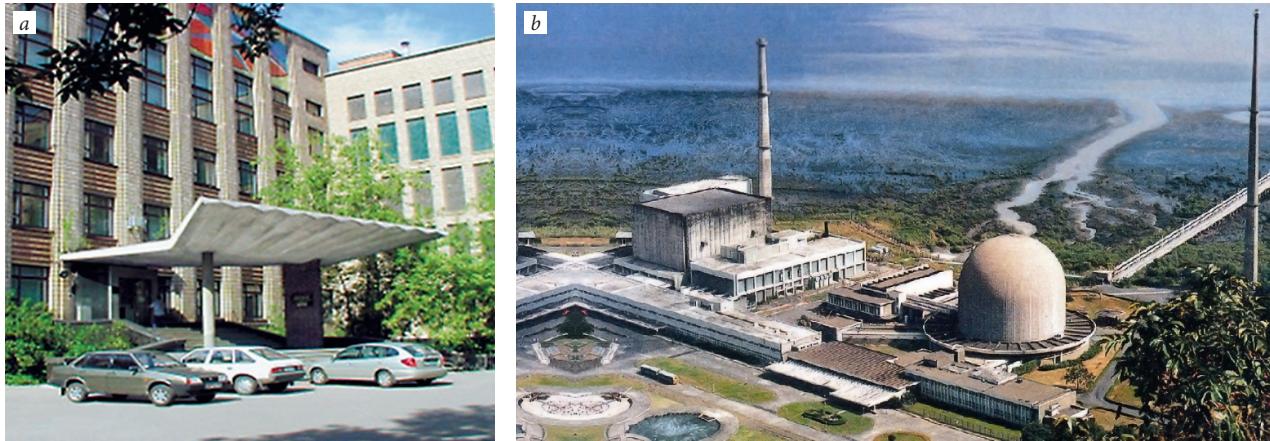


Рис. 1. ИНЭОС РАН, г. Москва (а) и Атомный центр, г. Мумбаи (б).

Российско-индийское научное сотрудничество между Институтом элементоорганических соединений им. А.Н. Несмейнова Российской академии наук (ИНЭОС РАН) (рис. 1а) и Химическим отделом Атомного исследовательского центра им. Бхабха (ХОАИЦ) (рис. 1б) в 2008-2013 гг. явилось логическим продолжением научного сотрудничества между АН СССР и Департаментом науки и технологий (ДНТ) Правительства Индии, начатого еще в 1988 г. Сотрудничество в тот период заключалось в проведении ежегодных индийско-советских (российских) симпозиумов в 1988-1993 гг. поочередно в Индии и России и во взаимных научных визитах индийских ученых в Россию и российских — в Индию. В этих контактах при-

нимали участие и руководители данного проекта. С середины 90-х годов прошлого века финансирование таких проектов по известным причинам прекратилось. Активное возобновление научных контактов в 2000-е позволило нам начать переговоры о научном сотрудничестве. Предложенные нами проекты получили поддержку сначала в рамках сотрудничества между РАН и Департаментом науки и технологий Правительства Индии (2008-2010), а затем дважды по программам сотрудничества между Российским фондом фундаментальных исследований и ДНТ (проекты №№ 10-03-92657 и 12-03-92696).

Сотрудничество между коллективом профессора В.К. Джейна в ХОАИЦ и Лабораторией алюминий- и борогранических соединений ИНЭОС РАН (заведующий лабораторией, профессор В.И. Брегадзе) основано на том, что достижения обеих лабораторий дополняют друг друга, так как первый коллектив работает в области сульфо- и селенпроизводных металлов платиновой группы, а второй — в области химии карборанов.



**БРЕГАДЗЕ  
Владимир Иосифович**  
профессор,  
Институт элементоорганических  
соединений  
им. А.Н. Несмейнова РАН



**ДЖЕЙН В.К.**  
руководитель Химического отдела  
Атомного  
исследовательского  
центра им. Бхабха



Коллектив профессора В.К. Джайна известен своими работами с халькогенатами металлов платиновой группы — интересных комплексов, характеризующихся широким структурным разнообразием. Эти комплексы применяются в гомогенном катализе, в качестве энзимных моделей в биологических системах, в химиотерапии злокачественных опухолей и в последнее время в качестве предшественников для металхалькогенидных материалов. Последние проявляют полупроводниковые свойства и, следовательно, актуальны для разработок в электронике. Органические халькогенатные лиганды склонны выступать в качестве мостиковых групп и образуют олигомерные металхалькогенатные комплексы. В результате этого они обычно выделяются в виде нерастворимых или плохо растворимых веществ, что препятствует их использованию для перечисленных выше направлений применения. Чтобы предотвратить такую олигомеризацию используют разные способы. К их числу относятся использование хелатных фосфиновых лигандов, хелатирующих дитиолятные лиганды, функциональных халькогенатных лигандов и объемные халькогенатные лиганды.

Идея данного совместного проекта заключалась в использовании в качестве объемных халькогенатных лигандов производных карборанов. Лаборатория профессора В.И. Брегадзе много лет активно работает в области химии карборанов, являясь одной из ведущих лабораторий мира в этой области. В настоящее время функциональные производные икосаэдрических клозо-карборанов интенсивно изучаются благодаря возможности их применения в органическом синтезе, медицине (например борнейтронозахватной терапии рака) и для создания новых материалов (например борсодержащих пленок). Уникальная устойчивость и большой стерический объем карборана, который превосходит по размеру врачающееся бензольное кольцо, предоставляет возможность использовать его для конструирования новых структур и достижения необходимых различий в реакционной способности получаемых соединений. Хотя карборанхалькогенаты были уже известны некоторое время, их координационная химия начала развиваться сравнительно недавно.

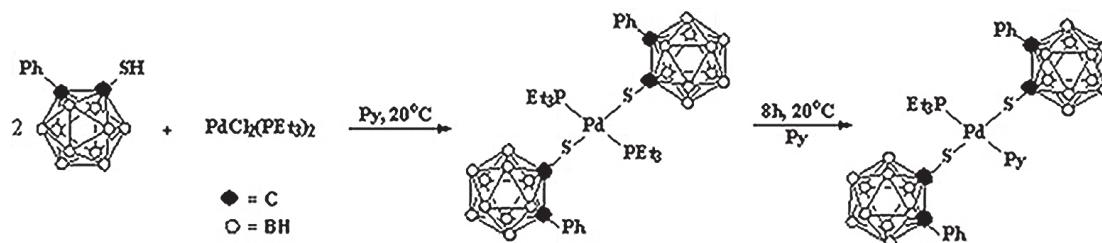
Основываясь на имеющемся у обоих коллективов опыте, программа сотрудничества была нацеле-

на на предотвращение олигомеризации халькогенатных комплексов палладия и платины путем использования объемистых карборанхалькогенатных лигандов и применения полученных комплексов в качестве молекулярных прекурсоров для получения палладий халькогенидных наноматериалов [1-4].

В ходе проведенной работы были изучены реакции 1-меркапто(селено)карборанов с моно- и диядерными палладиевыми и платиновыми прекурсорами, получены новые структуры [1-3]. Некоторые из этих реакций представлены на схемах 1-3. Взаимодействие  $[M_2Cl_2(\mu-Cl)_2(PR_3)_2]$  ( $M$  — металл) с 1-меркапто-2-фенил-о-карбораном в присутствии пиридина приводит к моноядерным комплексам,  $[M(SCb^0Ph)Cl(py)(PR_3)]$  ( $Ph$  — фенил,  $py$  — пиридин,  $Cb^0$  — карборан), содержащим четыре различных лиганда в плоско-квадратной конфигурации (схема 1) [1]. В свежеприготовленном растворе платинового комплекса нейтральные лиганды ( $py$  и  $PR_3$ ) находятся в *cis*-положении, но через несколько часов комплексы изомеризуются в соединение, в котором нейтральные комплексы находятся в *транс*-положении (схема 2). Представляет интерес тот факт, что реакции натриевой соли селенолятного лиганда приводят к комплексам с селенолятным мостиком (схема 3) [2]. В моноселенолятном комплексе,  $[M_2Cl_2(\mu-Cl)(\mu-SeCb^0Ph)(PR_3)_2]$ , селенолятный лиганд служит мостиком между двумя атомами металла, давая комплекс с sym-*cis* конфигурацией. В противоположность множеству комплексов с дихалогенолятным мостиком [5], бис-селенолятные карборановые комплексы,

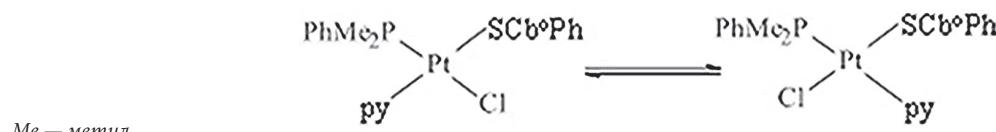


Схема 1



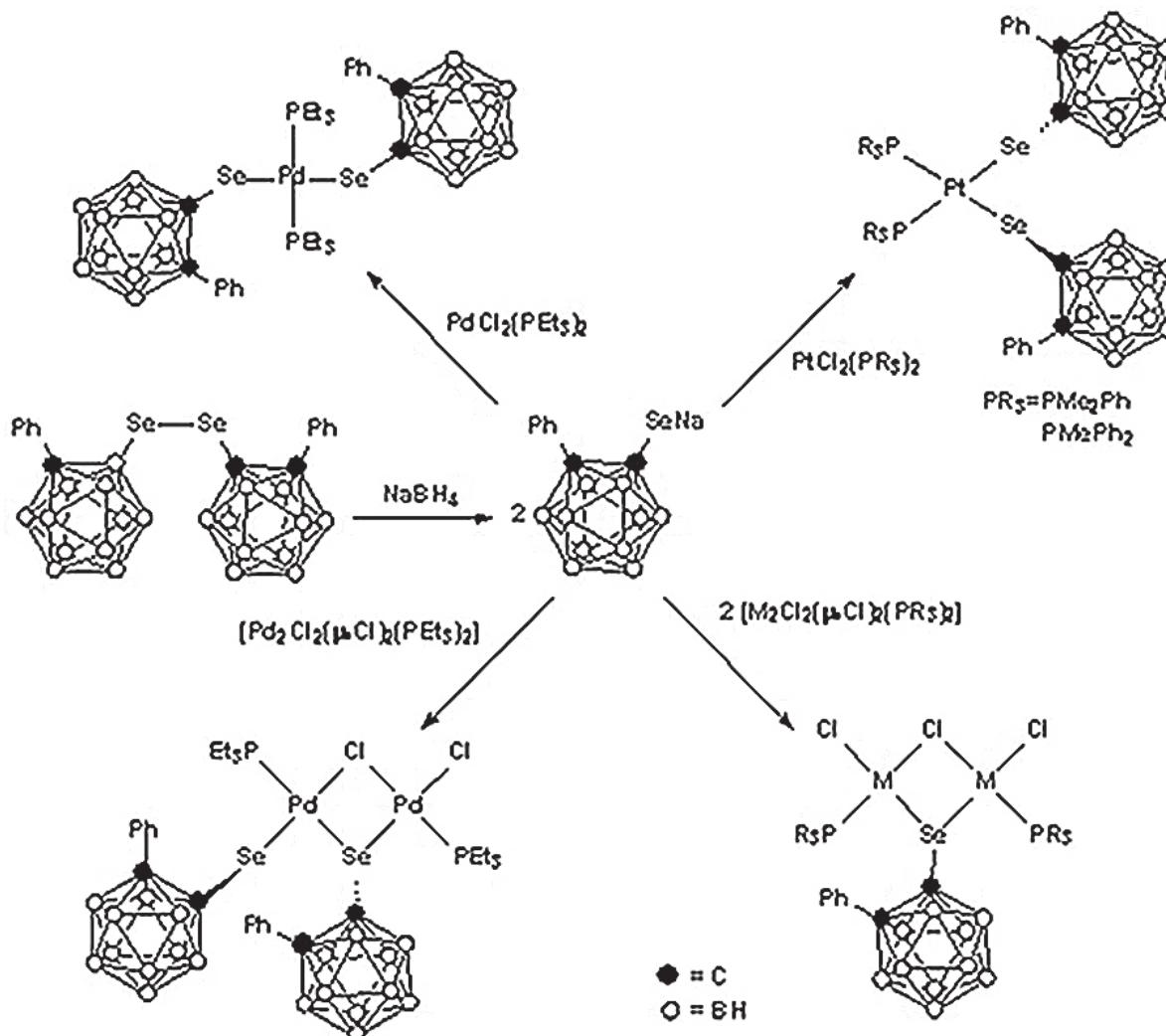
Et — этил.

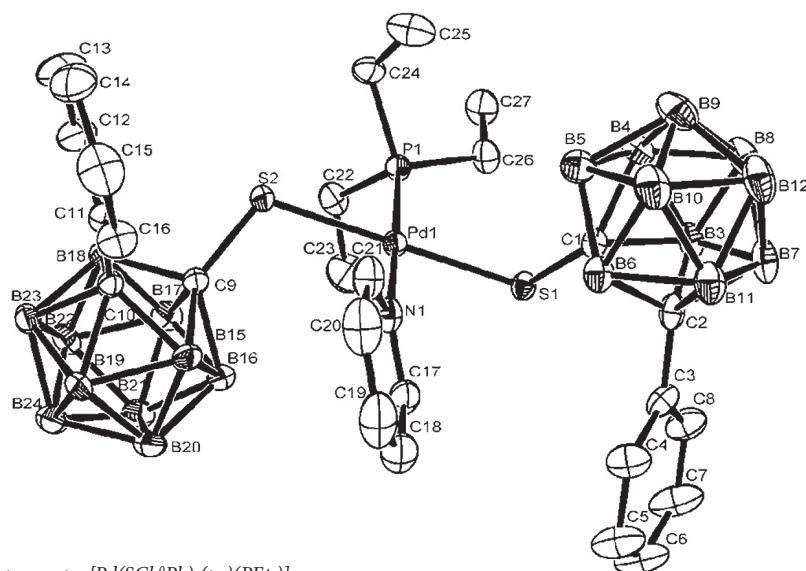
Схема 2



Me — метил.

Схема 3

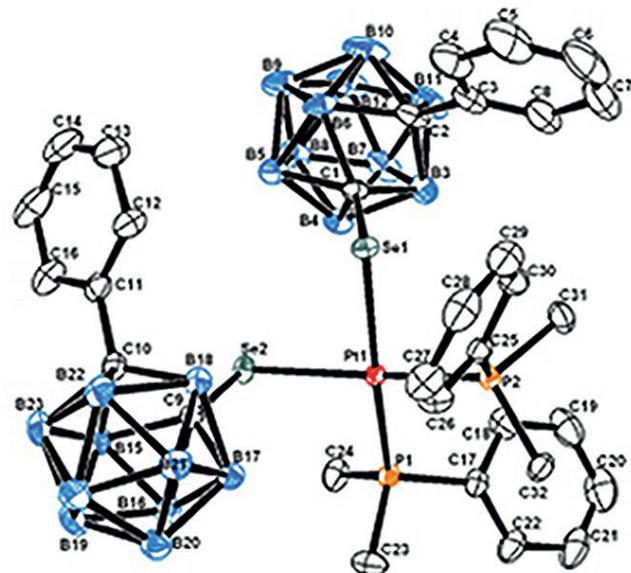


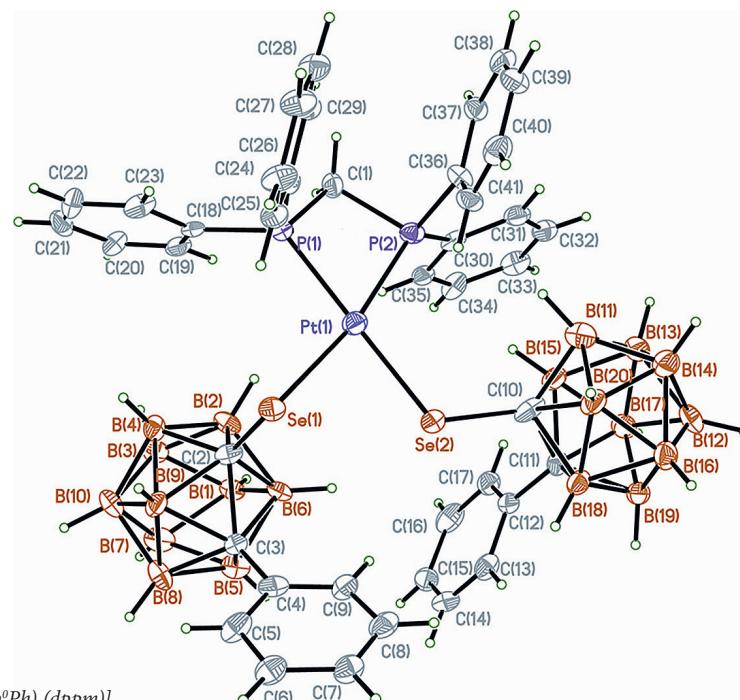
Рис. 2. Молекулярная структура  $[Pd(SCb^0Ph)_2(py)(PEt_3)]$ .

$[M_2Cl(\mu\text{-SeCb}^0Ph)(\mu\text{-Cl})_2(SeCb^0Ph)(PR_3)_2]$ , имеют два различных типа селенолятных лигандов: один образует мостик между двумя металлическими центрами, а другой выступает как монодентатный мостиковый лиганд [2].

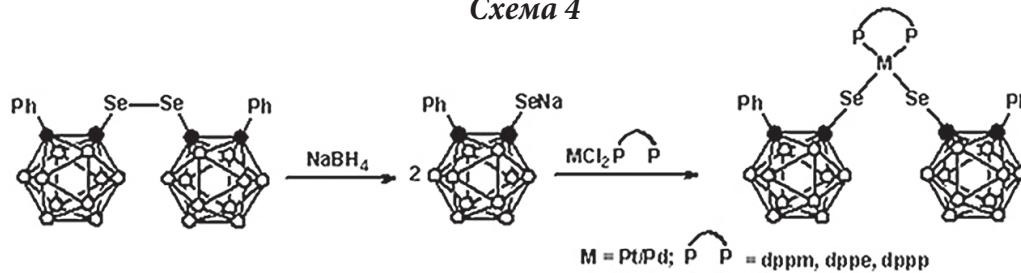
Реакции  $[PdCl_2(PEt_3)_2]$  с 1-меркапто-2-фенил-о-карбораном в присутствии пиридина приводят к моноядерному комплексу,  $[Pd(SCb^0Ph)_2(PEt_3)_2]$ , который затем оставляли в растворе, содержащем несколько капель пиридина, что привело к замещению одного лиганда  $PEt_3$ , давая желтые кристаллы  $[Pd(SCb^0Ph)_2(PEt_3)(py)]$  (рис. 2) [1]. По-видимому, стericheски объемный карборан облегчает замещение

более сильного лиганда  $PEt_3$  более слабым пиридином. Реакции натриевых солей 1-селено-2-фенил-о-карборана с  $[MCl_2(PR_3)_2]$  приводят к образованию бис-селенолятных комплексов  $[M(SCb^0Ph)_2(PR_3)_2]$  ( $M = Pd$  или  $Pt$ ), которые выделены в виде *транс*- (в случае  $Pd$ ) и *цис*- (в случае  $Pt$ ) изомеров (рис. 3) [2]. Аналогичные реакции меркапто(селено)карборанов с палладиевыми и платиновыми комплексами, содержащими хелатный фосфин, приводят

Рис. 3. Молекулярная структура  $[Pt(SCb^0Ph)_2(PMe_2Ph)_2]$ .

Рис. 4. Структура  $[\text{Pt}(\text{SeCb}^0\text{Ph})_2(\text{dppm})]$ .

## Схема 4



dppm — бис(дифенилфосфино)метан  $\text{Ph}_2\text{PCH}_2\text{PPh}_2$ ; dppe — бис(дифенилфосфино)этан  $\text{Ph}_2\text{P}(\text{CH}_2)_2\text{PPh}_2$ ; dppp — бис(дифенилфосфино)пропан  $\text{Ph}_2\text{P}(\text{CH}_2)_3\text{PPh}_2$ .

к цис-комплексам  $[\text{M}(\text{ECb}^0\text{Ph})_2(\text{P}^\wedge\text{P})]$  ( $\text{E} = \text{S}, \text{Se}$ ;  $\text{P}^\wedge\text{P} = \text{Ph}_2\text{P}(\text{CH}_2)_n\text{PPh}_2$ ) (рис. 4, схема 4) [3].

