



ISBN 978-5-7310-5690-8

ПЕТЕРБУРГСКАЯ АКАДЕМИЧЕСКАЯ НАУКА

Альманах

Выпуск 1

Март 2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ПЕТЕРБУРГСКАЯ АКАДЕМИЧЕСКАЯ НАУКА

Альманах

Выпуск 1
К 30-летию Российской академии наук

1991–2021

*Под общей редакцией
академика РАН В.А. Румянцева,
доктора биологических наук М.И. Орловой*

ИЗДАТЕЛЬСТВО
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ЭКОНОМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022

ББК 94.39

Петербургская академическая наука : альманах. Выпуск 1. К 30-летию Российской академии наук, 1991–2021 / под общей редакцией академика РАН В.А. Румянцева, д.б.н. М.И. Орловой. – СПб. : Изд-во СПбГЭУ, 2022. –313 с.

ISBN 978-5-7310-5690-8

В первом выпуске Альманаха представлен аналитический обзор развития науки в России с 1991 по 2021 год и приводятся результаты научной деятельности нескольких институтов РАН Санкт-Петербурга в этот же период времени. В последующих выпусках найдут отражение новейшие достижения научных коллективов Санкт-Петербурга, включая СПбНЦ РАН.

Альманах адресован широкому кругу научных работников.

The first issue of the Almanac presents an analytical review of the development of science in Russia during 1991–2021 and the results of scientific activities of some institutes of the Russian Academy of Sciences in St. Petersburg in the same period of time. Following issues will reflect the latest achievements of St. Petersburg scientific communities, including the St. Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

The Almanac is addressed to a wide range of scientists.

*Выпуск рекомендован к изданию решением Учёного совета СПбНЦ РАН,
Протокол №2 от 22.02.2022*

ББК 94.39

Редакционный совет: д.г.н., академик РАН В.А. Румянцев (председатель), д.г.-м.н., член-корр. РАН В.Д. Каминский, д.г.-м.н., член-корр. РАН А.Б. Кузнецов, д.г.-м.н., член-корр. РАН В.Г. Румынин, д.т.н., проф. А.А. Родионов

Редакционная коллегия: д.б.н. М.И. Орлова (главный редактор), д.б.н. В.Е. Цыганов (ответственный секретарь), к.т.н., проф. В.П. Говорухин, к.и.н. Е.А. Иванова, Н.Н. Ильина, к.т.н. К.М. Кляус, Л.Г. Николаева, О.Д. Пожарская

ISBN 978-5-7310-5690-8

© Санкт-Петербургский научный центр РАН, 2022

© Коллектив авторов, 2022

© Издательство СПбГЭУ, 2022

Содержание

Вступительное слово Председателя Редакционного совета	5
Вступительное слово Главного редактора.....	7
1. РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК: ТРИДЦАТИЛЕТНЯЯ ИСТОРИЯ ВОЗРОЖДЕНИЯ	11
Основные этапы становления и реформирования Российской академии наук <i>В.А. Румянцев</i>	13
2. ДОСТИЖЕНИЯ НАУЧНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ РАН СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ В ПЕРИОД 1991-2021 ГОДОВ	23
2.1. ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК	25
Важнейшие достижения Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук за 1991–2021 гг. <i>С.В. Иванов, М.И. Патров</i>	25
Широкозонные III-N наногетероструктуры: от эпитаксии до систем освещения <i>А.В. Аладов, А.Л. Закгейм, В.В. Лундин, М.Н. Мизеров, А.В. Сахаров, В.М. Устинов, А.Ф. Цацульников, А.Е. Черняков</i>	85
Основные достижения СПбФ ИЗМИРАН с 1991 по 2021 год <i>А.Д. Перечёсова, Б.А. Копытенко</i>	92
2.2. ОТДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ.....	109
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук – история создания и развития <i>И.Г. Малыгин, В.И. Прицкер, О.А. Королев</i>	109
2.3. ОТДЕЛЕНИЕ ХИМИИ И НАУК О МАТЕРИАЛАХ.....	117
Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова: тридцать лет вместе с Российской академией наук <i>Т.В. Антропова, И.Б. Баньковская, Р.С. Бубнова, О.Ю. Голубева, В.В. Гусаров, А.Г. Иванова, М.В. Калинова, Т.А. Кочина, Л.П. Мезенцева, С.И. Свиридов, В.Л. Столярова, Г.А. Сычёва, О.А. Шилова, И.Ю. Кручинина</i>	117
2.4. ОТДЕЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК	155
Зоологический институт Российской академии наук в постсоветский период <i>С.Ю. Синёв, И.Г. Данилов, Н.С. Чернецов</i>	155

2.5. ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ	165
Санкт-Петербургское отделение ИГЭ РАН: научные результаты и прикладные исследования	
<i>В.Г. Румынин</i>	165
Многомасштабные процессы и явления в исследованиях Санкт-Петербургских океанологов	
<i>А.А. Родионов, А.В. Зимин, А.Ю. Дворников, М.А. Родионов, Д.А. Романенков, Т.И. Малова</i>	173
Основные инновационные исследования Института озераведения РАН за период существования РАН	
<i>В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев</i>	218
Научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук в решении проблем экологической безопасности	
<i>В.К. Донченко, А.А. Тронин</i>	240
2.6. ОТДЕЛЕНИЕ ИСТОРИКО-ФИЛОЛОГИЧЕСКИХ НАУК	259
Институт истории материальной культуры РАН на рубеже тысячелетий	
<i>О.И. Богуславский</i>	259
Санкт-Петербургский филиал Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук в 1991-2021 гг.	
<i>Н.А. Ащеулова, Е.Ф. Синельникова</i>	286
2.7. ОТДЕЛЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ НАУК	303
От сельскохозяйственной микробиологии к симбиогенетике	
<i>Н.А. Проворов, И.А. Тихонович</i>	303
Петербургская академическая наука. Альманах. 2022. Выпуск №1	
Сведения об авторах	309

Вступительное слово Председателя Редакционного совета



Глубокоуважаемые читатели!