Для того чтобы оценить пригодность этих комплексов в качестве молекулярных прекурсоров для халькогенид-палладиевых наноматериалов, был изучен термолиз соединений  $[\text{Pd}(\text{SCb}^0\text{Ph})_2(\text{PEt}_3)(\text{py})]$  и  $[\text{Pd}(\text{SeCb}^0\text{Ph})_2(\text{PEt}_3)_2]$  в триоктилфосфин оксида и гексадециламине соответственно. Первый при  $200^\circ\text{C}$ , а второй при  $330^\circ\text{C}$  привели к образованию  $\text{Pd}_4\text{S}$  и  $\text{Pd}_{17}\text{Se}_{15}$  соответственно, в виде нанокристаллов размером 100 нм. Это было показано методами рентгеновской дифракции

(XRD) (рис. 5), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDAX) и сканирующей электронной микроскопии (SEM).

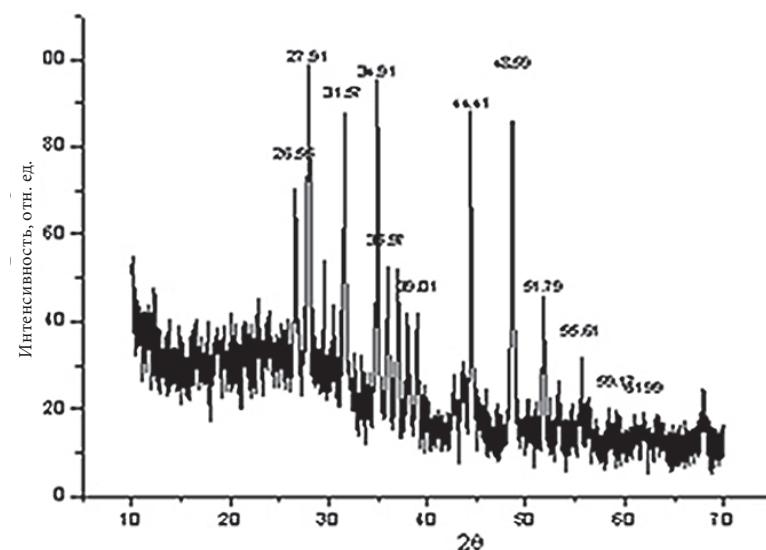
Рис. 5. Спектр XRD образца  $\text{Pd}_{17}\text{Se}_{15}$ , полученного при термолизе  $[\text{Pd}(\text{SeCb}^0\text{Ph})_2(\text{PEt}_3)_2]$  в гексадециламине при  $330^\circ\text{C}$ .



Рис. 6. а — С. Глазун (слева) и М. Пал. б — Ниша Кушвах (слева) и О. Жидкова в период проведения совместных экспериментов в ИНЭОС РАН.

Авторы благодарят РФФИ (проекты №№ 10-03-92657 и 12-03-92696) и ДНТ (Нью-Дели) за финансовую поддержку исследований, а также наших коллег С.Глазуна, З.Старикову, О.Жидкову и участников из Индии Н.Кушвах, М.Пал, А.Вадавале за их вклад в выполнение данных проектов (рис. 6).

### Список публикаций коллектива

1. N.P. Kushwah, V.K. Jain, A. Wadawale, O.B. Zhidkova, Z.A. Starikova and V.I. Bregadze, *J. Organomet. Chem.*, 2009, 694, 4146.
2. M.K. Pal, V.K. Jain, N.P. Kushwah, A. Wadawale, S.A. Glazun, Z.A. Starikova, V.I. Bregadze, *J. Organomet. Chem.*, 2010, 695, 2629.
3. M.K. Pal, V.K. Jain, A.P. Wadawale, S.A. Glazun, Z.A. Starikova and V.I. Bregadze, *J. Organomet. Chem.*, 2012, 696, 4257.
4. L. Jain, V.K. Jain, N. Kushwah, M.K. Pal, A.P. Wadawale, V.I. Bregadze and S.A. Glazun, *Coord. Chem. Rev.*, 2014, 258-259, 72.
5. V.K. Jain and L. Jain, *Coord. Chem. Rev.*, 2005, 249, 3075.
6. Н.П.Кушвах, О.Б.Жидкова, В.К.Джейн, А.Вадавале, З.А.Старикова, В.И.Брегадзе, Тез. Всероссийской конференции «Итоги и перспективы химии элементоорганических соединений», посвященной 110-летию со дня рожде-ния академика А.Н.Несмеянова, Москва, 28 сентября-2 октября 2009 г., С16, с. 97.
7. Vladimir I. Bregadze, Sergey A. Glazun, Olga B. Zhidkova, Zoya A. Starikova, Nisha P. Kushwah, Manoj K. Pal, Amey P. Wadawale, Vimal K. Jain, Abstr. International conference «Topical problems of organometallic and coordination chemistry» V Razuvayev lectures, Nizhni Novgorod, Russia, 2010, p. S4.
8. Vladimir I. Bregadze, Sergey A. Glazun, Olga B. Zhidkova, Zoya A. Starikova, Nisha P. Kushwah, Manoj K. Pal, Amey P. Wadawale, Vimal K. Jain, Abstr. 5th European Conference on. Boron Chemistry (EUROBORON 5), Edinburgh, UK, 2010, p. 56.
9. M.K. Pal, V.K. Jain, N.P. Kushwah, A. Wadawale, S. Glazun, Z.A. Starikova, V.I. Bregadze, Abstr. Proceedings of DAE-BRNS 3rd International Symposium on Materials Chemistry, Mumbai, India, 2010, p. 460.



- 10.O.B. Zhidkova, S.A. Glazun, Z.A. Starikova, V.I. Bregadze, N.P. Kushwah, M.K. Pal, A. Wadawale, V.K. Jain, Abstr. XIX EuCHEMS Conference on Organometallic Chemistry (EuCOMC), Toulouse, France, July 2011, P247.
- 11.V.I. Bregadze, S.A. Glazun, Z.A. Starikova, M.K. Pal, A.P. Wadawale, V.K. Jain, Abstr. 20th EuCheMS Conference on Organometallic Chemistry, St Andrews, Scotland, 30 June-4 July, 2013.
- 12.S. Glazun, Z. Starikova, R. Takazova, A. Buyanovskaya, P. Petrovskii, M. Pal, V. Jain, A. Wadawale, V. Bregadze. Abstr. International conference “Organometallic and Coordination Chemistry: Fundamental and Applied Aspects” September 1-6, 2013, N.Novgorod, Russia.

## Summary

The Indian-Russian program on chalcogenocarborane complexes of palladium and platinum was initiated through the DST and ILTP/RFBR, projects numbers 10-03-92657 and 12-03-92696. The program involved an expertise of two groups working in different areas, viz., chemistry of platinum group metal chalcogenolates (Laboratory of Prof. V. K. Jain) and carboranes (Laboratory of Prof. V. I. Bregadze). The previous investigations of the Indian team showed the numerous applications of platinum group metal chalcogenolates, in particular, in electronics as molecular

precursors for palladium chalcogenide nanomaterials.

The Indian-Russian collaboration team developed methods of synthesis of novel chalcogenocarborane complexes of platinum and palladium with different molecular compositions. The compounds where platinum and palladium atoms are linked with the carborane moiety via sulfur or selenium atom, as well as compounds where the carboraneselenolatoligand plays the bridging role between two platinum or palladium atoms. Some of these complexes were used as molecular precursors for palladium chalcogenide nanomaterials.



## Наночастицы металлов в полимерной матрице как прекурсоры сенсорных материалов

А.Д. Помогайло, Г.И. Джардимилиева, Б.Ч. Ядав, П. Тандон

Развитие нанотехнологий предоставляет уникальные возможности для создания новых сенсорных материалов. Принимая во внимание, что на базе нанотехнологий можно создавать устройства в масштабе размера отдельных молекул, новые методы контроля и обнаружения обеспечат высокие уровни чувствительности (минимальный предел обнаружения) и селективности (способность определять конкретные химические вещества или процессы), а также способность детектировать процессы или события, которые ранее обнаружить было невозможно.

Определение состава газовых сред необходимо для контроля ряда производственных процессов, сжигания топлива в тепловых агрегатах, содержания горючих или вредных примесей в производственных помещениях, на шахтах, около газопроводов и т.п. Сенсоры на основе твердых оксидных электролитов обладают уникальными свойствами по точности, нижнему пределу чувствительности определения некоторых газовых компонентов и стабильности работы. На сегодняшний день основным материалами, используемыми при изготовлении сенсоров, являются полупроводниковые оксиды металлов ( $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{WO}_3$ ). Подобные газовые сенсоры имеют приемлемую чувствительность к изменениям состава окружающей газовой среды, но обладают низкой селективностью к различным газам и их смесям. Актуальной проблемой является анализ влажности в различных средах и технологических процессах [1]. Весьма привлекательным

для сенсорных датчиков влажности является использование полимерных систем из-за быстрого отклика, простоты интегрирования и низкой стоимости [2,3]. Однако недостатком многих полимерных систем в качестве сенсорных элементов является низкая стабильность в условиях влажности, высокие значения импеданса при низкой влажности и т.д. Большинство этих проблем можно решить с использованием полимер/неорганических нанокомпозитов, которые уже находят применение в качестве химических сенсоров [4,5].

Настоящая работа посвящена апробации различных полупроводниковых (оксидных и сульфидных типов) металлополимерных систем в качестве сенсорных материалов для анализа сжиженных нефтяных газов при комнатной температуре.

### Результаты и их обсуждение

*Получение и характеристика металлополимерных нанокомпозитов.* Акриламидные (AAm) комплексы нитратов  $\text{Co}(\text{II})$ ,  $\text{Cd}(\text{II})$ ,



**ПОМОГАЙЛО  
Анатолий Дмитриевич**

профессор,  
Институт проблем  
химической физики РАН



**ДЖАРДИМИЛИЕВА  
Гульжан Исаковна**  
Институт проблем  
химической физики РАН



**ЯДАВ  
Бал Чандра**  
профессор,  
Университет  
им. Бхимрао Амбедкара



**ТАНДОН  
Пунам**  
профессор,  
Лакхнауский университет



Таблица 1. Данные элементного анализа акриламидных комплексов нитратов металлов

Соединение	Найдено/вычислено, %			
	C	H	N	M
Zn(CH <sub>2</sub> =CHCONH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O (I)	27.8/28.1	4.6/4.7	15.4/16.4	11.5/12.8
Pb(CH <sub>2</sub> =CHCONH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O (II)	22.8/23.4	3.7/3.2	12.1/13.6	34.4/33.6
Cd(CH <sub>2</sub> =CHCONH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O (III)	27.8/25.9	4.8/4.3	14.9/15.1	18.9/20.14
Co(CH <sub>2</sub> =CHCONH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O (IV)	29.6/28.6	5.0/4.4	16.7/16.7	11.7/11.6

Zn(II), Pb(II) синтезированы замещением кристаллизационной воды в кристаллогидрате нитрата металла молекулами AAm. Состав полученных комплексов  $M(NO_3)_2 \cdot 4AAm \cdot 2H_2O$ ,  $M = Co(II)$ , Zn(II), Cd(II), Pb(II)) подтвержден элементным анализом (табл. 1).

Металлополимерные композиты получали методом самораспространяющейся фронтальной полимеризации металлоксодержащих мономеров в конденсированной фазе [6, 7].

**Металлоксидные нанокомпозиты.** Для получения нанокомпозитов использованы два подхода. Первый заключался в синтезе матрично-стабилизованных наночастиц металлов *in situ* в согласованных процессах термической твердофазной полимеризации акриламидных комплексов металлов и контролируемого термолиза в изотермических условиях. Микроструктура полученных нанокомпозитов представляет собой наночастицы металлов, гомоген-

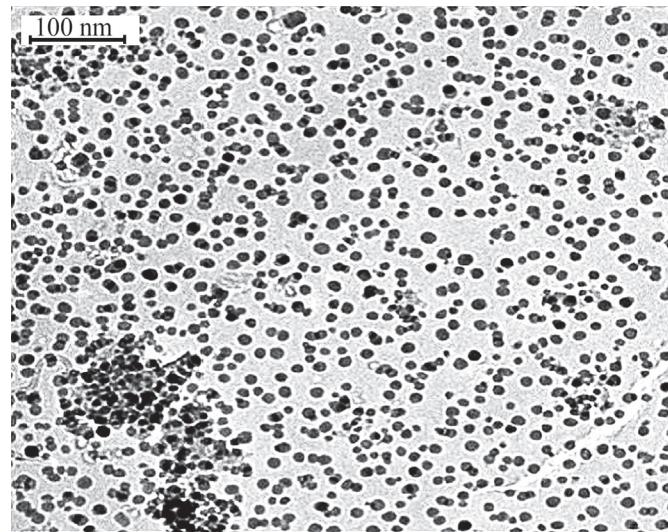


Рис. 1. Микроструктура и морфология продукта термолиза ( $T = 773$  К) акриламидного комплекса Co(II) по данным просвечивающей электронной микроскопии.

но распределенные в пиролизованной полимерной матрице (рис. 1). Частицы имеют преимущественно сферическую форму со средним диаметром 7 нм.

По данным рентгенофазового анализа (РФА) металлоксодержащей фазой продукта термолиза соединения III в самогенерируемой атмосфере при  $T = 723$  К являются наночастицы Со в пиролизованной полимерной матрице, продуктами термических превращений веществ III и IV на воздухе — соответствующие оксиды металлов (рис. 2).

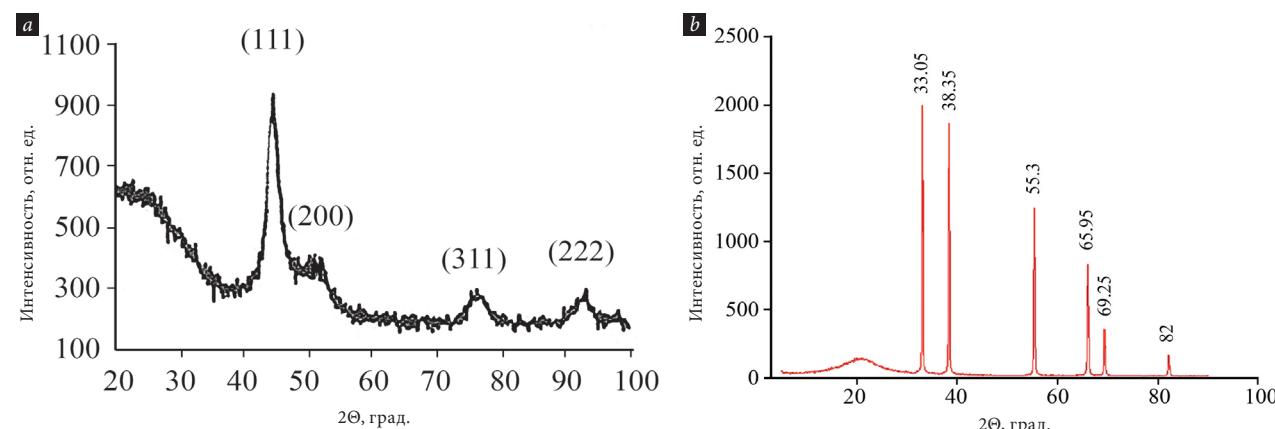


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы для продуктов термолиза акриламидных комплексов IV (a) и III (b). Условия термолиза: 723 К, самогенерируемая атмосфера (a) и воздух (b).



Для сенсорных материалов важными характеристиками являются наличие развитой поверхности и пористость. В таблице 2 приведены данные об удельной поверхности и размере пор для рассматриваемых металлоксидных нанокомпозитов. Они имеют микропористую структуру, характеризуются гомогенным распределением сферических наночастиц в матрице композита, что способствует эффективной адсорбции анализируемых газообразных веществ.

Таблица 2. Удельная поверхность и размеры пор металлоксидных нанокомпозитов

Образец	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г	$V_{пор}$ , см <sup>3</sup> /г	$\bar{r}_{пор}$ , Å
Продукт термолиза $\text{Co}(\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2)_4 (\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (IV)*	5.6	0.069	245.7
Продукт термолиза $\text{Cd}(\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2)_4 (\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (III)**	4.0	0.036	178.3

\* Продукт термолиза при 370 °C, 1 ч, в самогенерируемой атмосфере.

\*\*Продукт термолиза при 450 °C, 2 ч, на воздухе.

**Металлосульфидные нанокомпозиты.** Получение наночастиц халькогенидов металлов в полимерных матрицах традиционными путями зачастую сопряжено с определенными трудностями, связанными с проблемами совместимости компонентов и фазовой однородности, длительностью процессов и т.д., что может отражаться на фотостабильности получаемых нанокомпозитов, ослаблении или «ущемии» их люминесцентных свойств и др. [8, 9]. В настоящей работе нами предложен новый подход для получения нанокомпозитов рассматриваемого типа, который заключается в формировании полимерной матрицы и наночастиц сульфидов металлов *in situ* в ходе фронтальной полимеризации акриламидных комплексов I–III. На стадии приготовления мономерной смеси — «шихты» — в систему вводили расчетное количество сульфицирующего агента — тиомочевины, затем реакционная смесь подвергалась фронтальной полимеризации. Фазовое содержание формирующихся наночастиц определялось концентрационными соотношениями. Другими словами, формирующиеся металлополимерные цепи в ходе самораспространяющегося полимеризационного процесса при таком подходе рассматриваются как химические нанореакторы.

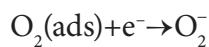
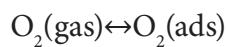
О формировании композита в ходе фронтальной полимеризации свидетельствует характерное изменение окраски твердой реакционной смеси —

от белого до лимонно-желтого цвета в случае системы CdS/PAAm и до черного — для ZnS/PAAm и PbS/PAAm. Данные РФА подтверждают наличие кристаллической фазы CdS, ZnS и PbS в соответствующих нанокомпозитах. Размытость дифракционных пиков и уширение линий указывает на формирование наночастиц. Размеры нанокристаллитов, рассчитанные по уравнению Дебая–Шеррера, составили 5–6 (CdS) и 4.5 нм (PbS). Важно, что дополнительный отжиг полученных нанокомпозитов при 450 °C не приводит к изменению фазового состава металлосульфидных наночастиц и их размера, как это продемонстрировано в случае системы на основе CdS. Одновременное формирование полиакриламидной матрицы и металлосульфидных наночастиц подтверждается данными спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). На рисунке 3 приведен КР-спектр нанокомпозита полиакриламид/CdS. В низкочастотной области спектра имеются пики при 354, 560 и 708 см<sup>-1</sup>, которые относятся к оптическим колебательным модам наночастиц CdS в полимерном композите.

**Сенсорные свойства металлополимерных нанокомпозитов.** В качестве детектируемых газов выбраны сжиженные нефтяные газы, основными компонентами которых являются пропан и бутан. Принцип действия полупроводниковых химических сенсоров основан на изменении электрофизических свойств чувствительного слоя полупроводникового образца при изменении состава анализируемой газовой среды. В кристаллах полупроводников электроны проводимости генерируются при ионизации кислородных вакансий



(доноры), содержащих локализованные электроны, сравнительно слабо связанные с кристаллической решеткой оксида металла. Электронные уровни таких доноров расположены вблизи зоны проводимости. Адсорбированные на поверхности чувствительного слоя сенсорного материала молекулы кислорода ионизируются, захватывая электроны из пленки полупроводника:



Вследствие этого приповерхностная область обедняется носителями заряда, что приводит к снижению проводимости сенсора. Сенсорный механизм восстановительных газов основан на изменении электрического сопротивления в результате реакции между молекулами газа и адсорбированным кислородом на поверхности чувствительного материала. При появлении в среде восстанавливющего газа происходит его взаимодействие с ионами кислорода с последующей десорбцией продуктов реакции:



Состояние и количество адсорбированного кислорода строго зависит от микроструктуры материала, а именно от удельной поверхности, размера частиц, а также от поверхностной морфологической структуры [10,11]. Эффективность химического сенсора увеличивается с уменьшением размера частиц [12].

**Металлоксидные нанокомпозиты.** Зависимости электрического сопротивления сенсорного мате-

риала на основе  $\text{Co}(\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2)_4(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и его нанокомпозитного аналога IV как функции времени и концентрации сжиженных нефтяных газов представлены на рисунке 4a,b соответственно. Как видно, что отклик сенсорного элемента наблюдается сразу же после поступления сжиженных нефтяных газов в измерительную камеру. Газочувствительность образца нанокомпозита IV, полученного термолизом  $\text{Co}(\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2)_4(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  в самогенерируемой атмосфере, практически на порядок превышает чувствительность к сжиженным нефтяным газам образца, полученного отжигом  $\text{Co}(\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2)_4(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  при 450 °C на воздухе. Такое различие в свойствах, вероятно, связано с морфологией, микроструктурой и размерами частиц нанокомпозита IV, как обсуждалось выше. Однако наибольшей чувствительностью обладает система, сформированная на основе  $\text{Cd}(\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2)_4(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (III) (рис. 4c), несмотря на то, что величины удельной поверхности и объем пор в последнем случае даже меньше, что может быть связано с характером хемосорбционных процессов и изменением плотности поверхностных состояний. Детальные причины такого поведения требуют дальнейшего изучения.

Одним из важнейших параметров газовых сенсоров является их быстродействие, характеризующееся временем отклика, за которое измеряемая величина изменяется от максималь-

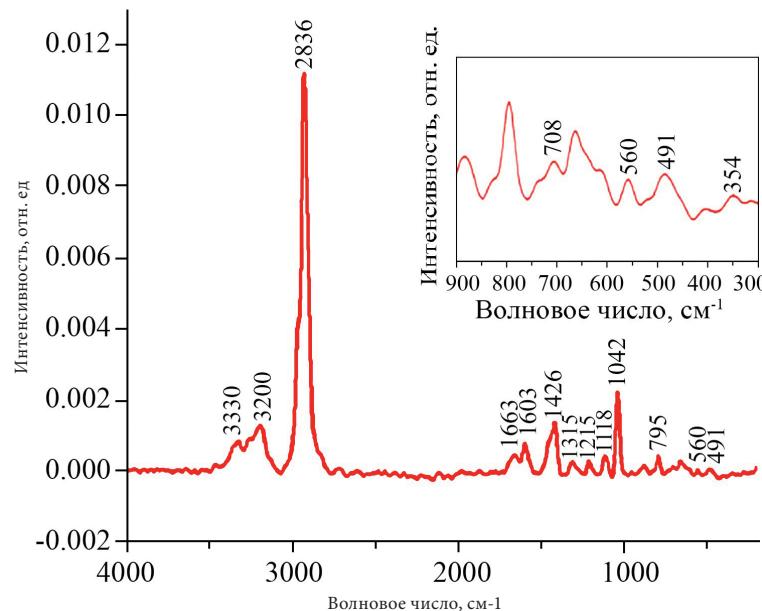


Рис. 3. Спектр комбинационного рассеяния нанокомпозита CdS/полиакриламид (на вставке — низкочастотная область спектра).

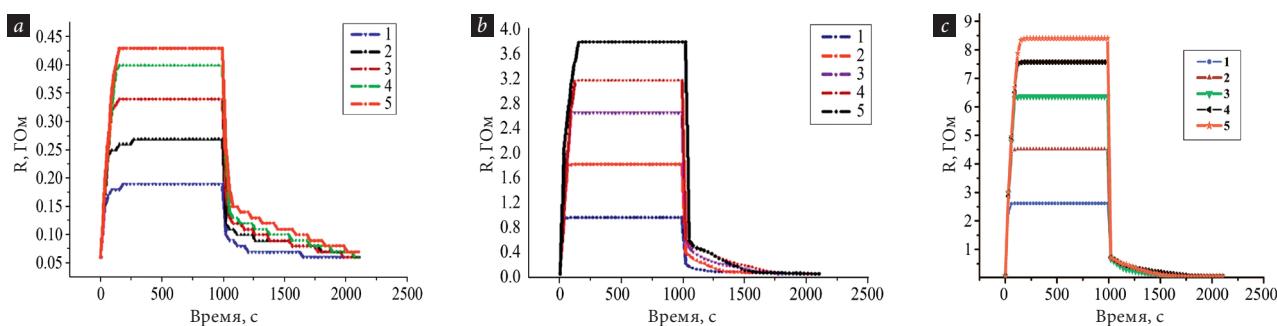


Рис. 4. Изменение электросопротивления сенсорного материала на основе  $\text{Co}(\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2)_4(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (а), нанокомпозита IV (б) и продукта термолиза  $\text{Cd}(\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2)_4(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (III) (в) при комнатной температуре для различных концентраций сжиженных нефтяных газов как функция времени.

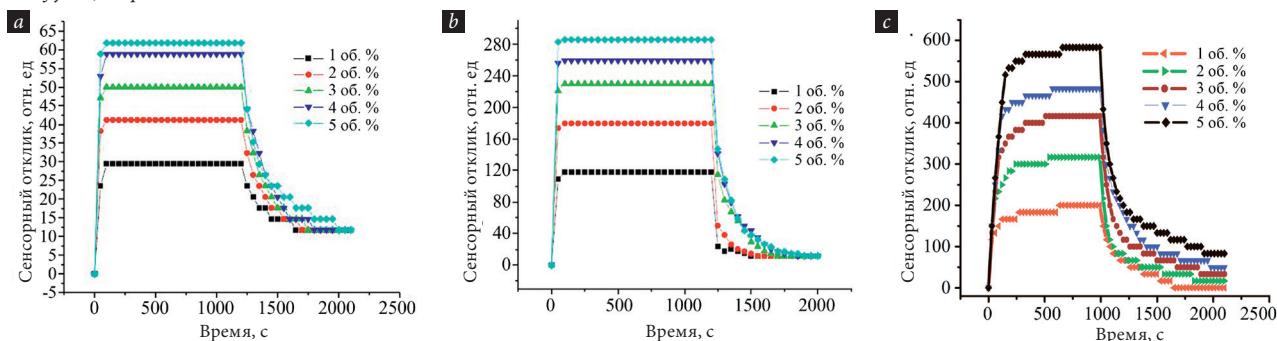


Рис. 5. Сенсорный отклик халькогенидных нанокомпозитов ZnS/PAAm (а), PbS/PAAm (б) и CdS/PAAm (в) как функция времени и концентрации сжиженных нефтяных газов.

го значения до 0.9, и временем восстановления. Для образца IV время отклика и восстановления составили 2 и 9 мин, в случае нанокомпозита III — 2 и 8 мин. Максимальные значения чувствительности сенсорных материалов на основе  $\text{Co}(\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2)_4(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и нанокомпозита IV равны соответственно 2.9 и 23.6 МОм/с. Важно отметить, что исследуемые сенсорные материалы отличаются стабильностью действия. Воспроизводимость сенсорных характеристик по истечению одного месяца составила 96% и 97% для образцов нанокомпозитов IV и III соответственно.

**Металлосульфидные нанокомпозиты.** Нами апробированы газочувствительные свойства нанокомпозитов на основе ZnS, PbS и CdS в поликариламидной матрице (ZnS/PAAm, PbS/PAAm и CdS/PAAm). Все исследованные образцы обнаруживают быстрый сенсорный отклик по отно-

шению к сжиженным нефтяным газам при комнатной температуре (рис. 5, табл. 4). После экспозиции сжиженных нефтяных газов наблюдается вначале резкое увеличение сопротивления, затем насыщение, после выпуска газа сопротивление возвращается в исходное состояние.

Таким образом, основные газочувствительные характеристики — быстрый сенсорный отклик при комнатной температуре, хорошая чувствительность и стабильность действия исследуемых нанокомпозитных материалов позволяют — рекомендовать их в качестве сенсорных элементов для детек-

Таблица 5. Газочувствительные характеристики металлосульфидных полимерных нанокомпозитов

Нанокомпозит	Максимальная чувствительность, МОм/мин	Время отклика, мин	Время восстановления, мин	Воспроизводимость, %
ZnS/PAAm	2	2	8	83*
PbS/PAAm	12	3	5	91*
CdS/PAAm	1300	3	16	92**

\* Воспроизводимость через 3 месяца.

\*\* Воспроизводимость через 1 месяц.



тирования сжиженных нефтяных газов в промышленности и мониторинга окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 11-03-00769 и 13-03-92693).

## Литература

1. R.E. Ruskin, Humidity and Moisture, Vol.1, Reinhold, 1965; Kulwicki B. M., Humidity Sensors, *J. Am. Ceram. Soc.*, 1991, 74, 697-708.
2. Zhi Chen, Chi Lu., Humidity sensors: A review of materials and mechanism, *Sensors Letters*, 2005, 3, 274
3. Yang Li, Mu-Jie Yang and Yong She, Novel resistive humidity sensor based on sodium polystyrenesulfonate/TiO<sub>2</sub> nanocomposites, *Chinese Journal of Polymer Science*, 2002, 20, 237.
4. Hua Bai and Gaoquan Shi, Gas Sensors Based on Conducting Polymers, *Sensors* 2007, 7, 267.
5. E. Massera, A. Castaldo, L. Quercia and G. Di Francia, Fabrication and characterization of polysilsesquioxanes nanocomposites based chemical sensor, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008 Vol. 129, Issue 1, 487.
6. Помогайло А.Д., Джардималиева Г.И. Успехи и проблемы фронтальной полимеризации металлокод содержащих мономеров. Высокомол. соед. А. 2004, 46, 437.
7. Помогайло А.Д., Джардималиева Г.И., Розенберг А.С., Шершнев В.А., Leonowicz M. Реакционная способность металлокод содержащих мономеров. Сообщение 69. Получение и магнитные свойства металлополимерных нанокомпозитов. Изв. АН. сер. хим., 2011, 1453.
8. X.G. Peng, M.C. Schlamp, A.V. Kadavanich, A.P. Alivisatos. Epitaxial Growth of Highly Luminescent CdSe/CdS Core/Shell Nanocrystals with Photostability and Electronic Accessibility. *J. Am. Chem. Soc.*, 1997, 119, P. 7019.
9. Sheng, W., Kim, S., Lee, J. Kim, S.W., Jensen, K., Bawend M. G. In-situ Encapsulation of Quantum Dots into Polymer Microspheres. *Langmuir*. 2006. 22, 3782.
10. Singh S., Singh M., Yadav B.C., Tandon P., Pomogailo S.I., Dzhardimalieva G.I., Pomogailo A.D. Experimental investigations on liquefied petroleum gas sensing of CdS in poly acryl amide synthesized via frontal polymerization // *Sensors and Actuators: B*. 2011, 160, 826.
11. Singh S., Yadav B.C., Tandon P., Singh M., Shukla A., Dzhardimalieva G.I., Pomogailo S.I., Golubeva N.D., Pomogailo A.D. Polymer-assisted synthesis of metallopolymer nanocomposites and their applications in liquefied petroleum gas sensing at room temperature. *Sensors and Actuators B*. 2012, 166– 167. 281.
12. Sberveglieri G., Depero L.E., Nelli P., Perego C., Sangalletti L., Ferroni M., Guidi V., Martinelli G. A novel method for the preparation of nanosized TiO<sub>2</sub> thin films. *Adv. Mater.* 1996, 8, 334.

## Summary

A new approach has been proposed for producing nanocomposite gas-sensing materials: in situ preparation of a polymer matrix and metal sulfide or oxide nanoparticles through the frontal polymerization of metal acrylamide complexes. This is a promising method to obtain metallopolymer nanocomposites which allows one to combine the formation of metal

(oxide, sulfide) nanoparticles and stabilizing polymer shell in one stage. The nanocomposites have been tested as room-temperature liquefied petroleum gas sensors. Rapid sensor response, good sensitivity, and stability demonstrate the promise of the nanocomposite materials obtained for liquefied petroleum gas detection in industrial and environmental monitoring.



## Российско-индийское сотрудничество в области гликонаук при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента науки и технологий

Н.Е. Устюжанина, Р.К. Саксена, С. Саран, А.И. Усов, М.И. Билан, М.Л. Генинг, П. Талукдар, Д.В. Титов, Ю.Е. Цветков, Д.Е. Цветков, Р. Кумар, В.К. Варшни, К.Н. Ганеш, Н.Э. Нифантьев,

Более 25 лет между Россией и Индией действует комплексная долгосрочная программа (КДП) научно-технического сотрудничества. К сожалению, вот уже долгое время адресное финансирование КДП с российской стороны практически не проводится, поэтому реализуемая РФФИ и индийским Департаментом науки и технологий (ДНТ, Department of Science and Technology) программа стала практически единственным средством поддержки совместных научных исследований.

На заседаниях Совета КДП в 2007 и 2008 годах в качестве одного из новых приоритетных направлений междисциплинарного сотрудничества были выбраны гликонауки. Приставка «глико» обозначает принадлежность органического соединения к углеводам, соответственно, в область гликонаук вовлечены исследовате-



**УСТЮЖАНИНА  
Надежда Евгеньевна**

Институт  
органической химии  
им. Н.Д. Зелинского РАН



**САКСЕНА  
Ражендра Кумар**  
профессор,  
Южный кампус  
Университета Дели



**САРАН  
Саарабх**  
Южный кампус  
Университета Дели



**УСОВ  
Анатолий Иванович**  
профессор,  
Институт органической  
химии им. Н.Д. Зелинского РАН



**БИЛАН  
Мария Ивановна**  
Институт  
органической химии  
им. Н.Д. Зелинского РАН



**ГЕНИНГ  
Марина Леонидовна**  
Институт  
органической химии  
им. Н.Д. Зелинского РАН



**ТАЛУКДАР  
Пинаки**  
Индийский  
институт науки,  
образования  
и исследований



**ТИТОВ  
Денис Валерьевич**  
Институт  
органической химии  
им. Н.Д. Зелинского РАН



**ЦВЕТКОВ  
Юрий Евгеньевич**  
Институт  
органической химии  
им. Н.Д. Зелинского РАН



**ЦВЕТКОВ  
Дмитрий  
Евгеньевич**  
Институт  
органической химии  
им. Н.Д. Зелинского РАН



**КУМАР  
Ракеш**  
Институт лесных  
исследований  
Индии



**ВАРШНИ  
Винай**  
Институт лесных  
исследований Индии



**ГАНЕШ  
Кришна**  
профессор,  
Индийский институт  
науки, образования  
и исследований



**НИФАНТЬЕВ  
Николай Эдуардович**  
член-корреспондент РАН,  
профессор,  
Институт  
органической химии  
им. Н.Д. Зелинского РАН



ли, занимающиеся синтезом углеводов, изучением их структуры, биосинтеза и механизма участия в процессах клеточного распознавания, в том числе и определяющих развитие многих болезней. Данное направление наук сегодня очень активно развивается именно в связи с тем, что оно открывает новые возможности для создания эффективных лекарственных препаратов для борьбы с такими опасными и клинически значимыми заболеваниями, как рак, бактериальные, грибковые и другие инфекции, а также воспаления, диабет, наследственные генетические нарушения и другие. Именно поэтому, кроме таких терминов, как гликохимия, гликобиология, гликотехнология, гликочины и др., в международном научном лексиконе уверенно закрепился и термин гликолекарство. Таковыми, например, являются зарегистрированные в последние годы или находящиеся сейчас в конечной фазе клинических испытаний инновационные антикоагулянты, противогриппозные, антиметастатические, антиастматические средства и др.

Руководством КДП было поручено члену-корреспонденту РАН Н.Э. Нифантьеву и профессору К. Ганешу, директору Индийского института науки, образования и исследований в г. Пуна (IISER-Pune) координировать работы в России и Индии соответственно. Ими были проанализированы работы в области гликонаук в обеих странах и проведен российско-индийский симпозиум по гликонаукам (Russian-Indian Symposium on Glycosciences; 13-16 июня 2011 года) при поддержке РАН, РФФИ и ДНТ.

Симпозиум проходил в Институте органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН (ИОХ РАН) и в его работе приняли участие ведущие российские и индийские специалисты, представляющие разные регионы и ключевые исследовательские центры обеих стран. Обширная научная программа симпозиума включала в себя доклады по самым разным направлениям гликонаук и стала не только площадкой для общения маститых ученых из двух стран, но и школой для молодых исследователей. Они прослушали блестящие сообщения о самых последних достижениях в области исследования углеводов. Например, доклад директора Индийского института интегративной медицины из Джамму профессора Рама Вишвакарма был посвящен синтезу и биохимии гликолипида — гликозилфосфатидилинозитола, являющегося якорным элементом многих гликопroteинов для их фиксации на клеточной мембране. Заведующий лабораторией химии углеводов ИОХ РАН профессор



Фотография участников российско-индийского симпозиума по гликонаукам (ИОХ РАН, Москва).



## 10-ЛЕТИЕ СОТРУДНИЧЕСТВА РФФИ И ДНТ В ПОДДЕРЖКЕ РОССИЙСКО-ИНДИЙСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ю.А. Книрель рассказал о структуре и биосинтезе липополисахаридов бактерий. Заведующая лабораторией химической трансформации антибиотиков Научно-исследовательского института по изысканию новых антибиотиков им. Г.Ф. Гаузе РАН профессор М.Н. Преображенская в своем выступлении показала взаимосвязь между структурой и противоопухолевой активностью ауреолиевых антибиотиков. Директор Центрального исследовательского института лекарств из Лакнау профессор Тушар Чакраборти просуммировал в своем выступлении результаты изучения нового класса гибридных соединений, содержащих углеводные фрагменты, в ряду которых найдены перспективные антимикробные препараты. О новых структурах и свойствах олигогликозидов, извлеченных из морских губок и иглокожих, а также о результатах исследования олиго- и полисахаридов морских микроорганизмов, рассказал директор Тихоокеанского института биоорганической химии ДО РАН академик В.А. Стоник.

Большой интерес вызвал и пленарный доклад сотрудницы лаборатории гликоконъюгатов ИОХ РАН к.х.н. Н.Е. Устюжаниной, посвященный результатам широких исследований, направленных на выяснение строения фармакофорных фрагментов полисахаридов фукоиданов из бурых водорослей и морских беспозвоночных. В этих работах, в которых кроме сотрудников ИОХ РАН активно участвуют специалисты из ведущих зарубежных исследовательских центров, уже найдены и синтезированы весьма перспективные лекарственные соединения, показавшие высокую активность в экспериментах на животных.

Благодаря финансированию симпозиума РФФИ и Министерством науки и технологии Индии, а также поддержке РАН и спонсора, компании «АКРУС», стало возможным проведение симпозиума без регистрационных взносов, что, в свою очередь, открыло вход на заседания многим участникам и слушателям, особенно молодым.

С учетом этого в 2011 году по инициативе ЮНЕСКО во всем мире отмечался Международный год химии, в ходе симпозиума была проведена специальная сессия, посвященная химическому образованию в России и Индии. О том, какое значение придается подготовке научных кадров

в Индийском институте науки, образования и исследований в Пуне, рассказал сопредседатель симпозиума профессор Кришна Ганеш. Возглавляемый им институт необычен — это высшее учебное заведение, специально созданное для подготовки исследователей. В отличие от него, ИОХ РАН — научная организация, но в нем делается очень много для подготовки кадров. Ключевыми элементами созданной и широко известной теперь уже не только в России, но и в мире, системы непрерывного химического образования являются Московский химический лицей (МХЛ) и Высший химический колледж РАН (ВХК РАН), учащиеся которых имеют возможность работать в лабораториях ИОХ РАН и других академических институтах уже со школьной скамьи. Об истории создания и сегодняшних задачах системы подготовки научных кадров для химических академических институтов в своих выступлениях рассказали заведующий отделом химии нестабильных молекул и малых циклов ИОХ РАН, председатель ВХК РАН академик О.М. Нефедов, а также директор МХЛ и сотрудник ИОХ РАН С. Семенов.

Задачами симпозиума были не только обсуждение последних «глико- достижений», но и определение направлений двусторонних исследований, а также их участников. В качестве приоритетных были выбраны следующие направления двустороннего сотрудничества:

1. Синтез и иммунологические исследования олиго- и полисахаридных антигенов клеточной стенки грибков, бактерий и паразитов.



2. Структурные, синтетические и биологические исследования бактериальных липополисахаридов.
3. Структурные, синтетические и биологические исследования углеводных соединений из морских животных и водорослей.
4. Структурный анализ и изучение биологической активности растительных полисахаридов.