Россия после перестройки прошла сложный путь сближения с западным миром и сегодня оказалась в «дружеских объятиях» стран, страждущих задушить её экономику, политическую систему, культурные ценности и мировоззрение, превратить страну в свой сырьевой придаток. За самообман надо расплачиваться. «Очарование» достижениями либеральной экономики, образом общественной жизни и необдуманное копирование их системы управления с предпринятой попыткой перенести её к нам, обернулось серьезным замедлением темпов роста экономики страны, привело к опасным социальным и демографическим последствиям, снижению уровня науки и образования. Время «очарования» западным миром прошло, настал период «тяжелого прозрения».

Чтобы выжить сегодня, Россия, являющаяся единственным в мире евроазиатским государством, должна сформировать свой особый путь развития, отвечающий её собственным интересам и учитывающий лучшее из опыта европейских и азиатских стран. В этот переломный для страны момент не обойтись без Российской академии наук (далее – РАН), которая должна стать идеологом и одновременно локомотивом в разработке стратегии развития России на длительную перспективу. Взяв на себя инициативу и ответственность, РАН имеет полное право поставить вопрос о переводе ее в статус самостоятельной государственной Академии

и возвращении ей, отнятых у нее институтов. Способна ли Академия, находящаяся в состоянии длительного оцепенения, на такой решительный шаг или в очередной раз подчинится воле чиновничьего аппарата и упустит эту возможность, покажет ближайшее время.

В выработке указанной выше стратегии велика будет роль институтов РАН. Задумав первый номер Альманаха, мы хотим понять, как институты перенесли реформы постсоветского периода и каково их сегодняшнее положение. По одному выпуску Альманаха делать обобщающий вывод рано, тем более что не все институты откликнулись на наше предложение и поняли его по-разному. Альманах предполагается сделать ежегодным изданием и я надеюсь, что он будет правильно отражать деятельность институтов РАН в Санкт-Петербурге и Ленинградской области и станет полезен для постановки и реализации междисциплинарных, в том числе крупномасштабных, исследований.

Председатель Редакционного совета
Советник директора
Санкт-Петербургского научного центра Российской академии наук
по научной работе
доктор географических наук, академик РАН



В.А. Румянцев

Вступительное слово Главного редактора



Глубокоуважаемый автор, глубокоуважаемый читатель!

Перед Вами первый выпуск нового ежегодного научного периодического издания «Петербургская академическая наука. Альманах», основанного Санкт-Петербургским научным центром РАН.

Назначение периодического издания в форме альманаха – быть региональным печатным органом, способствующим росту авторитета науки, возвращению ее значения в формировании общественного сознания и консолидации учреждений науки Санкт-Петербурга и Ленинградской области через публикацию материалов, освещающих и анализирующих деятельность научного сообщества региона и перспективы развития отдельных направлений науки, и, таким образом, доведение этой информации до различных целевых групп – от учредителя современных институтов РАН (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации) до тех, кто еще только интересуется наукой как возможным вариантом своего жизненного пути. Аудиторией альманаха также являются сотрудники академических учреждений, высших учебных заведений, других научных организаций, выполняющих фундаментальные и прикладные исследования в различных областях знания, а также представители органов власти, министерств и ведомств, реальных секторов экономики, оборонного сектора, истории и популяризаторы науки.

Альманах издается как в бумажной, так и в электронной форме. Доступ к нему на сайте СПбНЦ РАН – свободный и бесплатный, все представленные материалы проходят редактирование и корректуру, к публикации допускаются только материалы, отвечающие требованиям издания и тематике выпуска. Все выпуски регистрируются в РИНЦ.

Выпуски будут тематическими по направлениям науки, в том числе обзоры научных публикаций, информационные материалы о конференциях и симпозиумах, а также представительскими, публикуемыми, в том числе, годовые планы научных мероприятий учреждений науки, материалы, посвященные юбилейным датам, другие материалы, связанные с научным наследием России, актуальную информацию о Российской академии наук.

Первый выпуск альманаха посвящен обновленной Российской академии наук и охватывает тридцатилетний исторический период – с 1991 по 2021 гг., точкой отсчета которого стало воссоздание РАН, как преемницы АН СССР, произошедшее на фоне прекращения существования СССР. В выпуске опубликован аналитический обзор развития науки за истекший постсоветский период и обзоры научной деятельности нескольких институтов РАН Санкт-Петербурга в эти же годы. Планируются последующие выпуски посвятить новейшим достижениям и традициям академических коллективов Санкт-Петербурга, отдельный выпуск будет о СПбНЦ РАН.

Параллельно с выпуском данного периодического издания СПбНЦ РАН начинает издавать Труды Санкт-Петербургского научного центра Российской академии наук, в которых планируется публиковать результаты конкретных исследований по отдельным научным направлениям, действующих и завершённых масштабных проектов, материалы научных мероприятий, проведённых институтами и университетами Северо-западного региона на площадке СПбНЦ РАН. Выпуски Трудов СПбНЦ РАН будут тематическими и соответствовать различным сериям, например, «Будущее науки в Санкт-Петербурге», «Экология и природные ресурсы», «Справочники и словари», «Классическое наследие Российской академии наук». В качестве отдельных выпусков предполагается издавать монографии.

Создание информационно-издательской платформы Санкт-Петербургского научного центра РАН имеет и частный аспект – решение в едином информационном пространстве основной задачи СПбНЦ РАН – содействие в развитии фундаментальных исследований в области естественных, технических, гуманитарных и общественных наук, в том числе исследований, направленных на решение социально-экономических проблем региона.

Приглашаю всех представителей научного сообщества к участию в нашей работе в качестве авторов.

Благодарю всех членов редакционного совета и редакционной коллегии за подготовку настоящего издания, а также желаю всем авторам, в том числе и будущим, новых творческих успехов и научных достижений!