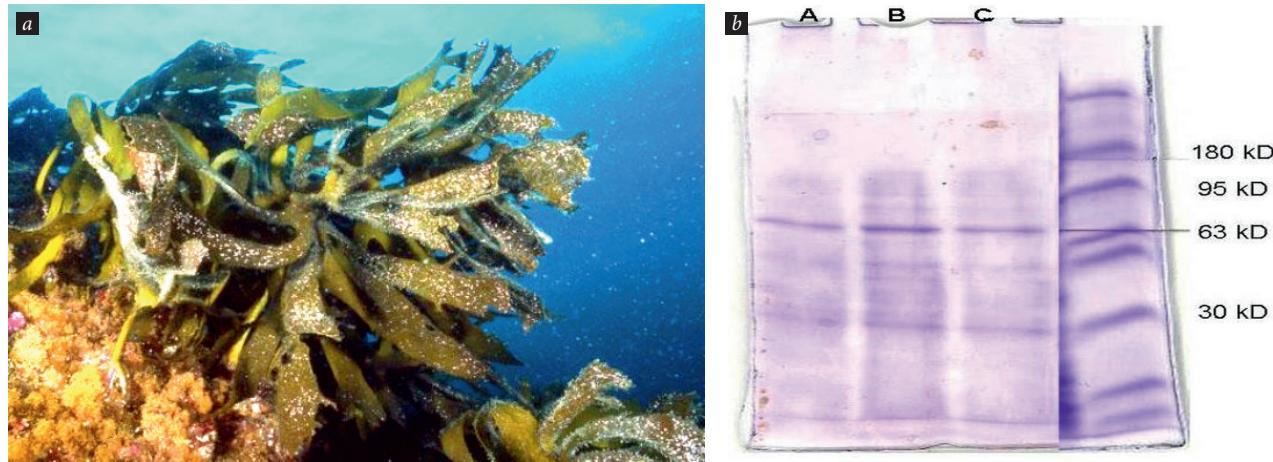
В последние годы в рамках этих направлений успешно выполнен ряд инициативных исследований в форме двусторонних проектов РФФИ–ДНТ. Они включали изучение новых подходов в химии углеводов и создании блокаторов углеводсвязывающих белков (лектинов), поиск углевод-модифицирующих ферментов, создание наноразмерных соединений на основе углеводных матриц, а также исследование ценных природных фенольных соединений, в особенности таких, как лигнаны, флавоноиды, стильбены и другие. В качестве примеров остановимся на недавно завершенных проектах.

В выполнении первого из них («Ферментативная модификация фукоиданов как основа для разработки лекарственных препара-

тов, структурные и функциональные исследования образцов из водорослей, собранных в Индии и России») участвовали сотрудники лаборатории профессора Ражендры Саксены из факультета микробиологии Южного кампуса университета Дели, а с российской — сотрудники Института биомедицинской химии им. Ореховича РАМН, Российского онкологического научного центра им. Н.Н. Блохина и ИОХ РАН. В результате проведенного исследования обнаружен фермент, модифицирующий полисахариды фукоиданы (рис. 1), что после характеристики специфичности и свойств фермента открывает путь к его использованию для получения широко востребованных лекарственных продуктов на основе фукоиданов. Разработанные подходы позволяют получить и другие фукоидан-модифицирующие ферменты, которые до сих пор систематически не исследованы. Первые результаты работ опубликованы в специализированном журнале *Pure & Applied Chemistry* (IF = 3.4) [1].

Второй российско-индийский проект, который хотелось бы отметить («Изучение способности производных цикло-(1→6)- $\beta$ -D-глюказаминов образовывать трансмембранные ионные каналы и оценка их антибактериальной активности»), выполнен под руководством молодых исследователей — к.х.н. М.Л. Генинг из ИОХ РАН и доктора П. Талукдара из Индийского института науки, образования и исследований в Пуне.

В ходе работ по проекту российскими участниками была синтезирована серия конъюгатов циклоолиго- $\beta$ -(1→6)-D-глюказаминов, состоящих из 2-5 остатков D-глюказамина с гидрофобными заместителями различной длины. Эти соедине-



**Рис. 1.** Микроорганизмы рода *Pseudoalteromonas*, паразитирующие на бурых водорослях (а), и характеристика с помощью гель-электрофореза фукозидазы (в разных концентрациях), полученной из культуральной жидкости микроорганизма *Pseudoalteromonas citrea* (Р.с.) (б).

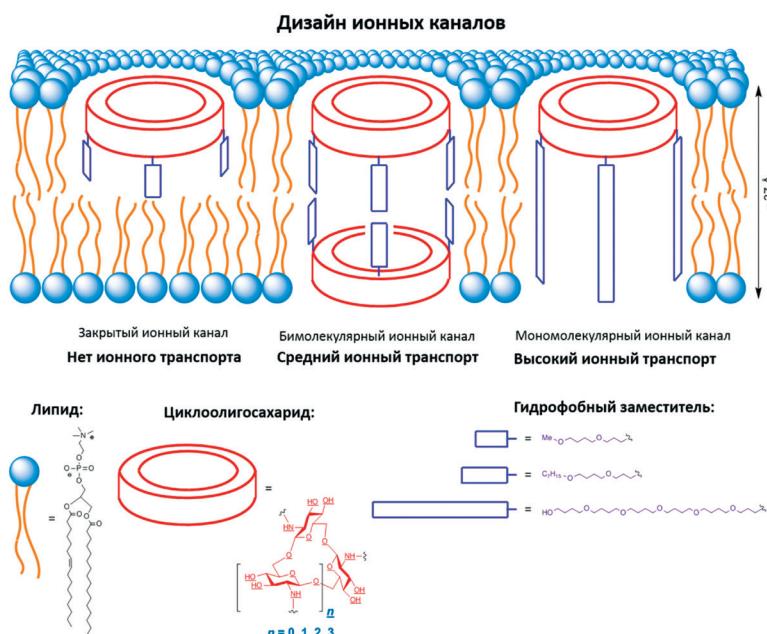


Рис. 2. Исследованные типы синтетических каналаобразующих гликолипидных производных на основе циклоолиго- $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 6)-D-глюказаминовых ядер.

ния были исследованы в лаборатории индийских коллег как агенты, способные образовывать трансмембранные ионные каналы по возможным механизмам, показанным на рисунке 2.

Проведенные мембранные исследования показали, что в зависимости от длины гидрофобных цепей синтезированные соединения способны образовывать каналы с различной ионнотранспортной активностью. При изучении пропускания однозарядных катионов и анионов была показана ионная селективность каналов, связанная с размером циклоолигосахаридного ядра. Наиболее активными оказались производные с самыми длинными гидрофобными заместителями, среди которых наиболее эффективный ионный транспорт был у конъюгата с циклическим тетрасахаридным ядром. Полученные соединения открывают путь к созданию противоинфекционных лекарств принципиально нового типа, что требует проведения дальнейших междисциплинарных исследований. Первые результаты работы коллектива российских и индийских авторов опубликованы в рейтинговых специализированных научных журналах Pure & Applied Chemistry (IF = 3.4) [2], Chemical Communications (IF = 6.4) [3], а также Chemistry — A European Journal (IF = 5.8) [4].

Третий российско-индийский проект, который хотелось бы отметить, посвящен комплексному исследованию состава экстрактов сучковых зон дре-

весины индийских деревьев. Среди них исследовались *Tectona grandis* (тиковое дерево), *Dendrocalamus hamiltonii* (бамбук), *Dalbergia sissoo* (палисандр), *Populus deltoides* (тополь), *Shorea robusta* (саловое дерево) и *Eucalyptus hybrid* (эвкалипт). Сотрудники Индийского института лесных исследований (Дерадун) провели паспортизованный сбор целевых образцов древесины, а затем собранные материалы были подвергнуты первичной обработке: механической очистке, промывке, сушке и измельчению, экстракции растворителями различной полярности. Экстракти были сконцентрированы, и в них было определено общее содержание фенолов и антиоксидантов.

Экстракти затем были переданы коллективу исследователей из ИОХ РАН для проведения работ по анализу состава, препартивному выделению компонентов экстрактов, спектральным исследованиям выделенных соединений методами ЯМР-спектроскопии и масс-спектрометрии. Также сотрудниками ИОХ РАН выполнена расшифровка спектральных данных, установлена структура выделенных соединений и проведен поиск литературных данных для выяснения, наличия полученных соединений в составе других природных источников.

Было обнаружено поразительное структурное разнообразие фенольных продуктов в составе древесины индийских деревьев. Строение некоторых из выделенных и структурно охарактеризованных соединений показано на рисунках 3-5. Так, при разделении экстрактов древесины сучковых зон палисандра *D. sissoo* обнаружены соединения 1-4 (рис. 3),

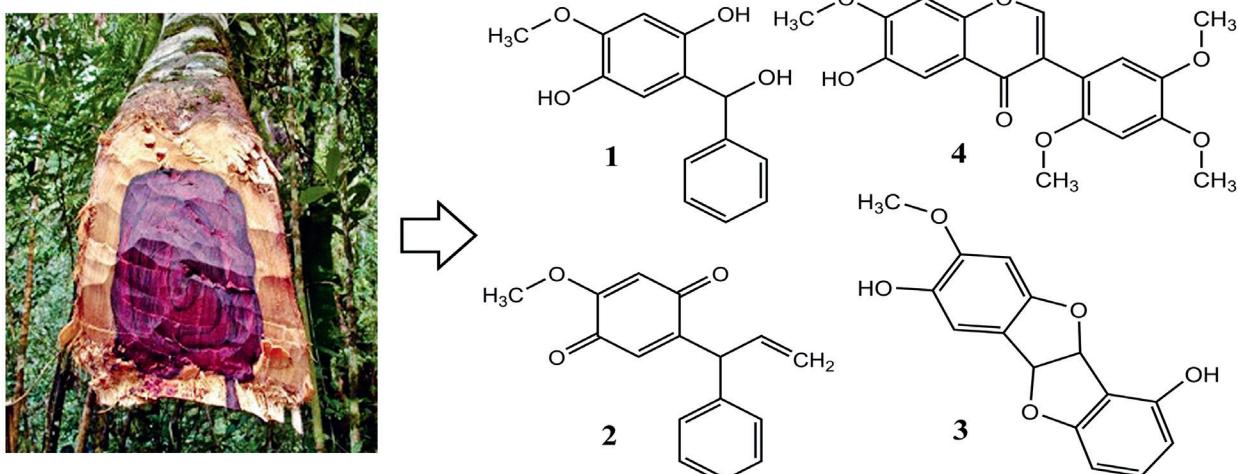


Рис. 3. Фенольные компоненты экстрактов сучковых зон древесины палисандра *D. sissoo*.

причем соединения 1 и 3 ранее описаны не были, а соединения 2 и 4 обнаружены в экстрактах листьев деревьев рода *Dalbergia*.

Из экстрактов древесины сучковых зон *S. robusta* (саловое дерево) выделены весьма необычные соединения 5 и 6, содержащие циклогептадиеновый остов. Отметим, что компоненты вегетативных органов деревьев рода *Shorea* ранее исследовались, но соединения 5 и 6 в них не были обнаружены.

Новые соединения найдены в составе экстрактов сучковых зон древесины зон тикового дерева *T. grandis*. В частности, в индивидуальном состоянии были выделены олигосахаридные производные 7 и 8 с ароматическими заместителями, которые ранее не наблюдались при анализе компонентов экстрактов вегетативных органов *T. grandis*.

В результате проведенных исследований установлены структуры как ранее не исследованных соединений, так и обнаружены новые источники описанных ранее веществ. Собранныя экспериментальная база позволяет теперь расширить исследования фенольных соединений из древесных

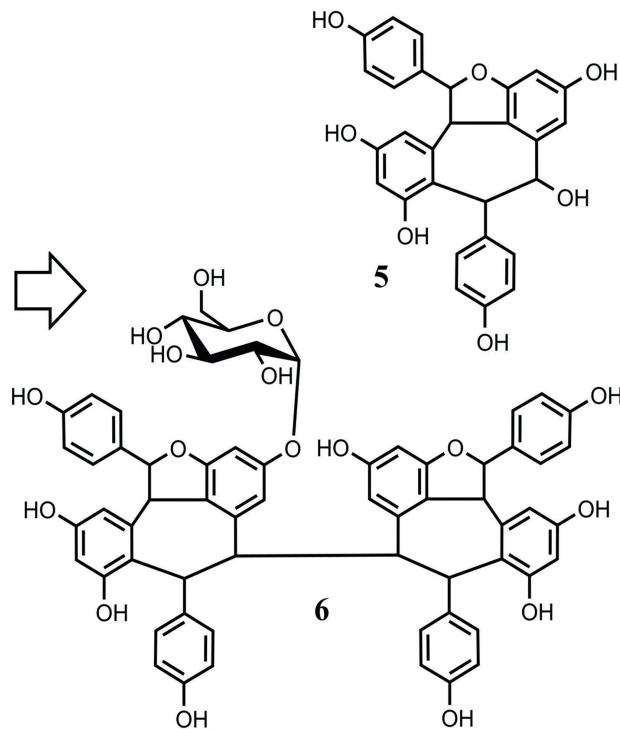
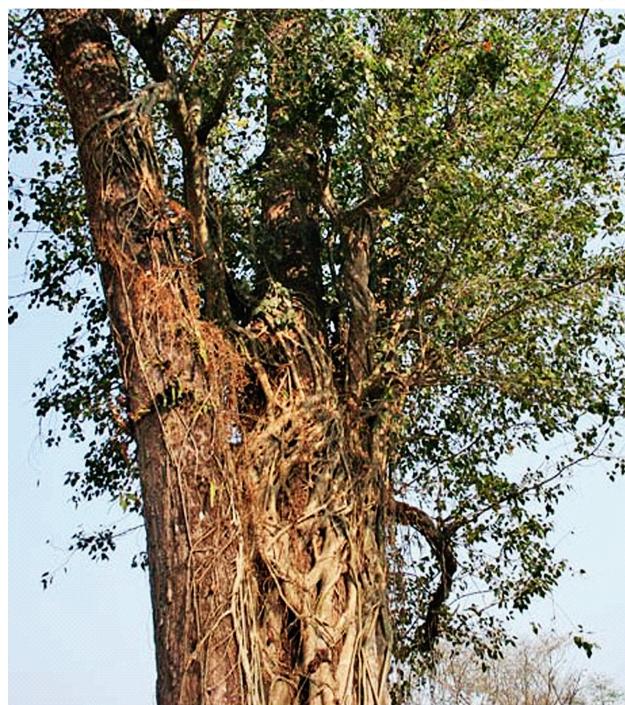


Рис. 4. Фенольные компоненты экстрактов сучковых зон древесины *S. robusta*.

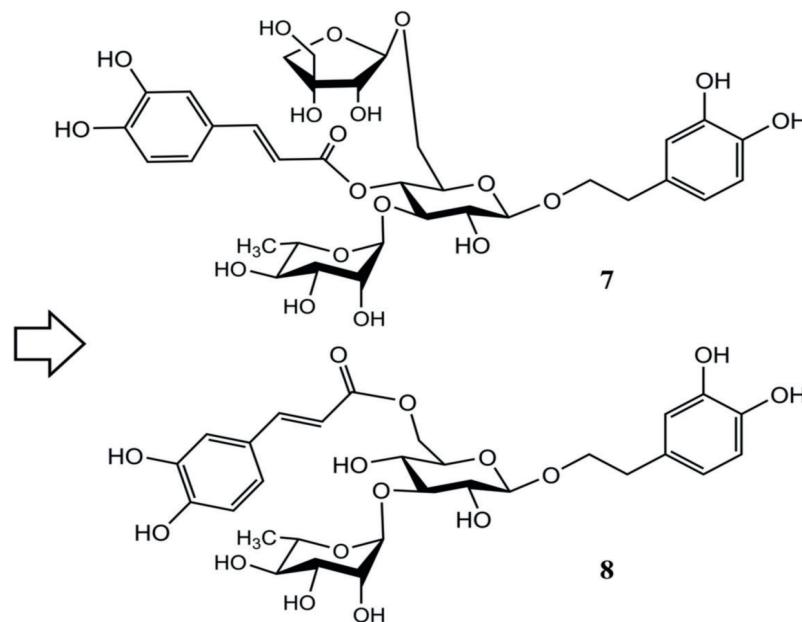


Рис. 5. Фенольные компоненты экстрактов сучковых зон древесины *T. grandis*.

экстрактов. Первые результаты работ опубликованы в специализированном журнале *Journal of Biologically Active Products from Nature* [5].

Рассмотренные выше проекты привели к получению значительных научных результатов и создали фундамент для расширения совместных работ. Это делает целесообразным включение гликонаук в перечень приоритетных направлений междисциплинарных двусторонних российско-индийских проектов не только в номинации инициативных проектов («а»), но и ориентированных фундаментальных исследований («офи») и междисциплинарных ориентированных фундаментальных исследований («офи\_м»). Желательно организовать конкурс и двух последних типов проектов, причем трехлетних, что поможет достижению более значительных научных результатов, чем в случае обыч-

но организующихся двухлетних международных проектов РФФИ.

Ну и конечно, заслуживает скорейшего возвращения практика грантов РФФИ на проведение двусторонних семинаров в России и за рубежом, ценность и эффективность которых показаны на многих примерах, в том числе и на примере прошедшего в 2011 году российско-индийского симпозиума по гликонаукам.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (мероприятие ИНД\_а; проекты №№11-03-92694-ИНД\_а, 12-03-92703, 15-53-45029 и 17-53-45030).

## Литература

- [1] N.E. Ustyuzhanina, N.A. Ushakova, M.E. Preobrazhenskaya, M.I. Bilan, E.N. Tsvetkova, V.B. Krylov, N.A. Anisimova, M.V. Kiselevskiy, N.V. Kruckovskaya, C. Li, G. Yu, S. Saran, R.K. Saxena, A.I. Usov, N.E. Nifantiev, “Fucoidans as a platform for new anticoagulant drugs discovery”, *Pure Appl. Chem.*, 86 (2014) 1365-1375.
- [2] M. L. Gening, Y.E. Tsvetkov, D.V. Titov, A.G. Gerbst, O.N. Yudina, A.A. Grachev, A.S. Shashkov, S. Vidal, A. Imbert, T. Saha, D. Kand, P. Talukdar, G.B. Pier, N.E. Nifantiev, “Linear and cyclic oligo- $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 6)-D-glucosamines: synthesis, conformations and applications for design of a vaccine and oligodentate glycoconjugates”, *Pure Appl. Chem.*, 85 (2013) 1879-1891.
- [3] T. Saha, A. Roy, M.L. Gening, D.V. Titov, A.G. Gerbst, Y.E. Tsvetkov, N.E. Nifantiev, P. Talukdar, “Cyclo-oligo-(1 $\rightarrow$ 6)- $\beta$ -D-Gl



- ucosamine Based Artificial Channels for Tunable Transmembrane Ion Transport”, *Chem. Commun.*, 50 (2014) 5514-5516.
- [4] A. Roy, T. Saha, M.L. Gening, D.V. Titov, A.G. Gerbst, Y.E. Tsvetkov, N. E. Nifantiev, P. Talukdar “Trimodal Control of Ion Transport Activity on Cyclo-oligo-(1→6)- $\beta$ -D-Glucosamine Based Artificial Ion Transport Systems” *Chem. Eur. J.*, 21 (2015) 17445-17452.
- [5] D.E. Tsvetkov, A.S. Dmitrenok, Yu. E. Tsvetkov, V.M. Menshov, D.V. Yashunsky, A.Ya. Yashin, Ya.I. Yashin, R. Kumar, V.K. Varshney, N.E. Nifantiev, “Phenylethanoid Glycosides from Teak Wood Knots and Their Antioxidant Activity”, *Journal of Biologically Active Products from Nature*, 6:4 (2016), 272-281.

## Summary

This paper summarizes the results of the Russian-Indian Symposium on Glycosciences (June 13-16, 2011, N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences), which was organized with the support from the RAS, RFBR, and DST, as well as the results of some RFBR-DST bilateral projects in the field of glycosciences. Thus, the project directed to search for fucoidan-modifying enzymes led to discovery of an enzyme capable of specific transforming fucoidan polysaccharides. It opens a way to obtaining medicinal products from these polysaccharides. Another project was directed to exploring the ability of derivatives of cyclo-(1→6)- $\beta$ -D-glucosamine to form transmembrane ion channels. Antibacterial

activity of these substances was evaluated. Identification of structural features determining their high activity provides the development of a new type of drugs. The third project is devoted to a complex study of knot area extracts of Indian trees and the structural study of the phenolic components of the extracts. An amazing structural diversity of phenolic products was discovered in wood of Indian trees. In particular, the compounds related to the flavonoids, cycloheptadienes, phenylethanoids, and their glycosylated derivatives have been isolated and structurally characterized. Important scientific results obtained in the course of these projects prove the necessity of continuation and extension of joint investigations in the described areas.



## Совместные российско-индийские проекты по исследованию производных желчных кислот и реакциям, катализируемым наночастицами палладия

Н.В. Лукашев, Д.А. Ерзунов, У. Майтра, Б.Н. Тхота,  
Р.К. Шарма, А.В. Казанцев, Г.Н. Бондаренко, О.Г. Ганина, И.П. Белецкая,

Совместный проект РФФИ и ДНТ правительства Индии (№ 08-03-91308) был поддержан в 2008 г. для совместных исследований химического факультета МГУ и Индийского института науки (г. Бангалор) в области химии производных желчных кислот. Желчные кислоты — редкий тип фациальных амфи菲尔ов, имеющие жесткую гидрофильную полость за счет гидроксильных групп, направленных в одну сторону, и изогнутую липофильную внешнюю поверхность. Производные желчных кислот широко используются в фармакологии, супрамолекулярной химии, нанотехнологиях. Соли желчных кислот являются эффективными биологическими поверхностно-активными веществами, играющими важную роль в организме животных и человека — они участвуют в солюбилизации жиров и метаболизме холестерина. Амфи菲尔ность желчных кислот можно модулировать с помощью введения дополнительных полярных групп или создавая олигомеры, в которых возможно проявление совместного действия нескольких

фрагментов желчных кислот. Хотя известно достаточное количество супрамолекулярных композиций на основе кислот, их амфи菲尔ное поведение и способность к комплексообразованию с анионами были мало изучены. Российская группа ученых во главе с академиком И.П. Белецкой более 40 лет исследует химические реакции, катализируемые комплексами переходных металлов и имеет большой опыт в создании новых лигандов необычной архитектуры. Индийская группа ученых во главе с профессором У. Майтрай более 15 лет исследует методы синтеза, комплексообразующие, гелеобразующие, супрамолекулярные и другие физико-химические свойства производных желчных кислот, в том



**ЛУКАШЕВ  
Николай Вадимович**  
профессор,  
МГУ им. М.В. Ломоносова



**ЕРЗУНОВ  
Дмитрий Александрович**  
МГУ им. М.В. Ломоносова



**МАЙТРА Удай**  
профессор,  
Институт  
науки и технологий



**ТХОТА Балу**  
Институт  
науки и технологий



**БЕЛЕЦКАЯ  
Ирина Петровна**  
академик,  
МГУ им. М.В. Ломоносова



**ШАРМА РАКЕШ**  
профессор,  
Индийский институт  
технологий



**КАЗАНЦЕВ  
Алексей Витальевич**  
МГУ им. М.В. Ломоносова



**БОНДАРЕНКО  
Григорий Николаевич**  
МГУ им. М.В. Ломоносова



**ГАНИНА  
Ольга Григорьевна**  
МГУ им. М.В. Ломоносова



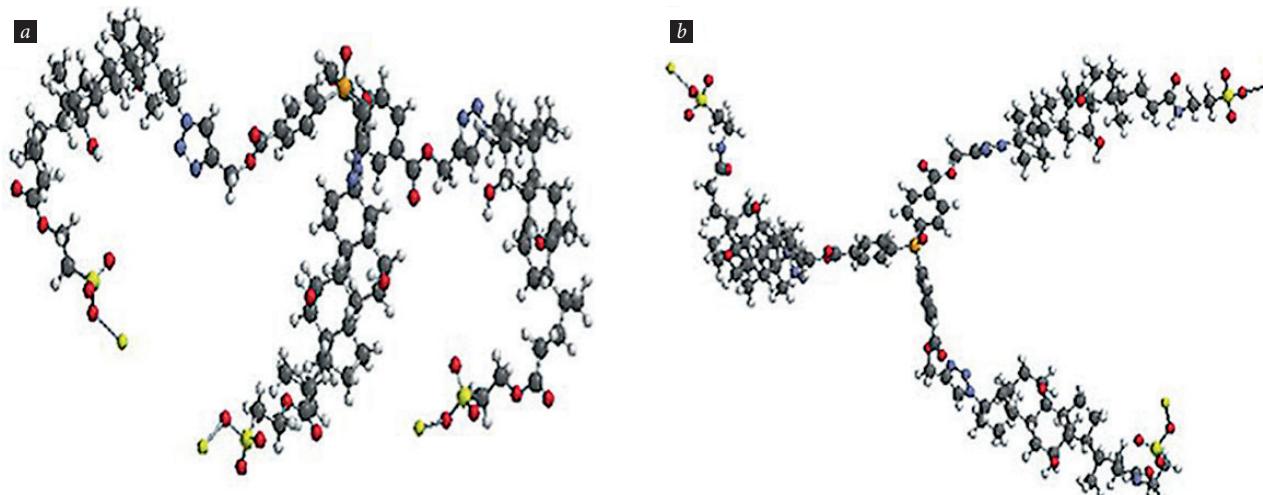
числе обладающих дендримерной структурой. Главной задачей проекта было объединение усилий международного коллектива химиков, владеющих современными методами органического синтеза, классического органического синтеза производных желчных кислот, с широкими возможностями и многолетним опытом по исследованию физико-химических и различных прикладных свойств наноразмерных молекул — производных желчных кислот, включая их возможную биологическую, в частности фармакологическую активность.

Использование металлокатализируемых реакций принципиально важно для получения высоких выходов подобных сложных молекул, поскольку именно в координационной сфере переходного металла происходит «встреча», слабое комплексообразование и последующее взаимодействие двух линейных фрагментов, что приводит либо к замыканию в макроцикл, либо к образованию молекул со сложной архитектурой. Наши партнерами по проекту было показано, что именно полости

дендримеров на основе желчных кислот могут выполнять роль своеобразного наноразмерного реактора, способного влиять на направление и скорость реакции. Среди реакций, катализируемых комплексами переходных металлов, нами использованы два основных подхода для синтеза — реакции Pd-катализируемого аминирования с использованием полиаминов, а также диполярное циклоприсоединение азидов и ацетиленов в присутствии соединений меди, приводящие к триазольным мостикам с высоким выходом (CuAAC, или так называемая click-реакция по Шарплесу) [1–3].

Применение CuAAC-реакции для синтеза разнообразных стероидных производных оказалось очень плодотворным. Оно позволило получать разнообразные пинцерные лиганды, сложные химерные молекулы — триподы, способные образовывать молекулярные «карманы» и сложные супрамолекулярные композиции. Образование триазольных мостиков имеет не только химический смысл (быстрая реакция, высокий выход), но и биохимическое значение, поскольку известно, что триазольные производные желчных кислот обладают значительной противогрибковой активностью, причем эта активность связана с ионофорным действием подобных соединений.

Расчет предпочтительной конформации триподальных лигандов показал критическое влияние на геометрию молекулы конфигурации третьего атома углерода стероидного каркаса (рис. 1).



*Рис. 1. Расчет возможного пространственного строения tripodальных лигандов с  $\alpha$ - (a) или  $\beta$ -ориентацией (b) триазольного кольца фрагмента желчной кислоты.*

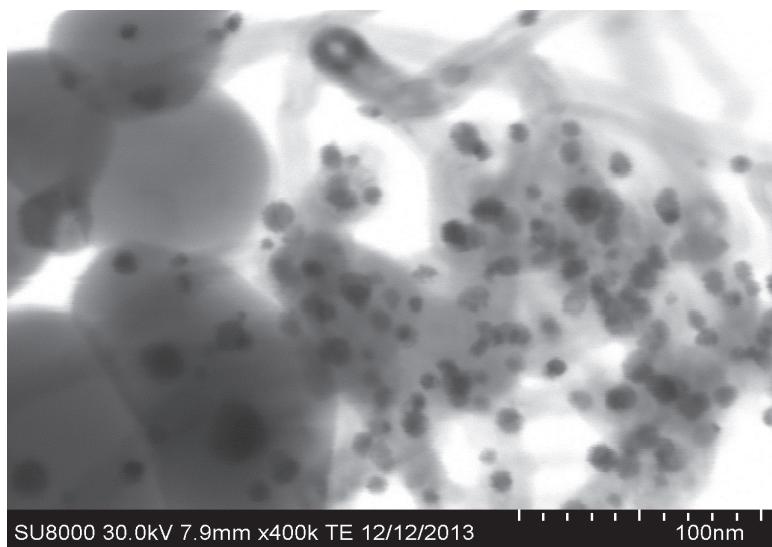
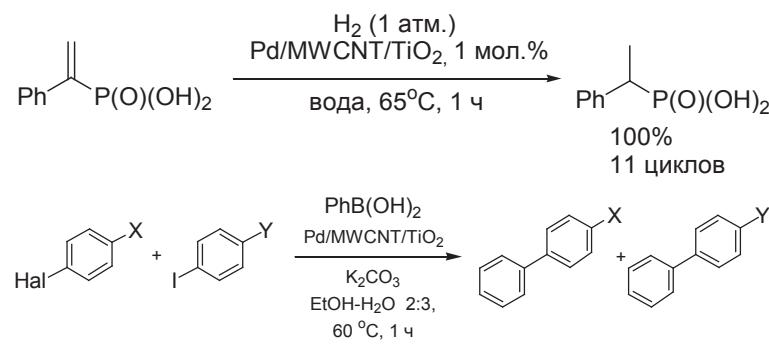


Рис. 2. Примеры Pd- наночастиц на подложке.

В случае  $\alpha$ -ориентации (рис. 1a) молекула действительно может иметь пинцерную форму с тремя «щупальцами», направленными в одну сторону и образующими «карман». В случае  $\beta$ -ориентации (рис. 1b) молекула скорее напоминает пропеллер. Действительно, оказалось, что гели в органических растворителях при низкой концентрации образует именно  $\alpha$ -ориентированный трипод. В группе профессора Майтры был проведен комплекс исследований супрамолекулярной структуры полученных продуктов — определена критическая концентрация мицеллообразования, возможность солюбилизации гидрофобных и гидрофильных молекул в растворителе с противоположными солюбилизирующими свойствами. Размер наночастиц установлен методом динамического светорассеяния [2].

Похожие триподальные лиганды, полученные с помощью процесса CuAAC, были впоследствии использованы в российской группе для исследования их комплексообразования с анионами. Как известно, желчные кислоты могут встраиваться в липидные

### Схема 1



мембранны и активировать натриевые ионные каналы. Амидные рецепторы на основе стероидных молекул способны осуществлять транспорт анионов через мембранны. В группе академика И.П. Белецкой были получены данные по высоким константам связывания анионов (фторида, гидросульфата, а также весьма гидрофобного аниона — бензоата) с триподальными лигандами в мольном соотношении 2 : 1 [3]. Пинцерные лиганды со стероидными щупальцами и антрахиноновым мостиком показали превосходные результаты по связыванию не только с анионами, но и с катионами металлов, традиционно используемых в качестве тестовых —  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Al}^{3+}$  [4].

Сотрудничество в рамках другого российско-индийского проекта РФФИ (№ 12-03-92701) с доктором Р.К. Шармой (Индийский институт технологии, Джодхпур, Раджастан) заключалось в изучении каталитических реакций на основе палладиевых наночастиц (PdNPs), нанесенных на углеродистые материалы, в различных реакциях образования новой связи углерод–углерод. Доктор Шарма отвечал за получение углеродных многослойных нанотрубок (MWCNT) и нанесение на них палладия с образованием наночастиц, а российская сторона — за изучение каталитических реакций. Работа была достаточно успешной и завершилась совместной публикацией, хотя, несомненные трудности заключались в своевременной передаче материала. На рисунке 2 приведены примеры Pd-наночастиц на подложке при изучении катализа в гидрировании 1-фенилэтенилфосфоновой кислоты [5] (схема 1) и в реакции Сузуки, где были получены новые факты, проливающие свет на истинный механизм катализа нанопалладием.



Подводя итог, можно сказать, что плодотворное сотрудничество российских и индийских научных групп заключалось в международном разделении труда, поскольку каждая группа ученых работала в той области, где она имеет наибольший опыт. В рамках проекта академик И.П. Белецкая выступила с лекциями в Индийском ин-

ституте науки (г. Бангалор) и в Технологическом университете (г. Мумбай), профессор У. Майтра прочитал замечательную лекцию на химическом факультете МГУ. Совместная работа российских ученых с индийскими коллегами привела к получению фундаментальных результатов по катализу наночастицами палладия и создало основу для продолжения исследований в области синтеза и исследования полезных свойств разнообразных лигандов на основе желчных кислот.

## Литература

1. Averin, A.D.; Ranyuk, E.R.; Lukashev, N.V.; Beletskaya, I.P. *Chem. Eur. J.* 2005, 11, 7030-7039.
2. Thota, B.N.S.; Savyasachi, A.J.; Lukashev, N.; Beletskaya, I.; Maitra, U. *Eur. J. Org. Chem.* 2014, 1406-1415.
3. Erzunov, D.A.; Latyshev, G.V.; Averin, A.D.; Beletskaya, I.P.; Lukashev, N.V. *Eur. J. Org. Chem.* 2015, 6289-6297.
4. Lukashev, N.V.; Grabovyi, G.A.; Erzunov, D.A.; Kazantsev, A.V.; Latyshev, G.V.; Averin, A.D.; Beletskaya, I.P. *Beilstein J. Org. Chem.*, 2017, 564-570.
5. Бондаренко Г.Н.; Ганина О.Н.; Шарма Р.К.; Белецкая И.П. *Изв. АН Сер. хим.*, 2014, 1856-1859.

## Summary

The copper-catalyzed CuAAC reaction was used for the synthesis of tripodal ligands derived of bile acids capable of forming molecular «pockets» and complex supramolecular compositions, as well as exhibiting the properties of ionophores. The research of the supramolecular structure of the products obtained was carried out. A critical concentration of micelle formation was determined, and the possibility of solubilizing hydrophobic and hy-

drophilic molecules in solvents with opposite solubilizing properties was observed. The size of nanoparticles was established by the DLS. Similar tripodal ligands obtained by the CuAAC process were subsequently used in the Russian group to study their complexation with anions. The catalytic reactions based on palladium nanoparticles (PdNPs) deposited on carbonaceous materials have been studied in various reactions to form a new carbon-carbon bond.



## 10 лет сотрудничества Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента науки и технологий в области системной биологии

В.Ю. Макеев

На международной зимней школе по биоинформатике в университете г. Хайдерабада в декабре 2006 года одним из наиболее ярких выступлений была лекция профессора Ш. Манде про дупликации шаперонов у *Mycobacterium tuberculosis*. В своей лекции он также затронул тему анализа сетей белок-белковых взаимодействий у бактерий. Областью его основной специализации был рентгеноструктурный анализ, но в последнее время он больше занимался сетями белок-белковых взаимодействий в бактериальных клетках.

Мы обнаружили, что наши исследования во многом дополняли друг друга. Действительно, транскрипция генов регулируется белками, синтез которых контролируется продуктами других генов. Однако знание активности генов в различных условиях недостаточно для того, чтобы восстановить сеть молекулярных взаимодействий, ответственную за переключения генов бактерий, поскольку многие белки-регуляторы могут работать, только будучи активированы (например фосфорилированы) белками-ферментами. Поэтому реальное значение имеет только сеть, объединяющая как взаимодействия ДНК-белок, так и белок-белковые взаимодействия. В настоящее время собрано довольно много данных по активности бактериальных генов в различных условиях и по белок-белковым взаимодействиям у бактерий. Однако эти данные получены различными экспериментальными методами и в различных условиях, поэтому их интеграция сталкивается с большими сложностями. Несмотря на относительную простоту генетического аппарата бактерий, полная модель, позволяющая аккуратно предсказывать изменения активности генов, например при воздействии лекарств, до сих пор не по-

строена даже для хорошо изученной кишечной палочки.

При нормальном росте метаболизм бактериальной клетки достаточно сложен и большое количество генов работает в самых разнообразных условиях, поэтому восстановить структуру системы регуляции генов по данным о разнородной активности генов в серии конкретных условий не очень легко. В то же время при сильном стрессе, например повреждении ДНК или резком повышении температуры, нормальной реакцией клетки является остановка работы практически всех генов, обеспечивающих нормальную жизнедеятельность, и запуск генов, отвечающих за выживание клетки в экстремальных условиях. Например, при повышении температуры синтезируются специальные белки-шапероны, защищающие функциональные белки клетки от тепловой денатурации. Список генов, работающих в условиях стресса и, как следствие, набор присутствующих в клетке белков, должен представлять отчетливый контраст с генами, работающими при нормальной жизнедеятельности клетки, и характерными для этих условий белками.

Наша работа сводилась к сравнению профилей экспрессии генов



**МАКЕЕВ  
Всеволод Юрьевич**  
член-корреспондент РАН,  
профессор,  
Институт  
общей генетики РАН  
им Н.И. Вавилова



бактерий, полученных на экспрессионных чипах и лежащих в открытом доступе, с данными по белок-белковому взаимодействию, полученными разными высокопроизводительными методами, в частности с помощью параллельной иммунопреципитации. Эти методы давали информацию об активности генов и концентрации белков в масштабе полного генома и протеома, но вероятность ошибочно-го значения для каждой отдельной молекулы была достаточно высока. Тем не менее весь комплекс данных открывал новые возможности благодаря тому, что впервые открылась картина синхронных переключений групп генов при переходе от одних условий культивирования бактерий к другим. Мы сформулировали задачу поиска самосогласованных данных, которые бы позволили выделить надежную информацию о согласованных изменениях экспрессии групп генов при включении ответа на стресс на фоне колебаний фоновой экспрессии генов в разных образцах. Анализ данных, полученных на чипах, был темой работы Ш. Хежд, у нее уже были процессированные чипы по экспрессии генов *E. coli* в разных условиях, и после ряда попыток нам удалось построить внутренний контроль, основываясь на генах, принадлежащих одному и тому же оперону. Благодаря этому удалось оценить «шум» в данных, что стало хорошей стартовой точкой для дальнейшей работы.

К сожалению, большая загруженность Ш. Манде не позволила ей приехать в Россию в 2008 году, и мы продвигали наш проект используя электронные средства коммуникации. К этому времени Ю.А. Медведевой удалось создать оригинальную программу по опре-

делению модулонон в бактериях, основанную на совместном анализе экспрессионных, функциональных и геномных данных, которая не уступала мировым аналогам. Нам удалось найти несколько генов, имеющих отношение к отклику на те или иные стрессы, которые не были описаны ни в аннотации генома, ни в популярных интернет-ресурсах. Однако при внимательном изучении литературы оказалось, что информация о практических всех этих генах уже была опубликована в различных статьях, посвященным экспериментальным исследованиям реакций на стресс.

В дальнейшем по предложению Ш. Манде мы переключились на генные сети возбудителя туберкулеза — бактерии *Mycobacterium tuberculosis*, которая значительно менее изучена, чем *E. coli*. В то же время это достаточно сложный для изучения внутриклеточный паразит, для которого определение характерных состояний клетки может привести к большим успехам в медицинской практике. В лаборатории Ш. Манде был выделен и кристаллизован белок *Mycobacterium tuberculosis*, взаимодействующий с ДНК и имеющий структуру, сходную со структурой белков-шаперонов, отвечающих за стабильность белковых молекул при тепловом стрессе. Для выяснения специфики взаимодействия нового белка с ДНК в Индии были проведены эксперименты по иммунопреципитации хроматина антителами на новый белок. Мы провели обработку этих экспериментов, специфичность которых была не очень высока, и с помощью вычислительных методов смогли повысить качество определения участков ДНК, специфически взаимодействующих с этим белком. Эти вычислительные эксперименты стали одной из первых тестовых площадок для нашей программы ChIPmunk, анализирующей специфику взаимодействия сегментов ДНК с регуляторными белками. Анализ данных Ш. Манде позволил нам существенно улучшить эту программу, что в дальнейшем легло в основу ряда публикаций нашей лаборатории.

В результате нашей работы был разработан метод, позволяющий по ряду признаков надежно определять, какие группы генов совместно активируются (так называемые модулоны) [1]. Метод был протестирован на кишечной палочке [2] и успешно применен на туберкулезной микобактерии.



Рис. 1. На конференции МССМВ в 2009 году. Слева направо: М. Бансал, Ш. Манде, В.Ю. Макеев, А.А. Катанова, Ш. Манде.

Наша совместная работа с Ш. Манде послужила катализатором нескольких совместных российско-индийских проектов. В частности, в 2011 году был организован совместный российско-индийский семинар по вычислительной биологии, проходивший как параллельное мероприятие во время Московской конференции по вычислительной биологии (МССМВ'11) [3]. Этот семинар получил финансовую поддержку РФФИ (проект № 11-04-92753-ИНД\_г) и позволил организовать визит десяти ведущих индийских ученых в Москву и ознакомить российских участников с лучшими примерами научных исследований в области вычислительной биологии, ведущихся в Индии.