Главный редактор

ИО директора

Санкт-Петербургского научного центра Российской академии наук

доктор биологических наук



М.И. Орлова

1. РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК: ТРИДЦАТИЛЕТНЯЯ ИСТОРИЯ ВОЗРОЖДЕНИЯ

Основные этапы становления и реформирования Российской академии наук

В.А. Румянцев

Тридцатилетие не является принятой обществом знаменательной датой, в честь которой подводятся итоги деятельности за истекший период. Для Российской академии наук с момента ее образования в 1991 году этот период вобрал в себя переход государства на новую социально-политическую систему, перестройку всей системы управления государством, а также пересмотр деятельности всех государственных структур, включая Академию наук¹. Эти кардинальные изменения затронули все слои общества и вполне ожидаемо, что в научных кругах они получили сильно различающиеся мнения и оценки. Наверное, 30 лет недостаточно большой отрезок времени, чтобы подводить итоги деятельности государства в очень сложной и плохо предсказуемой внутренней и внешней обстановке. Вместе с тем надо заметить, что на 16-ой сессии Комиссии по климатологии (г. Гейдельберг, ФРГ, 3-8 июля 2014 г.) Всемирная метеорологическая организация приняла 30-летний период усреднения климатических показателей в качестве базового и рекомендовала использовать полученные по нему данные для принятия чрезвычайно ответственного вывода по одному из сложнейших природных процессов – глобальному изменению климата. Поэтому представленная в Альманахе в обобщенном за 30 лет виде информация о работах институтов РАН, расположенных в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, не кажется бесполезной и преждевременной. Знакомство с представленными работами различных организаций поможет сформулировать перспективные направления возможных совместных междисциплинарных исследований и формы взаимодействия с заказчиками.

Образование Российской академии наук в 1991 году тесно переплетено с трагическим событием в истории нашего народа – распадом Советского Союза. Страна в это время находилась в крайне тяжелом экономическом положении и нуждалась в серьезных преобразованиях во всех сферах жизни. В обществе широко высказывались и обсуждались различные, нередко противоположные взгляды на ее развитие, но осуществился наихудший из возможных вариантов. Воспользовавшись бездарной внутренней политикой и безволием президента страны М.С. Горбачева, непомерно честолюбивые и недальновидные руководители трех союзных республик: России, Украины и Белоруссии подписали антиконституционный акт о прекращении

¹ «Российская академия наук является общероссийской самоуправляемой организацией, действующей на основании законодательства РСФСР и собственного устава» – Указ Президента РФ «Об организации Российской академии наук» от 21.11. 1991 №228.

существования СССР, нанеся в историческом понимании «удар в спину» нашим выдающимся предшественникам, которые веками трудились на благо государства, приумножая его оборонную мощь и экономический уровень. Распад СССР разрушил налаженные межнациональные, культурные, экономические и производственные связи, а возникший на их месте «хаос» во взаимоотношениях отбросил экономики вновь образованных государств на несколько десятилетий назад.

Вопрос о необходимости иметь в РСФСР свою Академию наук возникал еще до распада Советского Союза. Впервые он прозвучал в августе 1989 года в опубликованной в Российской газете статье академика Н.Н. Моисеева и получил широкий резонанс в научных и общественных кругах страны. В итоге сформировались различные противоположные взгляды на построение Академии наук РСФСР и ее взаимодействие с АН СССР, включая полную ликвидацию последней и передачу имеющегося у нее оборудования академиям союзных республик или превращения АН СССР в некий координирующий орган деятельности союзных академий. Анализ многочисленных и напряженных обсуждений этого вопроса в президиуме АН СССР, Верховном совете и правительстве РСФСР, основные их участники и предлагаемые ими концепции по реформированию академической науки представлены в статье д.и.н. профессора Е.В. Бодровой². Завершающим этапом обсуждений стал Указ Президента РСФСР от 21 ноября 1991 года №228 «Об организации Российской академии наук», и первое общее собрание членов Академии с включенными в ее состав членами АН СССР, состоявшееся 17-18 декабря 1991 г., после которых РАН стала законным правопреемником АН СССР. Это позволило подведомственным АН СССР институтам после перевода в РАН сохранить за собой имеющуюся в их распоряжении материально-техническую базу и архивы полученных ранее результатов работ, что обеспечивало высокий общий уровень их исследований и перспективы дальнейшего развития.

Академическая наука существует на средства, выделяемые государством на ее деятельность. Имевший место после распада СССР резкий спад в экономике страны серьезно отразился на возможностях РАН и благосостоянии работающих в ней людей. Существенное сокращение у институтов средств на улучшение материально-технической базы и приобретение нового оборудования, невозможность для сотрудников прокормить семью из-за низкой заработной платы и постоянных задержек с ее выплатой привели к отъезду части сформировавшихся ученых и молодых специалистов на работу за рубеж или переходу в коммерческие структуры. Не последнюю негативную роль для Академии наук в этом процессе сыграли нередко звучавшие тогда в прессе высказывания типа «умные люди всегда умеют хорошо

² Бодрова Е.В. «Там, где распад стратегии, действует стратегия распада»: академическое сообщество России о результатах либеральных реформ (1990-е годы). – Новый исторический вестник. 2019, №3(6). С. 58-77.

зарабатывать», а также оценка уехавших за рубеж как высококлассных ученых и специалистов, а оставшихся в своей стране как людей посредственных и бесперспективных ученых.

Сложное положение академических институтов и часто искаженное прессой представление о результатах работ в общественном сознании, а также низкая зарплата привели к тому, что молодежь потеряла интерес к науке и, получив диплом о высшем образовании, забывала о своей специальности и стремилась устроиться на работу, исходя из предлагаемой им заработной платы. Последствие резкого снижения притока в институты молодых талантливых людей сегодня проявилось в недостаточном числе в институтах высококвалифицированных научных работников, подготовленных для занятия ими должностей руководителей научных направлений и организаций.

Вспоминая это время, следует высказать слова глубокого уважения организатору и первому президенту Российской академии наук академику Ю.С. Осипову, который в течение 22-х лет вместе с возглавляемым им президиумом в невероятно сложных условиях сумел сохранить Академию. Особую опасность представляли многочисленные посягательства на имеющиеся у Академии здания и земельные участки со стороны различных реформаторов и ярых сторонников частной собственности.