Наше сотрудничество дало начало новым, независимым проектам. Например, знакомство с коллегами из университета Хайдерабада, иницированное Ш. Манде, привело к тому, что в 2016 г. Ю. Медведева, доктор Р. Гулер (ЮАР) и доктор Ш. Кошла (Индия, Университет Хайдерабада) начали совместный проект, посвященный изучению роли эпигенетических факторов и длинных некодирующих РНК в ответе клеток «хозяина» на инфекцию туберкулезной микобактерии. Группа Шанжива Кошлы недавно показала, что микобактерия синтезирует белки, которые могут метилировать ДНК «хозяина» и видоизменять хроматин, модифицируя гистоны. При этом подавляется

активность генов, вовлеченных в первую стадию защиты против микобактерии. Проект включает в себя всесторонний экспериментальный и биоинформационный анализ эпигенетических изменений в зараженных клетках. Участники проекта подали заявку в РФФИ на конкурс БРИКС (2016) и надеются на поддержку проекта со стороны фонда.

Я очень благодарен индийским коллегам за плодотворное сотрудничество, гостеприимство во время наших поездок в Индию и высоко ценю поддержку Российского фонда фундаментальных исследований, благодаря которому стало возможным провести интересное научное исследование и получить уникальный опыт сотрудничества с такой замечательной страной, как Индия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 08-04-91318-ИНД\_а, 10-04-92663-ИНД\_а, 11-04-92753-ИНД\_г и 13-04-92710-ИНД\_а).



## Литература

1. Хежд Ш., Климова Е.Ю., Манде Ш., Медведева Ю.А., Макеев В.Ю., Пермина Е.А. Использование пар генов, входящих в один оперон, для определения порога значимости коэффициента корреляции уровней экспрессии генов. Биофизика, 2011, т. 56, вып. 6, стр. 1062-1064.
2. Permina E.A., Medvedeva Y.A., Baeck P.M., Hegde S.R., Mande S.C., Makeev V.J. Identification of self-consistent modulons from bacterial microarray expression data with the help of structured regulon gene sets. J. Biomol. Struct. Dyn. 2013;31(1):115-24.
3. Mande S. Prediction of genome-wide interactions reveals communication signals during Mycobacterial latency. Proc. 5Th Moscow Conference in Computational Molecular Biology, MCCMB'11, Moscow July 21 — July 24, 2011.

## Summary

Prof. Vsevolod Makeev made the acquaintance with Prof. Shekhar Mande in December 2006, when Vsevolod took part in the Winter Bioinformatics School in Hyderabad, Andhra Pradesh. Vsevolod was greatly impressed by Shekhar's lecture on the protein-protein interaction networks in bacteria. Since Vsevolod's lab in Moscow studied the regulation of transcription by proteins interacting with DNA, it became clear that two groups had the highly complementary experience. Indeed, many protein factors involved in switching of gene activity must be activated by other proteins. So, to understand gene network operation it is necessary to analyze both DNA-protein and protein-protein interactions. Stress response was selected as a test system.

The collaboration was supported by the RFBR/DST program for 2008. The planned research activities included a number of travels to India for Russian collaborators and return visits of Indian collaborators to Moscow. Basically, the research consisted in comparing bacterial gene expression data obtained from public microarray databases with high throughput protein-protein interaction data obtained from various sources. The main problem was the variable data quality, with some samples displaying very clear results, whereas other samples being very noisy. We developed a set of data internal controls, which allowed automatic discarding of poor quality samples. The algorithm for automatic identification

of bacterial modulons with parallel quality controlling [1] was published in the Journal of Biomolecular Structure and Dynamics [2] and later served as a starting point for a number of approaches to automatic data analysis developed in Moscow. The project was renewed twice in 2010 and 2012, with graduate switching from *E. coli* to *M. tuberculosis* as the primary object. *M. tuberculosis* is a significantly less studied species than *E. coli*, but it is obviously very important for human well being.

The Indian counterparts visited Moscow in 2009 and 2011, with one graduate student (Shubhada Hegde) coming to Moscow for several months in 2012. A Russian-Indian workshop in Moscow was supported by the RFBR-DST collaborative call, and took place in 2011 as a follow up to the Moscow Conference in Computational Molecular Biology [3]. It allowed 10 leading Indian scientists to present their results for a high level audience in Moscow and to form new contacts with Russian colleagues. The participants are very thankful to the officers of the Embassy of India in Moscow for their thoughtful support, and particularly to Rama Swami Bansal, the counsellor in science and technology, for a warm reception in her residence.

The authors are deeply thankful for the RFBR and DST, which made possible this exciting and fruitful collaboration. The research was supported by the RFBR-DST projects 08-04-91318, 10-04-92663, 11-04-92753, and 13-04-92710.



## Взаимовыгодное сотрудничество ученых России и Индии — основа успешного развития науки

С.И. Аллахвердиев, А. Джаджу

Уже в течение более 20 лет ученые Института фундаментальных проблем биологии Российской академии наук (ИФПБ РАН) (ранее Институт фотосинтеза и почвоведения РАН) плодотворно (более 26 совместных научных публикаций) сотрудничают с учеными Индии нескольких научно-образовательных центров в решении вопросов действия абиотических стрессов (включая гербициды и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)) на фотосинтетический аппарат. В группе наших индийских коллег есть как известные и признанные во всем мире ученые: Анжана Джаджу (Anjana Jajoo), Прасана Моханти (Prasanna Mohanty); Судхакар Бхарти (Sudhakar Bharti); так и начинающие исследователи, студенты и аспиранты: Пуджа Мехта (Pooja Mehta); Сонал Матур (Sonal Mathur); Рупал Синг Томар (Rupal Singh-Tomar); Тина Тонгра (Teena Tongra); Дивя Агравал (Divya Agrawal), School of Life Science, Devi Ahilya University, Indore 452017, MP, India.

### Область научных интересов

В область научных интересов объединенной российской-индийской научно-исследовательской группы входит широкий круг вопросов, связанных с исследованием молекулярных механизмов фотосинтеза. Изучается влияние полициклических ароматических углеводородов на первичные процессы фотосинтеза на всех уровнях фотосинтетического аппарата, включая фотосистему 2 (ФС-2) и фотосистему 1 (ФС-1); механизмы действия ПАУ и продуктов их разложения, индуцированного светом видимого и ультрафиолетового диапазона, на фотохимическую активность ФС-2, на про/антиоксидантный баланс при кратковременном и длительном воздействии; пути регу-

ляции трансдукции стрессового сигнала при действии данных поллютантов и пути их трансформации в малотоксичные соединения; возможности быстрого скрининга полициклических ароматических углеводородов на суспензиях микроводорослей и цианобактерий; мониторинг окислительного стресса в присутствие ПАУ; уровни активных форм кислорода (перекись водорода, супероксиданион-радикал и OH-радикал), образующихся в высших растениях в стрессовых условиях.

### Совместные научные проекты

За последние десять лет были одобрены три наших совместных научных проекта:

- Проект № INT/ILTP/B-6.27 «Характеристика гетерогенности ФС-2 и ее изменений в условиях высокотемпературного и солевого стресса» (руководитель с российской стороны — С.И. Аллахвердиев, руководитель с индийской стороны — Анжана Джаджу успешно завершен).
- Проект № 11-04-92690-ИНД\_а «Исследование молекулярных механизмов, лежащих в основе повреждающих эффектов поллютантов окружающей среды, — полициклических



**АЛЛАХВЕРДИЕВ  
Сулейман Ифханоглы**  
Институт физиологии растений  
им. К.А. Тимирязева РАН,  
Институт фундаментальных  
проблем биологии РАН



**ДЖАДЖУ  
Анжана**  
Школа наук о жизни,  
Университет Дэви Ахилия



ароматических углеводородов (ПАУ) на фотосинтез» (руководитель с российской стороны — С.И. Аллахвердиев, руководитель с индийской стороны — Анжана Джаджу; 2011-2012) успешно завершен.

3. Проект №14-04-92690-ИНД\_а «Молекулярные механизмы ингибирующего действия полициклических ароматических углеводородов на фотосистему 2» (руководитель с российской стороны — С.И. Аллахвердиев, руководитель с индийской стороны — Анжана Джаджу; 2014-2015).

### **Результаты, полученные в рамках совместных проектов**

В рамках совместных с индийскими коллегами проектов показано, что скорость роста клеток *Synechocystis sp.* PCC 6803 и *Chlamydomonas reinhardtii* штамм cw92 в присутствии исследованных ПАУ существенно подавляется. Степень подавления роста клеток в обоих случаях напрямую зависит от концентрации добавленного производного ПАУ и от длительности культивирования в его присутствии. В целом, (за исключением бензо(а)пирена) клетки *Synechocystis sp.* PCC 6803 оказались немного (7-10%) более устойчивы к токсическому действию исследованных ПАУ, чем клетки *Chlamydomonas reinhardtii*. Эффективность токсического действия исследованных ПАУ на рост клеток *Synechocystis sp.* PCC 6803 уменьшается в следующем порядке: антрацен > флуорантен > фенантрен > бензо(а)пирен > нафталин. По эффективности токсического дей-

ствия на рост клеток *Chlamydomonas reinhardtii* на первом месте также стоит антрацен, затем флуорантен и бензо(а)пирен, фенантрен, нафталин. Показано, что эффективность фитотоксического действия данных ПАУ определяется в основном их способностью проникать внутрь клетки, коэффициентом молярной экстинкции, вкладом в общий спектр облучающего света длины волны, которую поглощает данный ПАУ. Скорость фотосинтетического выделения кислорода клетками *Synechocystis sp.* PCC 6803 и *Chlamydomonas reinhardtii* в присутствии исследованных ПАУ также подавляется. Степень подавления зависит от концентрации ПАУ и длительности воздействия. В случае, когда клетки культивировались при освещении светом, содержащим длины волн, которые поглощают исследованные ПАУ, эффективность их подавляющего действия была значительно (в 2-7 раз) выше. Развитие окислительного стресса в клетке напрямую отражается не только на таких параметрах как скорость роста, подавление фотосинтетической активности, изменения соотношения фотосинтетических пигментов, но также и на изменениях активности антиоксидантной системы (АОС). АОС включает ферменты, инактивирующие супероксид анион-радикал (супероксиддисмутаза); ферменты, нейтрализующие неорганические и органические перекиси (каталаза, глутатион-зависимые пероксидазы и трансферазы); глутатионредуктазу, обеспечивающую восстановление глутатиона. Мы показали, что активность ферментов антиоксидантной системы (аскорбат пероксидазы, супероксиддисмутазы и глутатионредуктазы) существенно (от 25 до 75%) выше для всех групп ПАУ по сравнению с контролем. Наибольшие изменения активности были отмечены в случае бензо(а)пирена. Активность аскорбат пероксидазы в случае бензо(а)пирена увеличилась на 34%, а в случае антрацена — на 28%, тогда как активность супероксиддисмутазы и глутатионредуктазы относительно бензо(а)пирена увеличилась на 63%. Нами установлено, что в клетках *Synechocystis sp.* PCC 6803 и *Chlamydomonas reinhardtii* в присутствии ПАУ (антрацен, бензо(а)пирен, флуорантен, фенантрен, нафталин) на свету, содержащему УФ-А-



область спектра, существенно увеличивается количество эндогенного пероксида водорода по сравнению с контрольными клетками (которые инкубировались в тех же самых условиях, но в отсутствие ПАУ). Степень увеличения концентрации пероксида водорода зависела от типа и концентрации ПАУ, а также времени инкубации. Эти данные свидетельствуют о развитии более значительного по сравнению с контролем окислительного стресса в клетках в присутствии ПАУ при их облучении УФ-А-содержащим излучением.

Получены новые существенные данные о механизме действия ПАУ на фотосинтез. Мы показали, что одним из основных мест действия исследованных нами ПАУ и активных форм кислорода (АФК), образующихся в их присутствии, является ФС-2. Исследованы механизмы действия типичных ПАУ (в том числе нафталина, фенантрена и флуорантена), отличающиеся количеством ядер (2-4) на фотохимическую активность ФС-2, а также защитные и адаптивные механизмы, ответственные за взаимодействие ПАУ с фотосинтезом. Установлено, что кратковременное время (<2 ч) экспозиции листьев гороха в присутствии ПАУ не приводит ни к каким существенным изменениям в параметрах индукционных кривых замедленной флуоресценции (ЗФл). Однако после более длительного воздействия наблюдаются существенные изменения в параметрах ЗФл, особенно для флуорантена и фенантрена. В результате воздействия ПАУ амплитуды всех компонентов ЗФл значительно уменьшаются, а положения максимумов сдвигаются. Показано, что ингибирующий эффект усиливается как при увеличении времени экспозиции, так и в результате действия ПАУ одновременно с другими стрессовыми факторами. В контрольных листьях гороха наблюдается многофазный рост, так называемые ОJIP-переходы флуоресценции хлорофилла а (Chl a), который включает в себя следующие этапы: ОJ-фаза (максимум 2 мс), JI-фаза (максимум при 30-40 мс) и IP-фаза (максимум при 200-300 мс). Эти переходы изменяются после обработки листьев различными ПАУ. Интенсивность фазы ОJ изменяется незначительно, в то время как интенсивность фаз

JI и IP существенно уменьшается, и максимумы сдвигаются в сторону более длительных времен в результате воздействия ПАУ. В случае препаратов тилакоидных мембран (*рис. 1*) индукционные кривые ЗФл имеют быструю компоненту с переходным максимумом флуоресценции при 70 мс и представляют собой быстрый и чувствительный индикатор, позволяющий выявлять и исследовать эффекты ПАУ. Уже после 10 мин воздействия ПАУ обнаруживается значительное влияние на индукционные кривые ЗФл: быстрая компонента снижается в среднем примерно на 50% в присутствии средних концентраций ПАУ и почти до нуля при более высоких концентрациях. Установлено, что инкубация листьев в присутствии исследуемых ПАУ сопровождается увеличением содержания пероксида водорода с максимумом после 30 мин. Через 3 ч уровень пероксида водорода возвращается к своему первоначальному значению (*рис. 2*). С помощью электронной микроскопии установлено, что тилакоиды, обработанные ПАУ, набухают и их толщина возрастает по сравнению с контролем. Кроме того, ПАУ постепенно разрушают плазматическую мембрану и мембрану тонопласта. В то же время структура гран заметно не нарушается. Получены зависимости отношения величины переменной (Fv) к максимальной (Fm) флуоресценции хлорофилла ФС-2 Fv/Fm от концентрации исследованных ПАУ и времени экспозиции. Уменьшение интенсивности флуоресценции было наибольшим в фазах JI и IP. Интенсивность во время фазы ОJ,



связанная с накоплением первичного акцептора электрона, пластохинона  $Q_A$ , в восстановленном состоянии изменялась в меньшей степени. Снижение интенсивности фазы IP, обнаруженное в наших экспериментах, может быть связано с блокированием передачи электронов от  $Q_A$  к вторичному акцептору электрона, пластохинону  $Q_B$ , возможно, за счет роста доли  $Q_B$ -невосстанавливющих центров. Предполагается, что в таких центрах  $Q_A$  окисляется только за счет обратной реакции с донорной стороной ФС-2. Об этом свидетельствует меньшая амплитуда в точке Р индукционных кривых и замедление переноса электрона. Это видно по положению на шкале времени точки Р, которая смешена от 250 мс (контроль) до 400 мс в образцах, обработанных ПАУ (фенантреном, флуорантеном).

Мы показали, что с увеличением концентрации ПАУ происходит снижение величины трансмембранных протонного градиента ( $\Delta\text{pH}$ ). Эти данные согласуются с увеличением количества  $Q_B$ -невосстанавливющих реакционных центров ФС-2, с данными анализа эффектов флуорантена на гетерогенность ФС-2 и со снижением быстрого компонента (максимум  $I_2$ ) кривых замедленной флуоресценции хлорофилла, выявленным в нашем исследовании. Значительное уменьшение величины относительной амплитуды медленной компоненты замедленной флуоресценции хлорофилла ФС-2, отражаемой отношением  $((I_4 - D)/D)$ , выявленное в наших экспериментах означает снижение способности запасать поглощенную

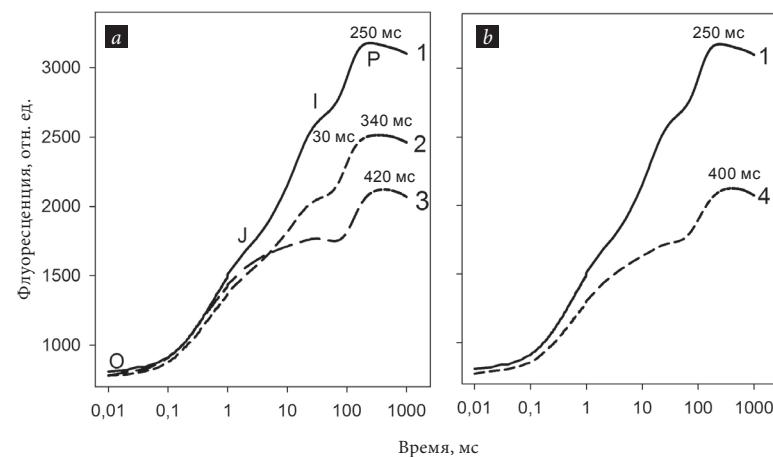


Рис. 1. Действие нафталина (а) и фенантрена (б) на ОJIP-переходы флуоресценции хлорофилла листьев, инкубированных в водных пробах в течение 24 ч в присутствии 30 мг Л<sup>1</sup> (2) и 100 мг Л<sup>1</sup> (3) нафталина при освещении светом 15 мкмоль квантов м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> и 50 мг Л<sup>1</sup> фенантрена (4) при освещении светом 120 мкмоль квантов м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. Контрольные листья (1) инкубировали в отсутствие нафталина и фенантрена в течение 24 ч.

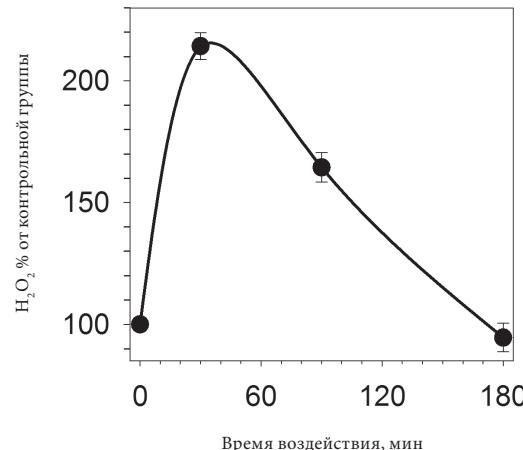


Рис. 2. Изменение содержания пероксида водорода в присутствии исследуемых ПАУ при инкубации листьев.

энергию света, в виде  $\Delta\text{pH}$  через тилакоидную мембрану и одновременно связано с уменьшением интенсивности фотосинтетического переноса электронов. Для формирования  $\Delta\text{pH}$ , необходимого для нефотохимического тушения (NPQ), требуется функциональная целостность мембран тилакоидов. Снижение величины  $\Delta\text{pH}$ , возможно, связано с нарушением целостности тилакоидных мембран и развитием окислительного стресса. Мы предполагаем, что повышенная утечка протонов через мембранны может быть причиной, препятствующей восстановлению  $Q_B$  и последующему снижению величины  $\Delta\text{pH}$ . По данным наших совместных исследований максимальный рост содержания пероксида водорода наблюдается через полчаса применения исследованных ПАУ и возвращается



к первоначальному уровню через 3 ч. Согласно нашим результатам основными стрессовыми факторами, повышающими ингибирующее действие ПАУ, могут быть сильный свет и химические агенты, вызывающие повреждение мембраны и, следовательно, более высокий уровень АФК. Свет высокой интенсивности может также усилить образование фотомодифицированных продуктов ПАУ, которые могут повреждать водоокисляющий комплекс ФС-2.

В рамках совместных проектов мы также исследовали эффекты нескольких типичных представителей ПАУ на фотохимическую активность ФС-2 в отделенных листьях трехнедельного возраста растений гороха. Показано, что степень подавления активности ФС-2 исследованными ПАУ зависит от их концентрации и времени воздействия. Эта зависимость более значительна в присутствии химических стрессоров или при высоких интенсивностях освещенности. Повреждение ФС-2 зависит от растворимости в воде данного представителя ПАУ, концентрации и времени воздействия.

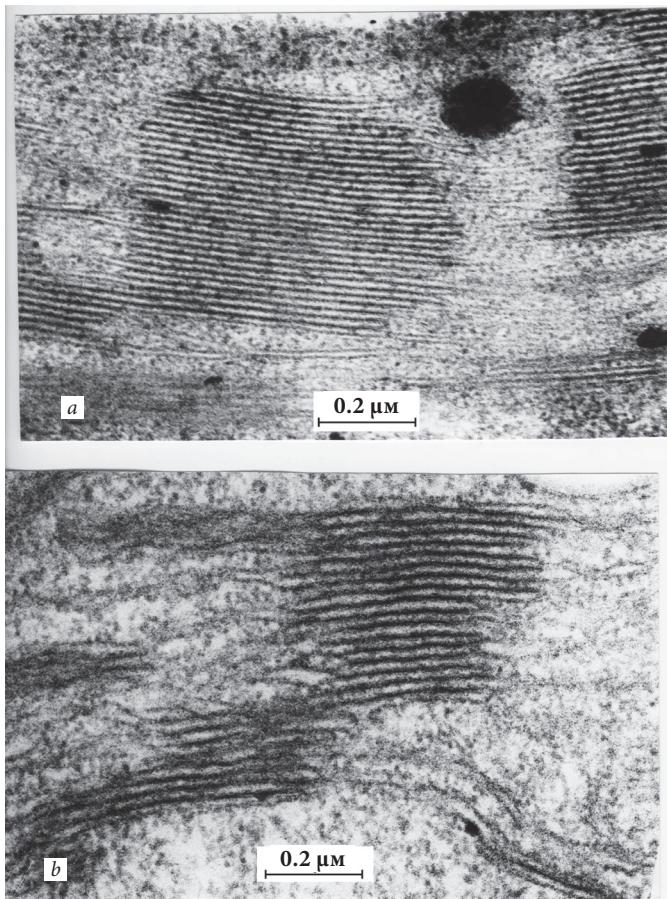


Рис. 3. Нарушения тилакоидных и плазматических мембран клеток под действием фенантрена и флуорантена.

В процессе долговременной инкубации соединения с низкой растворимостью в воде фенантрен и флуорантен проявили самый сильный эффект, так как эти ПАУ постепенно накапливаются в тилакоидах, особенно когда раствор перенасыщен и содержит твердую фазу нерастворенного ПАУ. Снижение активности ФС-2 в присутствии этих агентов сопровождается транзиторной генерацией пероксида водорода, а также нарушениями тилакоидных и плазматических мембран клеток, которые обнаруживаются на изображениях, полученных с помощью электронного микроскопа (рис. 3). Наружение мембран тилакоидов из-за накопления ПАУ, а также развитие окислительного стресса, очевидно, являются основными механизмами ингибирующего действия ПАУ на фотохимическую активность ФС-2.

### Участие в конференциях

Полученные в совместных исследованиях учеными России и Индии результаты неоднократно докладывались на значимых международных научных мероприятиях.

- 1) Международная конференция «Фотосинтез и устойчивое развитие», посвященная юбилею академика Владимира Анатольевича Шувалова, Июнь 1-8, 2014, Пущино, Россия (International conference «Photosynthesis Research for Sustainability» in honor of Vladimir Shuvalov, June 1-8, 2014 Pushchino, Russia);
- 2) 18-я Международная Пущинская школа-конференция молодых ученых, апрель 21-25, 2014, Пущино (18th International



Pushchino School-Conference  
of Young Scientists, April 21-25,  
2014, Pushchino);

- 3) Международная научная конференция и школа молодых ученых «Физиология растений — теоретическая основа инновационных агро- и фитобиотехнологий», Россия, Калининград, 2014 (International scientific conference and school of young scientists “Plant physiology — the theoretical basis of innovative agricultural and photobiotechnology”, Russia, Kaliningrad, 2014);
  - 4) Международная конференция «Исследования фотосинтеза для устойчивого развития — 2013», посвященная юбилею академика АН Азербайджана Джалаля Алирза оглы Алиеву, Баку, Азербайджан, 2013 (International Meeting «Photosynthesis research for Sustainability» in honor of Prof. Jalal Aliyev, Baku, Azerbaijan, 2013);
  - 5) Международная научная конференция «Фотосинтез в постгеномную эру: структура и функция фотосистем», посвященная юбилею профессора Джима Барбера, Пущино 20-26 августа, 2006 (International meeting “Photosynthesis in the post-genomic era: structure and function of photosynthesis” in honor of Professor James (Jim) Barber, Pushchino, 20-26 August, 2006).

## Приезд коллег из Индии в Россию в нашу лабораторию

Помимо общения на международных конференциях благодаря финансовой поддержке, оказываемой РФФИ и ДНТ, стало возможным прямое общение между учеными России и Индии — приезд коллег из Индии в Россию в нашу лабораторию. Это позволило осу-

ществить не только проведение плодотворных научных изысканий, но и обмен практическим опытом, навыками проведения определенных манипуляций в процессе выполнения экспериментов. Это существенно обогатило практический опыт обеих сторон. В сентябре-октябре 2007 г. в нашем институте (г. Пущино) работали индийские ученые профессор Судхакар Бхарти (Sudhakar Bharti) и доктор Анжана Джаджу (Anjana Jajoo), а также в октябре 2008 г. работали аспиранты — Пооджа Мехта (Pooja Mehta) и Сонал Матур (Sonal Mathur). Кроме того, с 19 по 28 августа 2006 г. в рамках этой же совместной работы был проведен совместный российско-индийский семинар «Фотосинтез и стресс». В семинаре приняли участие около 30 ученых, многие из которых выступили с докладами. В том числе были представлены устные доклады доктора Джаджу, видных ученых, профессоров Прасанна Моханти (Prasanna Mohanty) и Баишнад Трипати (Baishnab C. Tripathy). Кроме того, ученые из Индии получили приятную возможность напрямую ознакомиться с многонациональной культурой России, посетить в свободное от научной работы время центры культуры в Москве.

## **Преимущества сотрудничества**

Сотрудничество с нашими индийскими коллегами заключается в интенсивном полезном и взаимовыгодном обмене информацией, позволяющем более плодотворно проводить анализ экспериментальных данных, их осмысление, выработку возможных объяснений и корректировку планов, уточняющих экспериментов. Кроме того, наши индийские коллеги имеют в распоряжении оборудование, которое позволяет получать экспериментальные данные, существенным образом дополняющие и/или уточняющие данные, получаемые нами. В качестве примера можно привести анализатор эффективности растений (Plant Efficiency Analyzer (PEA, Hansatech, King's Lynn, Northfolk, Англия). Математическая обработка полученных результатов проводилась с помощью специальной компьютерной программы Biolyzer HP 3, разработанной в лаборатории Биоэнергетики Университета г. Женевы, Швейцария; импульсный амплитудно-модулированный флуориметр (Dual PAM-100, Walz, Effeltrich,



## 10-ЛЕТИЕ СОТРУДНИЧЕСТВА РФФИ И ДНТ В ПОДДЕРЖКЕ РОССИЙСКО-ИНДИЙСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Слева направо: профессор Аллахвердиев Сулейман (Россия); доктор (миссис) Рама Свами Бансал (Советник по научным и промышленным исследованиям ДНТ); доктор Анжана Джаджу (Индия).



Слева направо: Анжана Джаджу; Джим Барбер (Англия); Аллахвердиев Сулейман.

Германия), оборудованный дополнительной приставкой для измерения фотоиндуцированных изменений поглощения, связанных с фотоокислением первичного донора электрона фотосистемы 1, хлорофилла P700; современный прибор для исследования газообмена в процессе фотосинтеза (IRGA-LI-6400, LI-COR, Lincoln, NE, США).

Пшеница является одной из экономически значимых и основных зерновых культур в большинстве стран мира. Урожайность, пищевая ценность, а также безопасность употребления в пищу или на корм животным зерновых во многих регионах, особенно в районах, расположенных близко к индустриальным центрам, существенно ухудшается под влиянием многих стрессовых факторов окружающей среды, среди которых значительную роль играют полициклические ароматические углеводороды. При этом в развивающихся странах ущерб от ПАУ, наносимый экономике сельского хозяйства и экологии намного более выражен

вследствие того, что еще недостаточно развиты системы очистки производственных выбросов. Исследования механизмов действия ПАУ именно на экономически значимые растительные культуры и последующий поиск возможных путей уменьшения или полного исключения наносимого ПАУ вреда растениям представляется чрезвычайно актуальным. Наше международное сотрудничество заключалось еще и в том, что получаемые нами в стенах лаборатории знания при исследовании традиционных лабораторных растений (таких как горох, шпинат) подтверждались, расширялись, уточнялись нашими индийскими коллегами уже в реальных полевых условиях, на статистических массивах зерновых культур. Кроме того, для выполнения предполагаемого проекта также требуется высокий уровень навыков в физиологических экспериментах по исследованию поглощения поллютантов растениями, трансформации их в различных органах растений, а также в области физиологии фотосинтеза, особенно экономически значимых зерновых культур. В этом отношении руководитель индийской стороны, профессор Анжана Джаджу и члены возглавляемой ею группы имеют большой экспериментальный опыт и важные достижения. Научно-исследовательская группа профессора Анжана Джаджу является одним из лидеров не только в области физиологии фотосинтеза, но также в таких областях, как стресс-физиология и агробиология, имеет высокий уровень навыков в физиологических экспериментах по исследованию поглощения поллютантов растениями и трансформации их в раз-



личных органах растений. Объединение усилий нашей и индийской, сильных, взаимодополняющих научно-исследовательских групп, обеспечивает плодотворность совместных исследований. Несомненно, что именно благодаря существующему международному сотрудничеству между учеными

России и Индии стало возможным получений значимых результатов в рамках выполняемого проекта. Наглядным показателем успешности нашего сотрудничества в рамках совместных проектов между Россией и Индией служат научные публикации в ведущих международных журналах с достаточно высоким импакт-фактором. Считаем целесообразным продолжение финансирования этих исследований.

## Список основных публикаций

Список основных совместных публикаций, отражающих результаты взаимовыгодного сотрудничества ученых России и Индии:

1. Agrawal D., Allakhverdiev S.I., Jajoo A. (2016) Cyclic Electron Flow Plays an Important Role in Protection of Spinach Leaves Under High Temperature Stress. — *Russian Journal of Plant Physiology*, 63 (2): 210-215.
2. Franz-Josef Schmitt, V.D. Kreslavski, G. Shirshikova, C. Keuer, S.K. Zharmukhamedov, A. Jajoo, S.I. Allakhverdiev, T. Friedrich. Fluorescence imaging of light induced reactive oxygen species (ROS) in plant cell tissue. Abstracts book of International Conference "Photosynthesis Research for Sustainability-2014: In honor of Vladimir A. Shuvalov" (Eds. S.I. Allakhverdiev, I.A. Naydov. Pushchino, Russia), 2014, p. 100-101.
3. Singh-Tomar R., Mathur S., Allakhverdiev S.I., Jajoo A. (2012) Changes in PS II heterogeneity in response to osmotic and ionic stress in wheat leaves (*Triticum aestivum*). — *J Bioenerg Biomembr* v. 44, p. 411-419.
4. Mohanty P., Kreslavski V.D., Klimov V.V., Los D.A., Mimuro M., Carpentier R., Allakhverdiev S.I. (2012) Heat Stress: Susceptibility, Recovery and Regulation. In: *Photosynthesis: Plastid Biology, Energy Conversion and Carbon Assimilation* (Eds: Eaton-Rye J.J., Tripathy B.C., Sharkey T.D.), Springer Dordrecht Heidelberg, London, New York, pp. 251-274.
5. Allakhverdiev S.I., Kreslavski V.D., Fomina I.R., Los D.A., Klimov V.V., Mimuro M., Mohanty P., Carpentier R. (2012) Inactivation and Repair of Photosynthetic Machinery under Heat Stress. In: *Photosynthesis: Overviews on Recent Progress and Future Perspective*, (Eds: Itoh S., Mohanty P., Guruprasad K.N.) I. K. International Publishing House Pvt. Ltd. New Delhi, India, pp. 189-216.
6. Mehta P., Kreslavsky V.D., Bharti S., Allakhverdiev S.I., Jajoo A. (2011) Analysis of salt stress induced changes in Photosystem II heterogeneity by prompt fluorescence and delayed fluorescence in wheat (*Triticum aestivum*) leaves. — *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.* 104: 308-313.
7. Tongra T., Mehta P., Mathur S., Agrawal D., Bharti S., Los D.A., Allakhverdiev S.I., Jajoo A. (2011) Computational analysis of fluorescence induction curves in intact spinach leaves treated at different pH. — *Biosystems* 103(2): 158-63.
8. Mathur S., Allakhverdiev S.I., Jajoo A. (2011) Analysis of high temperature stress on the dynamics of antenna size reducing side heterogeneity of Photosystem II in Wheat leaves (*Triticum aestivum*). — *Biochimica et Biophysica Acta (BBA-Bioenergetics)* 1807: 22-29.
9. Mehta P., Allakhverdiev S.I., Jajoo A. (2010) "Characterization of photosystem II heterogeneity in response to high salt stress in wheat leaves (*Triticum aestivum*). — *Photosynth Res.* 105(3): 249-55.



10. Jajoo A., Mathur S., Mehta P., Yoshoika M., Allakhverdiev S.I., Yamamoto Y. (2010) "Study on the effects of chloride depletion on photosystem II using different chloride depletion methods "-*Journal of Bioenergetics and Biomembranes* v. 42, p. 47-53.
11. Allakhverdiev S.I., Thavasi V., Kreslavski V.D., Zharmukhamedov S.K., Klimov V.V., Ramakrishna S., Los D.A., Mimuro M., Nishihara H., Carpentier R. "Photosynthetic hydrogen production"-*Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* (2010), v. 11, p. 87-99.
12. Allakhverdiev S.I., Kreslavski V.D., Thavasi V., Zharmukhamedov S.K., Klimov V.V., Ramakrishna S., Nishihara H., Mimuro M., Carpentier R., Nagata T. (2010) "Photosynthetic energy conversion: hydrogen photoproduction by natural and biomimetic systems" in: A. Mukherjee (Ed.), *Biomimetics, Learning from Nature*, In-Tech (intechweb.org), Vukovar, Croatia, 2010, pp. 49-76.
13. Mehta P., Jajoo A., Mathur S., Allakhverdiev S.I., Bharti S. "High salt stress in coupled and uncoupled thylakoid membranes: a comparative study"-*Biochemistry (Moscow)* (2009), v.74(6), p. 761-767.
14. Allakhverdiev S.I., Kreslavski V.D., Thavasi V., Zharmukhamedov S.K., Klimov V.V., Nagata T., Nishihara H., Ramakrishna S. "Hydrogen photoproduction by use of photosynthetic organisms and biomimetic systems" -*Photochem. Photobiol.Sci.*, (2009), v.8, p.148-156.
15. Allakhverdiev S.I., Kreslavski V.D., Klimov V.V., Los D.A., Carpentier R., Mohanty P. "Heat stress: An overview of molecular responses in photosynthesis"-(*REVIEW*) *Photosynth. Research* (2008), v.98, p.541-550.
16. Jajoo A., Sahay A., Singh P., Mathur S., Zharmukhamadev S.K., Klimov V.V., Allakhverdiev S.I., Bharti S. "Elucidating the site of action of oxalate in photosynthetic elec- tron transport chain in spinach thylakoid membranes"-*Photosynth. Research*, (2008), v. 97 (2), p. 177-184.
17. Thavasi V., Jose R., Ganga K., Allakhverdiev S.I., Ramakrishna S. "Non-Liquid based Electrolytes for Dye Molecules Sensitized Solar Cells"-*Journal of Qafqaz University* (2008), 23, p. 34-42.
18. Allakhverdiev S.I., Los D.A., Mohanty P., Nishiyama Y., Murata N. "Glycinebetaine alleviates the inhibitory effect of moderate heat stress on the repair of photosystem II during photoinhibition"-*Biochimica et Biophysica Acta (BBA-Bioenergetics)*, (2007), v.1767, p.1363-1371.
19. Mohanty P., Allakhverdiev S.I., and Murata N. "Application of low temperatures during photoinhibition allows characterization of individual steps in photodamage and the repair of photosystem II"-*Photosynthesis Research*, (2007), v. 94, p. 217-224.
20. Allakhverdiev S.I., Tsvetkova N., Mohanty P., Szalontai B., Moon B.Y., Debreczeny M. and Murata N. "The irreversible photoinhibition of photosystem II is caused by impaired processing of the precursor to D1 protein in *Synechocystis*" -*Biochimica et Biophysica Acta (BBA-Bioenergetics)* (2005), v. 1708(3), p. 342-351.
21. Allakhverdiev S.I., Mohanty P. and Murata N. "Dissection of photodamage at low temperature and repair in darkness suggests the existence of an intermediate form of photodamaged photosystem II" -*Biochemistry (USA)*, (2003), v. 42, p. 14277-14283.
22. Allakhverdiev S.I., Karacan M.S., Somer G., Karacan N., Khan E.M., Rane S.Y., Padhye S., Klimov V.V. and Renger G. "Reconstitution of the water oxidizing complex in manganese depleted photosystem II complexes by using synthetic binuclear manganese complexes" -*Biochemistry (USA)* (1994), v.33, p.12210-12214.



23. Allakhverdiev S.I., Karacan M.S., Somer G., Karacan N., Khan E.M., Rane S.Y., Padhye S., Klimov V.V. and Renger G. "Binuclear manganese (III) complexes as electron donors in D1/D2/Cytb559 preparations isolated from spinach photosystem II membrane fragments" Z. Naturforsch. (1994), v.49C, P.587-592.
24. Padhye S., Yerande R., Kumbahar A., Hegde U., Klimov V.V., Ananyev G.M., Allakhverdiev S.I. and Zharmukhamedov S.K. "Functional models of water oxidation complex in photosystem II"-In: Indo-US Global Climatic Changes. Photosynthesis and Plant Productivity, New-Delhi,(1991), pp.132
25. Yerande R., Hegde U., Padhye S., Klimov V.V., Ananyev G.M., Allakhverdiev S.I. and Zharmukhamedov S.K. "Artificial photosynthesis: Monomeric quinone complexes of iron (+2) and manganese (+2), (+3) and (+4) in photoreactivation of pea subchloroplast particles" -In: Proc. of Workshop on Recent Advances in Bioenergetic Processes. JNU, New-Delhi (1990), p.12-15
26. Klimov V.V., Ananyev G.M., Allakhverdiev S.I., Zharmukhamedov S.K., Mulay M., Hegde U., Padhye S., Dismukes G.C. and Sheats J.S. "Reconstitution of Mn containing complex of photosynthetic oxygen evolution" In: Soviet-Indian Symposium on Regulation of Photosynthesis, Pushchino, (1990), pp.12
27. Klimov V.V., Ananyev G.M., Allakhverdiev S.I., Zharmukhamedov S.K., Mulay M., Hegde U. and Padhye S. "Photoreactivation and photoinactivation of photosystem II after a complete removal of manganese from pea subchloroplast particles" -In: Current Research on Photosynthesis (ed. Baltscheffsky M.) Kluwer Acad. Publishers (1990), v.1, pp.247-254.

## Summary

For more than 20 years, a group of scientists of the Institute of Basic Biological Problems, Russian Academy of Sciences (IBBP RAS) (formerly the Institute of Soil Science and Photosynthesis) successfully collaborate with scientists from India (more than 26 joint scientific publications), belonging to several research and education centers in the field of the photosynthetic apparatus (PA) responses to abiotic stress (including herbicides and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)). The group of our Indian colleagues includes outstanding scientists: Anjana Jajoo, Prasanna Mohanty, Sudhakar Bharti and several junior researchers, undergraduate and graduate students: Pooja Mehta, Sonal Mathur, Rupal Singh-Tomar, Teena Tongra; Divya Agrawal,

School of Life Science, Devi Ahilya University, Indore 452017, MP, India. The area of scientific interest of the Russian-Indian research team includes a wide range of issues related to the study of the molecular mechanisms of photosynthesis particularly under the influence of PAHs and their decomposition products at all levels of PA including photosystem 2 and photosystem 1; transduction pathways of regulation stress signal under the influence of pollutants and ways of transforming them into low-toxic compounds; the possibility of rapid screening of PAHs in suspensions of microalgae and cyanobacteria; monitoring the presence of oxidative stress in PAH; levels of reactive oxygen species formed in plants under stress conditions.



## Большое видится на расстояньи: цикл российско-индийских проектов в области компьютерного зрения

Л.М. Местецкий, А.И. Майсурадзе, Н.Ф. Дышкант

В ноябре 2008 года доктор Б.Х. Шекар (Мангалорский университет, Индия) и профессор Л.М. Местецкий (МГУ имени М. В. Ломоносова, Россия) оперативно собрали команды и согласовали заявку, на которую в апреле 2009 года было получено положительное решение от РФФИ и Департамента науки и технологий (ДНТ) Правительства Индии. Так началась работа по первому совместному проекту, посвященному компьютерному зрению.

Кроме решения непосредственных научных задач проекта с индийскими коллегами, были согласованы дополнительные задачи:

- обмен идеями, знакомство с разработками друг друга;
- обмен опытом по организации совместных научных исследований в университетах;
- публикация совместных работ в высокорейтинговых англоязычных международных журналах.