В связи с серьезным экономическим спадом правительство РФ неоднократно обращалось в РАН с просьбой более активного участия в решении проблем подъема страны. Вопрос повышения эффективности работы много раз поднимался и в стенах самой Академии, которой был свойственен излишний консерватизм, неторопливость и прохладное отношение к исполнению поручений, в том числе в решении правовых вопросов собственности Академии. В институты из президиума РАН нередко поступали запросы и распоряжения, срок исполнения которых уже истек. Недопустимо затягивалось оформление документов на право собственности Академии и подчиненных ей организаций. Вместе с тем выдвигаемые членами РАН и научными коллективами продуманные предложения по совершенствованию работы Академии, избавлению от многочисленных неэффективных и непрофильных организаций, несвойственных обязанностей, сохранившихся с советского времени, зачастую оседали в аппарате президиума и не получали серьезного обсуждения на общих собраниях членов РАН. Президиум РАН, памятуя о полном развале отраслевой науки и руководствуясь принципом выживания, проявлял большую осторожность к различного рода преобразованиям и не взял на себя ответственность за ее реформирование. Тем самым была упущена возможность представить руководству страны свою программу развития Академии, которая бы получила широкое обсуждение на Общем собрании РАН и поддержку большинства ее членов.

Неопределенность состояния Академии не могла продолжаться слишком долго, и осенью 2013 года были изданы Федеральный закон, Указ Президента РФ, распоряжение и постановление правительства РФ, которые кардинально изменили положение и деятельность Академии. Наиболее важными моментами в этих документах стали присоединение к РАН Российской академии медицинских наук и Российской академии сельскохозяйственных наук, а также образование Федерального агентства научных организаций (ФАНО) с включением РАН в перечень учреждений, подведомственных ФАНО. При этом было упразднено подчинение академических институтов Академии наук, которая лишилась возможности осуществлять прямое руководство их деятельностью. Это отразилось негативно и на самой Академии, которая не может полноценно выполнять записанные за ней в постановляющих документах проведение фундаментальных научных и поисковых исследований, экспертизу научно-технических программ и проектов и т.д., при отсутствии для осуществления их даже вспомогательного технического персонала. Таким образом, окончательно было разрушено сформированное десятилетиями единство Академии наук с академическими и ведомственными научными организациями, которое позволяло в советское время отечественной науке по многим направлениям иметь полное превосходство над научными достижениями зарубежных стран и сохранять паритет с наукой США, несмотря на существенно большее финансовое обеспечение последней.

Положительной стороной ФАНО было руководство административно-хозяйственной деятельностью институтов РАН. Наиболее важными были вопросы закрепления за институтами прав на имеющуюся у них недвижимость (зданий, помещений, земельных участков), а также на ремонт помещений и приобретение оборудования. Эти вопросы оставались нерешенными Академией в течение многих лет. К сожалению, в последующем ФАНО, нарушив существующие договоренности с РАН, решило не ограничиваться только административно-хозяйственными вопросами и стало активно распространять свое влияние на научную деятельность.

Существенную роль в перестройке деятельности институтов РАН сыграли выдвинутое ФАНО требование увеличения числа публикаций в рейтинговых изданиях, которые становились практически основным видом продукции учреждения, введение наукометрических показателей, значительный рост объема отчетности. Это оказало на работу институтов РАН как положительное, так и отрицательное действие.

В академических кругах вызвала сомнение целесообразность перехода по указанию ФАНО на использование для оценки деятельности институтов и научных сотрудников применяемого во многих западных странах наукометрического подхода. К этому времени ряд стран на основании собственного многолетнего опыта пришли к убеждению, что формальные наукометрические показатели, типа индекса Хирша, количества публикаций и цитируемости работ и т.п., мало отражают действительный

вклад в науку и степень полезности научных работников. Постепенно там стало формироваться мнение об отказе от их повсеместного применения и целесообразности иного подхода.

Не исключено, что в России наукометрический подход, как вспомогательное дополнительное средство, может быть полезен при отборе организаций для решения ряда задач стратегического характера, но вряд ли обосновано опираться только на него в традиционных областях фундаментальной академической науки. Очевидно, что наибольшие наукометрические показатели имеют специалисты, работающие в «модных» на сегодняшний день областях знаний, притом, что пик достижений в них, как правило, уже пройден. Специалисты, принимающие участие в работах, которые обеспечат новый прорыв в знаниях, не могут обладать большими значениями наукометрических показателей, так как направление и глубина их исследований до конца понятны лишь узкому кругу читателей. В целом это напоминает ситуацию катания на лыжах по целине – трасса становится интересной широкому кругу лыжников лишь тогда, когда она хорошо укатана.

В 2014 году ФАНО закрепило разработанное РАН с использованием наукометрических показателей разделение институтов на три группы:

1 – лидеры отрасли в РФ с результатами работ, соответствующих мировому уровню;

2 – стабильно обеспечивающие удовлетворительные результаты и обладающие потенциалом для развития;

3 – не показывающие значимых и уникальных результатов в своей отрасли и утратившие научные исследования как основную форму деятельности, с возможным решением об их реформации или ликвидации.

Естественно было ожидать, что кроме особого внимания, уделяемого организациям первой группы, ФАНО предусмотрит определенные шаги для поддержания находящихся в сложном положении институтов двух последующих групп. Однако этого не происходило, а наблюдалась даже обратная картина, в частности, организации этих групп практически лишены возможности участвовать в крупных грантах и в конкурсах на приобретение нового оборудования из-за имеющихся у них недостаточно высоких наукометрических показателей. Это не позволяет им повышать свой уровень научных исследований и обрекает на все большее отставание от организаций первой группы.

Вместе с тем, особенностью России является огромная площадь ее территории, большое разнообразие природных ресурсов и климатических условий, многонациональный уклад жизни, существенно различающийся уровень социально-экономического развития регионов и имеющегося у них кадрового потенциала и т.д. В таких условиях ставить вопрос о реализации во всех регионах научных достижений мирового уровня было бы полнейшей иллюзией. В России существует множество

специфических проблем, свойственных только ей и нехарактерных для других стран, решение которых открывает широкий фронт научно-исследовательских работ для академических организаций второй и третьей групп. Однако для этого нужны, прежде всего, комплексные региональные научные программы, инициаторами разработки которых могли бы быть президиум РАН, ФАНО России и администрации регионов. Но времена плановой экономики и накопленный опыт решения важных для страны крупных задач остались в далеком прошлом. В настоящее время действуют законы рыночной экономики, ориентирующие на получение максимальной прибыли, при которых все организации, в том числе и научные, обязаны сами искать пути для своего выживания.

В 2018 году ФАНО России было упразднено и его правопреемником стало образованное Правительством РФ Министерство науки и высшего образования РФ (Минобрнауки). В целях повышения интенсивности труда и улучшения благосостояния научных сотрудников институтов РАН Минобрнауки во исполнение Указа Президента РФ «О мероприятиях по реализации государственной социальной политики» от 07 мая 2012 №597 выдвинуло требование обеспечить для них заработную плату в два раза превышающую среднюю заработную плату в регионе расположения учреждения. В условиях ежегодного увеличения заданных плановых показателей и сокращения бюджетного финансирования это требование обернулось тем, что в большинстве случаев руководство институтов было вынуждено пойти на непопулярные меры перевода сотрудников на неполные ставки (0,1-0,5 ставки), при обещании сохранения за ними прежней денежной выплаты. Достигнутое таким способом формальное выполнение Указа Президента РФ породило у сотрудников ощущение неуверенности в завтрашнем дне и подозрение о скрытой форме сокращения численности работающих в академических учреждениях.

В 2020 году Минобрнауки ввело для академических институтов оценку значимости опубликованных научных работ. Институтам предписано статью, опубликованную в высокорейтинговом зарубежном издании (1 и 2 квартилях, а это в подавляющем большинстве платные зарубежные издания), оценивать 20-ю баллами, для публикации в ведущих отечественных журналах наивысшая оценка составляет всего 1 балл. В наиболее престижном отечественном научном издании Докладах Академии Наук (ДАН) – 2,5 балла. Таким образом, 8 статей в ДАН приравнены к публикации всего 1 статьи в высокорейтинговом зарубежном издании. Исходя из этого соотношения, рассчитывается и дополнительная сумма выплаты денежных вознаграждений научным сотрудникам за их публикации. Несмотря на понимание необходимости информирования западного научного мира об отечественных достижениях и расширения научной дипломатии, которая очень важна для России в силу вводимых против нее санкций и ограничений, при заданном соотношении значимости публикаций в отечественных и зарубежных журналах, остается

ощущение откровенной недооценки работ РАН и резко критического отношения к ней и ее изданиям.

Следует также отметить, что самим авторам или их организациям приходится полностью оплачивать зарубежную публикацию, а также нередко нанимать за дополнительную плату рекомендованного журналом сертифицированного переводчика или редактора. Таким образом, при существующей ориентации на печатание статей в иностранных журналах, осуществляется и скрытая финансовая поддержка последних, вместо того чтобы повышать уровень отечественных журналов. Многие из них находятся в плачевном финансовом положении, и, кроме того, необходимо открывать новые журналы, в которых могли бы печататься начинающие молодые ученые и специалисты, работающие в нехарактерных для западных стран, но важных для России направлениях.

Серьезный научный результат исследований нередко предопределяет создание инновационных технологий в самых различных областях человеческой деятельности: строительстве, медицине, сельском хозяйстве, транспорте и т.д. Последние уже являются продуктом политики и торговли и каждая страна заинтересована в своем приоритете на их авторство. Первоначальная публикация результатов исследований в зарубежном журнале, на данный момент времени зачастую малодоступном отечественным специалистам, превращает конкуренцию в разработке технологии в «гонку с гандикапом», в которой зарубежным разработчикам предоставляется определенная фора во времени. И это при том, что отечественным производителям технологий и без того создаются различные препоны при выходе на зарубежный рынок в виде требований ВТО, ВОЗ и других подобных международных организаций, что наглядно было видно в случае российских препаратов для вакцинации от коронавируса. Доходы собственных производителей препаратов и приоритет Европейского союза важнее звучащих с его трибун призывов к защите здоровья населения и утверждений о свободном рынке, в том числе и для достижений российских ученых.

С 2018 года Минобрнауки проводит политику, направленную на создание Федеральных исследовательских центров (ФИЦ), путем объединения главным образом небольших учреждений, находящихся часто под научно-методическим руководством различных отделений РАН. Такие ФИЦ образованы в ряде регионов страны, в том числе создан в Санкт-Петербурге на базе Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН) с включением в качестве обособленных структурных подразделений трех учреждений из Отделения сельскохозяйственных наук РАН и двух из Отделения наук о земле РАН. Цель организации ФИЦ заключается, прежде всего, в получении инновационных достижений за счет предоставления возможностей всем входящим в него организациям пользоваться имеющимся у других научно-техническим, в том числе

уникальным оборудованием, современными программными средствами и материалами исследований и т.п. К сожалению, в СПб ФИЦ РАН спустя два года этого не произошло, как и творческих и деловых взаимоотношений между коллективами обособленных структурных подразделений.

Подводя итог, можно отметить, что тридцатилетний период со дня образования РАН для институтов был крайне сложным. Институты РАН находились в постоянном недофинансировании, перестройках и нововведениях, нередко подвергались несправедливым нападкам со стороны прессы. Высказанную местами интерпретацию преобразований в деятельности институтов не следует воспринимать как какой-то упрек в адрес ФАНО и Минобрнауки или оценку целесообразности реализованных ими мероприятий. Она служит лишь напоминанием о том понимании преобразований, которые звучали в стенах институтов и были обусловлены необходимостью коллективов приспособляться к не всегда понятным, непредвиденным и в силу этого непростым условиям работы. Объективная и непредвзятая оценка результатов реформирования необходима для выбора дальнейшего пути развития фундаментальной науки и реализации ее достижений, но она должна быть итогом широкого обсуждения на Общем собрании членов РАН с рассмотрением на нем различных позиций и подходов к преобразованиям.