В ходе выполнения первого проекта возникла перспектива сотрудничества в более широком контексте — с привлечением других российских и индийских коллег, работающих в области компьютерного зрения. Уже после его успешного завершения эти идеи нашли свое воплощение в организации российско-индийского научного семинара. Такой семинар — «Перспективные прикладные задачи компьютерного зрения» — также получил поддержку РФФИ и был проведен в 2011 году в МГУ. На него приехали индийские и российские ученые из различных научных центров. Главным достижением семинара стало согласование направлений дальнейшего сотрудничества, а также издание сборника трудов,

представляющего работы авторов из обеих стран.

В ходе семинара была совместно обсуждена и согласована тема нового проекта, заявка на который была подана на конкурс РФФИ-ДНТ в программу 2012-2013 годов. Второй проект также получил поддержку и был успешно выполнен.

В 2014-2015 годах общение с индийскими коллегами не прекращалось, формировались новые темы для сотрудничества. На их основе была подана заявка на конкурс РФФИ-ДНТ в программу 2016-2017 годов. Заявку поддержали, началась работа над третьим совместным проектом.

### Начало: особенности первого проекта

Надо быть готовым к случаю — именно эта формула позволила российско-индийскому проекту успешно стартовать.

Сотрудничество с коллегами из Индии началось с электронного письма, которое 19 ноября 2008 года доктор Б.Х. Шекар пришел Ю.М. Баяковскому — заведующему лабораторией компьютерной графики и мультимедиа факультета вычислительной математики и кибернетики (ВМК) МГУ. В этом письме содержалось



**МЕСТЕЦКИЙ  
Леонид Моисеевич**  
профессор,  
МГУ им. М.В. Ломоносова



**МАЙСУРАДЗЕ  
Арчил Ивериевич**  
МГУ им. М.В. Ломоносова



**ДЫШКАНТ  
Наталья Федоровна**  
МГУ им. М.В. Ломоносова



предложение подумать над совместным проектом по программе ДНТ и РФФИ «Indo-Russian Joint Research — 2009». В России специалисты по машинной графике и компьютерному зрению довольно хорошо знакомы с темами исследований своих коллег. Этому способствуют, в том числе, российские и международные конференции соответствующей тематики, проведение которых (или участие в них) поддерживают РФФИ. К сожалению, российским специалистам иногда сложно распространять информацию о собственных исследованиях на международном уровне. И их потенциальным партнерам из-за рубежа не всегда удается в удобной для себя форме узнавать, над чем и в каких вузах работают российские исследовательские группы.

Но в данном случае российская команда оказалась готова к сотрудничеству. В ее состав вошли студенты и аспиранты ВМК МГУ под руководством профессора Л.М. Местецкого. Вместе с доктором Шекаром были согласованы тема проекта и состав исполнителей с каждой стороны. Положительную роль сыграло то, что тематика работ двух научных групп оказалась весьма близкой. Общими усилиями работа над заявкой была выполнена за две недели, со 2 по 15 декабря 2008 года.

При подготовке заявки внимание уделялось не только научным составляющим проекта, но и организационным аспектам. Несмотря на отсутствие опыта совместной работы, обнаружились хорошие возможности для успешного сотрудничества международного молодежного коллектива, по-

лучившего поддержку со стороны университетов в России и Индии.

С российской стороны научный коллектив был составлен из преподавателей и аспирантов факультета ВМК МГУ. В Индии в соответствии с формальными требованиями ДНТ в проекте участвовали представители нескольких университетов.

Тема первого проекта № 09-07-92652-ИНД\_а «Пространственное моделирование человеческих лиц для анализа и классификации в реальном времени» (2009-2010) интересовала обе стороны. В российской команде основным исполнителем по этой проблематике была аспирантка факультета ВМК МГУ Н.Ф. Дышкант. Усилия рабочей группы были направлены на разработку метрики сравнения поверхностей лиц и эффективных алгоритмов для такого сравнения. Проект был направлен на создание математических моделей и методов для работы с пространственными портретами человеческих лиц, полученными с помощью современных трехмерных сканеров. Трехмерные сканеры российских разработчиков и производителей успешно конкурируют на рынке с лучшими мировыми образцами. Индийская команда имела к тому времени результаты в области сравнения лиц по видеопоследовательностям, полученным с помощью видеокамер.

Задачи анализа и классификации получаемых изображений возникают во многих приложениях, связанных с биометрической идентификацией, медицинской диагностикой, планированием и оценкой результатов операций в косметологии, ортодонтии, а также с распознаванием эмоций по выражению лица человека.

В ходе проекта были получены следующие результаты:

- разработан метод сравнения и подгонки непрерывных моделей человеческих лиц, полученных с помощью трехмерных сканеров;
  - разработан метод выделения статических и динамических элементов формы для трехмерных изображений на основе сравнения и подгонки их поверхностей;
  - разработан подход к оценке точности алгоритмов реконструкции пространственной модели лица по серии плоских изображений;



## 10-ЛЕТИЕ СОТРУДНИЧЕСТВА РФФИ И ДНТ В ПОДДЕРЖКЕ РОССИЙСКО-ИНДИЙСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Tuesday, Nov 1st

10:30 – 11:00 Registration [room 685]  
11:00 – 11:15 Welcome Talk [room 685]  
11:15 – 12:45 Session 1 (Session Chairs: G Hemantha Kumar, Archil Maysuradze) [room 685]  
11:15 – 11:45 *Pose and Gesture Recognition Using Stereo Images and Video Sequences*  
Leonid Mestetskiy, Alexey Kurakin, Archil Tsiskaridze  
11:45 – 12:45 *Image Mining through Generic Symbolic Histo objects*  
Pradeep Kumar R., P. Nagabhushan  
12:45 – 13:10 Coffee Break  
13:10 – 14:10 Session 2 (Session Chairs: Leonid Mestetskiy, B H Shekar) [room 685]  
13:10 – 13:40 *Development of Applied Computer Vision Systems Using Projective Morphologies and Evidence-Based Image Analysis*  
Yury Vizilter  
13:40 – 14:10 *Monogenic Scale Space Based Region Covariance Matrix Descriptor for Face Recognition*  
M Sharmila Kumari, B H Shekar, G Thippeswamy  
14:10 – 15:00 Lunch break  
15:00 – 15:30 Session 2 (continuation) [room 685]  
15:00 – 15:30 *Surface Comparison and Matching in Applied Problems of 3d Face Analysis*  
Natalia Dyshkant  
15:30 – 16:30 Discussion Room [room 685]

### Wednesday, Nov 2nd

10:30 – 12:00 Session 3 (Session Chairs: P. Nagabhushan, Ivan Reyer) [room 637]  
10:30 – 11:00 *Methods of Morphological Image Analysis*  
Yury Pyt'ev, Alexey Chulichkov  
11:00 – 11:30 *Symbolic Similarity and Symbolic Feature Selection for Text Classification*  
B S Hanish, D S Guru, S Manjunath, Bapu B Kiranagi  
11:30 – 12:00 *On the Identification of the Raster Binary Image Areas to Optimize Printing Process*  
Archil Maysuradze  
12:00 – 12:30 Coffee Break  
12:30 – 14:00 Session 4 (Session Chairs: Alexey Chulichkov, M Sharmila Kumari) [room 580]  
12:30 – 13:00 *Role of Fusion Strategies on Combining Multispectral Palmprint Biometric*  
G Hemantha Kumar, Mohammad Imran  
13:00 – 13:30 *Score-Level Biometric Fusion: Modelling of Correlations Effect*  
Oleg Ushmaev, Vasily Belousov  
13:30 – 14:00 *Orientation Map based Palmprint Recognition*  
B H Shekar, N Harivinod  
14:00 – 15:00 Lunch break  
15:00 – 16:00 Discussion Room [room 660]

### Thursday, Nov 3rd

10:30 – 12:00 Session 5 (Session Chairs: D S Guru, Dmitry Vetrov) [room 685]  
10:30 – 11:00 *Segmenting Images With a Shape Prior Based on Object Skeleton*  
Dmitry Vetrov, Boris Yangel  
11:00 – 11:30 *Video Shot Boundary Detection By Combining Evidence From Early and Late Fusion Techniques*  
C. Krishna Mohan, N. Dhananjaya, B. Yegnanarayana  
11:30 – 12:00 *Face Profile Segmentation with Use of Parametric Shape Descriptor*  
Ivan Reyer, Ksenia Zhukova  
12:00 – 12:30 Coffee Break  
12:30 – 14:00 Session 6 (Session Chairs: Yury Vizilter, C. Krishna Mohan) [room 685]  
12:30 – 13:30 *Spatial Data Structures for Image Databases*  
D S Guru, S Manjunath, P Punitha  
13:30 – 14:00 *Incremental Knowledge Updating through Histo-Regression Learning*  
P. Nagabhushan, Syed Zakir Ali, Pradeep Kumar R.  
14:00 – 15:00 Lunch break  
15:00 – 16:00 Discussion Room [room 685]  
16:00 – 16:20 Closing Session [room 685]

*Bilateral Russian-Indian Scientific Workshop on Emerging Applications of Computer Vision (EACV-2011),  
MSU, Moscow, Russia*

Рис. 1. Фрагмент программы российско-индийского научного семинара «Перспективные прикладные задачи компьютерного зрения».

- предложены метрики для сравнения моделей человеческих лиц, подразумевающие адаптацию к конкретным приложениям с помощью введения весовой функции на поверхности. Особо следует отметить, что была разработана метрика для случая, когда сравниваемые модели имеют разный уровень детализации (например, получены сканерами разной точности);
- исследованы методы генерации признаковых описаний на основе предложенной модели поверхности человеческого лица.

За два года в рамках проекта проведены четыре совместных научно-исследовательских семинара с зарубежными партнерами. По результатам проекта подготовлены и опубликованы в зарубежных высокорейтинговых журналах две совместные статьи [1,2], а также собственные публикации у каждой из сторон.

В период проведения первого проекта сложился уклад совместной работы обеих групп. Необходимым этапом оказалось проведение регулярных научно-исследовательских семинаров, в ходе которых готовились совместные публикации.

### Расширение тематики: научный семинар

Осенью 2010 года, к моменту окончания первого проекта, совместная работа российской и индийской групп была признана достаточно продуктивной, интерес научного сообщества к ней вырос. Появилась идея расширения круга участников и привлечения других российских и индийских коллег, работающих в области компьютерного зрения. Эта идея нашла свое воплощение в организации и проведении российско-индийского научного семинара «Перспективные прикладные задачи компьютерного зрения» (рис. 1). Проведение семинара стало возможным благодаря проекту РФФИ № 11-07-92751-ИНД\_г. На него приехали индийские ученые из нескольких университетов, российские ученые из различных научных центров. Круг докладчиков и участников семинара заметно пре-



высил список участников проекта. Активное участие приняли молодые исследователи из России.

Российскими участниками семинара было представлено 10 докладов. Практически каждый доклад знакомил слушателей одновременно с новым направлением исследований и с новой прикладной областью.

Главным достижением семинара стало расширение контактов и выявление задач, из которых могли развиться направления дальнейшего сотрудничества с индийскими коллегами. Соответственно, в конце 2011 года была составлена и подана заявка на второй совместный проект.

По итогам семинара был издан сборник статей [3], в котором представлены авторы из обеих стран. Сборник оказался важным средством информирования о направлениях работ российской и индийской

команд, при этом распространение сборника естественным образом происходило не только в России и Индии, но и в странах Европы и Северной Америки по каналам других совместных проектов.

Подготовка сборника стала возможной благодаря продуманной системе организационных мер. Еще на этапе подготовки к семинару были созданы и разосланы участникам семинара шаблоны для различных издательских систем. Специальная техническая система обеспечивала возможность автоматического объединения индивидуальных докладов в единую книгу. Оперативная работа научных и технических редакторов позволила подготовить и выпустить сборник в течение месяца после семинара.

Организацию российско-индийского семинара активно поддержали декан факультета ВМК МГУ, академик РАН Е.И. Моисеев и ректор Мангалорского университета доктор Т.С. Шивашанкара Мурти (*рис. 2*).

## Устойчивое сотрудничество: второй проект

В 2012 году в рамках совместной программы РФФИ и ДНТ был поддержан второй российско-индийский исследовательский проект

Prof. T. C. Shivashankara Murthy,  
Vice Chancellor

Mangalore University,  
Karnataka, India

# **WELCOME ADDRESS**

I am happy to know that the Department of Science and Technology and Russian Foundation for Basic Research together sponsored **Bilateral Russian-Indian Workshop on Emerging Applications of Computer Vision**, which is being organized jointly by scientists from Moscow State University of Russia and Mangalore University with the support of scientists from Mangalore University, University of Mysore and other Engineering Institutions of India at Moscow State University, Moscow, Russia. The deliberations in the workshop will be the frontier research issues in the theme area of Pattern Recognition and Image Processing. In this context it should be appreciated that the Program Committee is bringing out a Proceedings containing the concerned research papers from both Indian and Russian participants, which is expected to be a trend setting document for future research endeavors.

I heartily compliment and congratulate both the teams for this great effort and look forward to many more such path breaking events in future also.

100

T. C. SHIVASHANKARA MURTHY



## 10-ЛЕТИЕ СОТРУДНИЧЕСТВА РФФИ И ДНТ В ПОДДЕРЖКЕ РОССИЙСКО-ИНДИЙСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

№ 12-07-92695-ИНД\_а «Математические модели и морфологические алгоритмы для сравнения и классификации изображений в системах компьютерного зрения» (2012-2013). Стиль совместной работы уже вполне сформировался. Каждая сторона быстрее и лучше понимала профессиональные потребности друг друга.

Целью второго проекта стала разработка математических моделей, методов и эффективных алгоритмов для описания формы объектов в системах компьютерного зрения реального времени. Новизна задачи определялась использованием в качестве источников исходных данных не только фото- и видеокамер, но и трехмерных сканеров. Эти задачи актуальны для многих приложений, связанных с биометрической идентификацией, наблюдением, управлением.

В основе развивающегося в проекте подхода лежит понятие непрерывной морфологической модели, представленной в виде циркуляра — подвижного семейства кругов на плоскости или шаров в пространстве с центрами на заданном графе, называемом осевым графом. Понятие морфологической модели является концептуальной основой для формирования признаковых описаний объектов переменной формы, так называемых гибких объектов.

Координация работы с зарубежными партнерами, согласование задач и методов исследований осуществлялись в ходе подготовки и проведения совместных конференций и семинаров.

За два года выполнения проекта были разработаны:

- методы генерации признаковых описаний для изображений сложной формы (ладони и фигуры человека) на основе анализа топологической структуры и метрических инвариантов морфологических моделей, представленных циркулярами;
- методы определения морфологических спектров для изображений сложной формы (листьев растений) на основе непрерывных морфологических моделей;
- меры сходства и различия динамических изображений сложной формы (применительно к распознаванию жестов рук по видеопоследовательности) на основе подгонки и сравнения их непрерывных морфологических моделей;

- методы распознавания гибких объектов сложной формы в изображениях на основе построения непрерывных морфологических моделей, проведены эксперименты с распознаванием листьев и ветвей растений по их форме;
- морфологические модели и методы распознавания динамических жестов ладони человека по видеопоследовательностям, полученным с помощью видеокамер и сенсора глубины «Кинект».

Было подготовлено программное обеспечение, реализующее предлагаемые методы, и проведены вычислительные эксперименты для изображений листьев растений, ладони и фигуры человека. Уровень полученных результатов подтверждается уровнем журналов, в которые были приняты совместные публикации.

Хотя формально второй проект закончился в конце 2013 года, но, как и в случае первого проекта, сотрудничество продолжалось. Еще полтора года шла работа над совместными статьями [4,5]. Кроме того, была подготовлена заявка на новый проект, которая была подана в конце 2015 года.

### Третий проект: перспективы

В 2016 году в рамках совместной программы РФФИ и ДНТ был поддержан третий совместный российско-индийский исследовательский проект № 16-57-45054-ИНД\_а «Непрерывные морфологические модели для анализа и распознавания динамических дальностных изображений» (2016-2017).

Совместная программа РФФИ-ДНТ оказалась поводом и необходимым условием развития сотрудничества наших научных групп.



Опыт работы по совместным программам с учеными США и Европы показал, что финансирования, получаемого проектами в России, не хватает для привлечения серьезных сил со стороны партнеров на Западе. А для работы с Индией эти средства оказываются вполне значимыми для мотивации профессоров и студентов. Успешные научные контакты налаживаются в условиях достаточно скромного финансового обеспечения.

Совместная программа РФФИ–ДНТ оказала нам поддержку, когда вся работа лишь только начиналась. Важность такой поддержки следует оценивать с учетом того, что должно пройти несколько лет, прежде чем выйдут из печати реальные совместные работы. Для поддержания сотрудничества требуются повод и стимул. Именно эту жизненно важную роль на начальном этапе сыграла совместная программа РФФИ–ДНТ.

Особо следует отметить полученный российскими участниками полезный опыт в изучении стиля и формы организации научной работы в Индии. Традиции проведения массовых мероприятий в науке и образовании пришли в Индию из Великобритании. Круглый стол, панельная дискуссия, презентация и открытие конференций — эти и многие другие формы подразумевают определенный научный этикет и стандарты коммуникационного поведения участников. В России не все ученые знакомы с этими полезными формами сотрудничества.

В ходе выполнения совместных проектов российские участники защищили четыре кандидатские диссертации, а индийские — три диссертации PhD, в которые во-



Слева направо: А.И. Майсурадзе, Б.Х. Шекар, И.Г. Бакина, Н.Ф. Дышканов, М.Ш. Кумари, Р.К. Барати, Л.М. Местецкий.



Слева направо: Л.М. Местецкий, И.Г. Бакина, Н.Ф. Дышканов, П.Н. Нагабушана, А.И. Майсурадзе.



Открытие конференции. В центре: Л.М. Местецкий, П.Н. Нагабушана.

шли результаты исследований по российско-индийским программам.

Работа над российско-индийскими проектами активно поддерживалась руководством факультета ВМК МГУ: деканом академиком Е.И. Моисеевым, заместителем декана по научной работе



Слева направо: Ю.В. Визильтер, Л.М. Местецкий, И.Г. Бакина, Р.К. Барати, М.Ш. Кумари, Б.Х. Шекар, Н.Ф. Дышкант, А.И. Майсурадзе

С.А. Ложкиным и заместителем декана по международному сотрудничеству А.В. Разгулиным. Участники проекта из России и Индии благодарны им за внимание, оказанное совместным исследованиям.

Особую благодарность участники проекта выражают Российскому фонду фундаментальных исследований, организовавшему программу совместных грантов с Департаментом науки и технологий Правительства Индии. Успешное сотрудничество научных групп России и Индии стало возможным благодаря этой программе.

## Литература

1. В.Н. Shekar, M. Sharmila Kumari, Leonid M. Mestetskiy, Natalia F. Dyshkant "Face recognition using kernel entropy component analysis" // Neurocomputing, Vol.74, N6. — 2011. — Pp. 1053-1057.
2. Leonid M. Mestetskiy, Natalia F. Dyshkant, Dmitry Gordeev, M. Sharmila Kumari, B.H. Shekar Surface measures for accuracy evaluation in 3d face reconstruction // Pattern Recognition. — Elsevier, 2012. — Volume 45, Issue 10. — C. 3583-3589.
3. Перспективные прикладные задачи компьютерного зрения: Двусторонний российско-индийский научный семинар: Москва, Россия, 1-5 ноября 2011 года: Сборник статей / Составитель А.И. Майсурадзе. — М.: МАКС Пресс, 2011. — 224 с. (На англ. яз.) ISBN 978-5-317-03937-0.
4. Shekar B.H., Sharmila M. Kumari, Mestetskiy L.M., Dyshkant N.F. FLD-SIFT: Class Based Scale Invariant Feature Transform for Accurate Classification of Faces // Communications in Computer and Information Science, 1, Volume 142, Computer Networks and Information Technologies, Part 1, 2011, Pp. 15-21.
5. Shekar B.H., Bharathi R.K., Josef Kittler, Vizilter Yu V., Mestetskiy L.M. Grid Structured Morphological Pattern Spectrum for Off-line Signature Verification // The 8th IAPR International Conference on Biometrics (ICB2015), Phuket, Thailand, May 19-22, 2015.

## Summary

The series of the joint Russian-Indian research projects in computer vision is described. The main collaborators are the M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia, and the Man-

galore University, India. All the projects are supported by the joint program of the RFBR (Russia) and the DST (India). Some features of the collaboration at different stages are revealed.