Проведение Общего собрания членов РАН с анализом произведенных преобразований и их результатов сегодня крайне важно еще и потому, что Россия в настоящее время оказалась в затяжной фазе непрерывно возникающих перед ней серьезных вызовов, имеющих разное происхождение и нередко судьбоносное для будущего страны значение. Часть из них связана с наметившимся пересмотром основ существующей мировой социально-экономической и геополитической системы, который сопровождается внутренними и межгосударственными конфликтами в различных частях земного шара с применением «мягкой», а нередко и военной силы, с попытками переписать историю и появлением реваншистских взглядов и т.п. Другая часть вызовов связана с проявлениями природных аномальных явлений, а также недалековидной человеческой деятельностью. В случае природных аномалий наиболее важным на данный момент времени является наблюдающееся глобальное потепление климата и обусловленные им повсеместные катастрофические наводнения, охватывающие огромные площади лесные пожары, мощнейшие ураганы и т.д. Недальновидная хозяйственная деятельность чаще всего приводит к нарушению установившегося в природе баланса химических веществ и по этой причине появлению серьезных экологических проблем при использовании сельскохозяйственных земель, водных объектов как источников рекреации и централизованного водоснабжения, росту заболеваемости населения и т.д.

Серьезную угрозу для Населения Земного шара в настоящее время представляет пандемия коронавируса, которая в ряде стран унесла жизни больше,

чем потери во время различных войн. Очевидно, что эта пандемия не является последней, и в будущем нас могут ожидать не менее грозные и масштабные заболевания.

Чтобы волны вызовов не захлестнули экономику и обороноспособность страны, и Россия продолжала оставаться одной из ведущих держав мирового сообщества, она должна своевременно находить приемлемые для себя адекватные решения. Промедление или принятие недостаточно проработанных должных мер чревато для социально-экономического развития страны и ее геополитического положения серьезными потерями. Последние могут повлечь за собой дальнейшее падение уровня жизни большинства населения, что грозит появлением взрывоопасного и трудноконтролируемого напряжения в многонациональном и социально неоднородном обществе России.

Подготовка всестороннего и взвешенного ответа на любой судьбоносный вызов времени по своей постановке и масштабам является сложнейшей фундаментальной задачей, требующей глубокого погружения в суть проблемы для понимания вызвавших ее истинных причин. Весь спектр необходимых в этих случаях научных направлений полностью охватывается профильными и региональными отделениями и институтами РАН, которые располагают огромными материалами исследований и высококлассными учеными и специалистами, способными обеспечить выполнение ответственных задач на требуемом для этого современном уровне.

В решении обозначенных судьбоносных проблем кроме РАН необходимо участие государственных и частных научных, проектных, конструкторских и образовательных организаций и осуществления ими программ совместных комплексных крупномасштабных исследований. Однако постановка задач и формирование таких программ встречает серьезные и труднопреодолимые сложности при существующей в настоящее время системе организации и управления наукой в России. Последняя не имеет обратной связи с низовыми коллективами, обросла большим числом малокомпетентных руководителей и сотрудников, не способных к быстрому принятию требуемых гибких решений, особенно межведомственных, и в целом не отвечает предъявляемым к ней современным требованиям. Поэтому для повышения интенсивности и эффективности работы научных организаций в стране недостаточно реформировать только институты РАН и ведомств, а необходима в первую очередь кардинальная перестройка всей системы управления. При этом желательно максимально учесть позитивный опыт работы научных организаций над решением крупных стратегических проблем с созданием опережающих передовых технологий во времена плановой экономики. Апологетам либеральной рыночной экономики, отвергающим все достижения советского периода, следует вспомнить высказывание премьер-министра Великобритании Маргарет Тэтчер о том, что

западные страны не опасались вооруженных сил Советского Союза, но очень боялись преимуществ плановой экономики.

В заключение подчеркнем, что люди науки в большинстве своем с пониманием относятся к внутренним и внешним экономическим, социальным и геополитическим проблемам нашей страны и проявляют выдержку и терпение в отношении сложностей их собственного положения. Именно эти качества и позволили институтам сохранить свои научные направления и добиться заметных научных достижений, в том числе мирового уровня.

Издание Альманаха, в котором представлен результат работы части институтов РАН, расположенных в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, за тридцатилетний период существования Российской академии наук, по существу является формой выражения уважения и благодарности их коллективам за преодоление всех возникающих на их пути непростых преград, добросовестное выполнение своей работы и обязанностей продвигать вперед фундаментальную науку. Альманах отражает также сохранившуюся в коллективах непоколебимую веру в Академию наук и надежду, что к 300-летию юбилею Российской академии наук она возродится как «птица Феникс» из пепла, вернет в свое подчинение институты РАН и статус самостоятельной государственной академии.

2. ДОСТИЖЕНИЯ НАУЧНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ РАН СЕВЕРО- ЗАПАДА РОССИИ В ПЕРИОД 1991-2021 ГОДОВ

2.1. ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Важнейшие достижения Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук за 1991–2021 гг.

С.В. Иванов, М.И. Патров

Институт ведет свою историю от Физико-технического отдела Государственного рентгенологического и радиологического института, созданного постановлением Комиссариата народного просвещения РСФСР от 23 сентября 1918 г. по инициативе профессоров А.Ф. Иоффе и М.И. Неменова. Институт включен в число учреждений, подведомственных Академии наук СССР, под наименованием «Ленинградский физико-технический институт» на основании постановления Президиума Академии наук СССР от 16 июня 1939 г. Постановлением Совета Министров СССР от 3 декабря 1960 г. №1237 Институту было присвоено имя его основателя – А.Ф. Иоффе. Институт был переименован в Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (статус государственного учреждения) в соответствии с постановлением Президиума Российской академии наук от 10 февраля 1998 г. №39, переименован в Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН в соответствии с постановлением Президиума Российской академии наук от 18 декабря 2007 г. №274. В соответствии с Постановлением Президиума Российской академии наук от 13 декабря 2011 г. переименован в Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. В соответствии с Федеральным законом от 27 сентября 2013 г. №253-ФЗ «О Российской академии наук, реорганизации государственных академий наук и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2013 г. № 2591-р Институт передан в ведение Федерального агентства научных организаций. В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 15 мая 2018 г. № 215 «О структуре федеральных органов исполнительной власти» и распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 июня 2018 г. № 1293-р Институт передан в ведение Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Исследования ученых Института охватывают практически все поле современной физики. Мировую известность принесли институту работы в области физики твердого тела, полупроводников, квантовой электроники, астрофизики, физики плазмы, физической газодинамики. Хорошо известны специалистам работы сотрудников института по физике межпланетного пространства и космологии,

управляемому термоядерному синтезу, движению тел в атмосферах Земли и других планет. На протяжении своей истории в ФТИ наиболее широкое развитие получили два перспективных направления — физика полупроводников и ядерная физика. Ученые Института внесли основополагающий вклад в реализацию советского атомного проекта. Еще в довоенные годы они инициировали в стране исследования в области ядерной физики; добились решения организационных проблем на государственном уровне, сформировали кадровую основу атомного проекта (И.В. Курчатов, А.П. Александров, Ю.Б. Харитон, Я.Б. Зельдович, И.К. Кикоин и др.). Был разработан ряд методик по разделению изотопов урана; инициирована постройка самого крупного в Европе циклотрона. Неоценим вклад ученых института в Победу в Великой Отечественной войне: были решены задачи размагничивания военных кораблей, создания импульсной радиолокации, обеспечения бесперебойного и продолжительного функционирования «Дороги жизни» по льду Ладожского озера, разработана противогангрена сыворотка. В послевоенные годы для проведения испытаний первой отечественной атомной бомбы в Институте были созданы высокоточные и высокочувствительные счетчики и источники нейтронов. Была разработана технология разделения изотопов лития для производства термоядерного оружия, решены задачи аэродинамики и тепловой защиты головных частей баллистических ракет для отечественной космонавтики. В ФТИ были созданы технологии силовой электроники и полупроводниковой оптоэлектроники, которые обеспечили технологическую независимость страны. Можно утверждать, что пионерские работы института по созданию полупроводниковой науки и техники явились важным вкладом в мировую науку и значительной степени определили мировой прогресс во второй половине XX столетия. За более чем столетнюю историю развития Института, более 20 лабораторий и филиалов Института, созданные в различных городах страны, стали впоследствии самостоятельными учреждениями, а некоторые превратились в обширное семейство физико-технических институтов в городах Харьков, Днепропетровск, Свердловск, Томск, Самарканд и других.

Более ста сотрудников института отмечены высшими отечественными научными наградами, в числе которых Ленинские и Государственные премии СССР, Государственные премии РФ, премии Правительства СССР и РФ, именные медали и премии Академии наук СССР и РАН.

Работы, выполненные в институте, дважды удостоивались Нобелевских премий.

В 1956 г. Нобелевская премия по химии была присуждена академику Н.Н. Семенову (совместно с С.Н. Хиншелвудом) «за открытие и исследование цепных химических реакций». Отмеченные премией работы были выполнены в ФТИ и опубликованы в 1927 году, когда Н.Н. Семенов был сотрудником института.

В 2000 г. Нобелевская премия по физике была присуждена директору Института академику Ж.И. Алфёрову (совместно с Г. Кремером и С. Килби) за работы по созданию и развитию полупроводниковых гетероструктур, «заложившие фундамент современной информационной техники».

Многие сотрудники ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН в период с 1991 по 2021 гг. были удостоены Государственными премиями РФ, премиями Правительства РФ, наградами и премиями РАН, Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН. В их числе:

1998 – *Голант В.Е., Лебедев С.В.*, Премия им. Л.А. Арцимовича РАН, за цикл работ «Исследование режимов улучшенного удержания плазмы в токамаке»;

1999 – *Никаноров С.П., Антонов П.И., Синани А.Б.*, Премия им. А.Ф. Иоффе РАН, за цикл работ «Исследование микропластичности в условиях кристаллизации способом А.В. Степанова и механического нагружения в широком диапазоне скоростей»;

2000 – *Алфёров Ж.И.*, Медаль А.С. Попова РАН, за цикл работ в области развития методов и средств радиоэлектроники, в том числе для обработки и передачи информации;

2000 – *Варшалович Д.А.*, Премия им. А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Проверка космологической переменности фундаментальных физических констант на основе анализа спектров наиболее далеких квазаров»;

2001 – *Алфёров Ж.И., Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Асрян Л.В., Сурис Р.А., Копьев П.С., Щукин В.А.*, Государственная премия РФ в области науки и техники, за исследования гетероструктур с квантовыми точками и создание лазеров на их основе;

2001 – *Варшалович Д.А.*, Премия им. В.А. Фока РАН, за монографию «Квантовая теория углового момента»;

2002 – *Грехов И.В.*, Государственная премия РФ в области науки и техники, за цикл фундаментальных исследований процессов нано- и субнаносекундного обрыва сверхплотных токов в полупроводниках и создание на их основе нового класса сверхмощных полупроводниковых приборов и электрофизических устройств;

2002 – *Шамрай А.В.*, Медаль конкурса лучших молодых ученых Российской академии наук;

- 2004 – *Захарченя Б.П.*, Премия им. А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Исследования по оптике экситонов, оптической ориентации спинов, электронов и ядер в полупроводниках и полупроводниковых структурах»;
- 2005 – *Каплянский А.А.*, Премия им. А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Исследования электронных и колебательных состояний в кристаллах методами оптической спектроскопии»;
- 2005 – *Иванчик А.В.*, Премия им. Л. Эйлера Правительство СПб и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Спектроскопия квазаров и космология»;
- 2005 – *Сурис Р.А.*, Премия им. А.Ф. Иоффе РАН, за цикл работ «Исследование полупроводниковых сверхрешеток на основе квантовых ям и квантовых точек»;
- 2005 – *Новиков И.И., Карачинский Л.Я.*, Медаль конкурса лучших молодых ученых РАН;
- 2006 – *Грехов И.В.*, Премия Правительства РФ в области науки и техники;
- 2006 – *Быков А.М.*, Медаль Оптического общества им. Д.С. Рождественского;
- 2007 – *Перель В.И.*, Премия им. А.Ф.Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Теоретическое исследование низкоразмерных поверхностных явлений в полупроводниках»;
- 2007 – *Голуб Л.Е.*, Премия им. Л.Эйлера Правительства Санкт-Петербурга и СПб НЦ РАН, за цикл работ Эффекты спин-орбитального взаимодействия в двумерных полупроводниковых системах;
- 2007 – *Андреев В.М.*, Премия им. А.С. Попова Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за разработку физических принципов и реализацию фотоэлектрических преобразователей концентрированного солнечного излучения;
- 2007 – *Гольцев А.В., Дьяконов К.В., Кулакова Л.А., Попов В.В., Яхкин Э.З.*, Премия Российской и Польской академий наук;
- 2008 – *Мазец Е.П., Аптекарь Р.Л., Голенецкий С.В.*, Премия им. А.А. Белопольского РАН, за цикл работ «Открытие источников мягких повторных гамма-всплесков»;

- 2008 – *Каплянский А.А., Новиков Б.В., Басун С.А.*, Премия им. А.Ф. Иоффе РАН, за цикл работ «Спектроскопические исследования фотоэлектрических явлений в кристаллах»;
- 2008 – *Аптекарь Р.Л.* и др., Премия Правительства РФ в области науки и техники, за создание комплекса научной аппаратуры с новыми информационными каналами регистрации корпускулярного и электромагнитного излучений Солнца, а также за приоритетные результаты наблюдений солнечной активности и ее воздействия на Землю со спутника КОРОНАС-Ф (2001–2005 годы);
- 2008 – *Сурис Р.А.*, Премия им. А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Теоретическое исследование низкоразмерных поверхностных явлений в полупроводниках»;
- 2008 – *Варшалович Д.А.*, Государственная премия РФ в области науки и технологий Президента РФ, за основополагающие открытия в области физики галактик, межгалактической среды и релятивистских объектов;
- 2009 – *Тарасенко С.А.*, Медаль с премией для молодых ученых РАН, за работу «Оптическая ориентация и спиновые фототоки в полупроводниковых наноструктурах»;
- 2009 – *Гусев В.К., Минаев В.Б., Сахаров Н.В., Голант В.Е.* и др., Премия Правительства РФ в области науки и техники, за проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по сооружению уникальной сферической термоядерной установки Глобус-М и создание в Российской Федерации научной и технологической базы для разработки токамаков с предельно высоким относительным давлением плазмы;
- 2010 – *Чугунов И.Н., Шевелев А.Е., Гин Д.Б.*, Премия им. Л.А. Арцимовича РАН, за цикл работ «Гамма-спектроскопическая диагностика высокотемпературной плазмы»;
- 2010 – *Грехов И.В.*, Премия им. А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за выдающиеся основополагающие работы по физике мощных полупроводниковых приборов и создание нового научно-технического направления, силовой полупроводниковой импульсной электроники;
- 2010 – *Тарасенко С.А.*, Премия им. Л. Эйлера Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Спиновые и фотогальванические эффекты в полупроводниковых наноструктурах»;

- 2010 – *Слипченко С.О.*, Медаль с премией для молодых ученых РАН, за работу «Исследование и разработка мощных высокоэффективных лазерных диодов на основе наногетероструктур с низкими оптическими потерями»;
- 2010 – *Жуков А.Е.*, Премия имени А.С. Попова Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за комплекс пионерных исследований в области полупроводниковых лазеров на основе квантовых точек для систем оптической связи;
- 2011 – *Александров Е.Б.*, Премия им. А.С. Попова Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за выдающиеся научные результаты в области радиоэлектроники, в том числе разработку уникальных квантовых магнитометров;
- 2011 – *Островская Г.В.*, Медаль Ю.Н. Денисюка Оптического общества им. Д.С. Рождественского, за создание методов голографической диагностики быстропротекающих процессов в плазме;
- 2011 – *Устинов В.В., Меркулов И.А., Кусраев Ю.Г.*, Премия им. А.Ф. Иоффе РАН, за цикл работ «Спиновые явления в полупроводниковых, металлических и магнитных наноструктурах»;
- 2011 – *Косолапова Н.В.*, Премия для поддержки талантливой молодёжи Министерства образования и науки РФ;
- 2012 – *Парфеньев Р.В.*, Премия им. А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за выдающиеся результаты исследования квантовых явлений в полупроводниках и низкоразмерных системах, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение;
- 2012 – *Комиссарова Т.А.*, Медаль с премией для молодых ученых РАН, за работу «Электрофизика нитрида индия – металл/полупроводникового композитного соединения»;
- 2012 – *Алфёров Ж.И.*, Медаль Е.Ф. Гросса Оптического общества им. Д.С. Рождественского, за изучение электронных, экситонных, примесных состояний в полупроводниковых структурах, способствовавших созданию полупроводниковых лазеров нового типа;
- 2012 – *Каплянский А.А.*, Медаль Е.Ф. Гросса Оптического общества им. Д.С. Рождественского, за экспериментальное обнаружение явления оптической анизотропии кубических кристаллов, наблюдавшейся в спектре поглощения кристалла закиси меди в области экситонного квадрупольного резонанса; создание нового эффективного пьезоспектроскопического метода; изучения

микроструктуры примесных центров и дефектов в кристаллах; развитие новых спектроскопических методик исследования динамических электронных и фононных процессов в примесных диэлектриках;

2012 – *Кусраев Ю.Г.*, Медаль Е.Ф. Гросса Оптического общества им. Д.С. Рождественского, за исследование спиновых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах, спиновой динамики электронов, экситонов и магнитных поляронов в разбавленных магнитных полупроводниках;

2012 – *Пермогоров С.А.*, Медаль Е.Ф. Гросса Оптического общества им. Д.С. Рождественского, за исследования процессов взаимодействия свободных и связанных экситонов в полупроводниках с оптическими и акустическими фононами, позволившие экспериментально наблюдать распределение свободных экситонов по кинетическим энергиям;

2012 – *Разбирин Б.С.*, Медаль Е.Ф. Гросса Оптического общества им. Д.С. Рождественского, за цикл оригинальных исследований экситонных и колебательных состояний в соединениях АПВVI, процессов оптической ориентации экситонов, их свойств при высокой плотности, а также за изучение электронных и колебательных спектров в фуллеренах;

2013 – *Архипенко В.И., Гусаков Е.З., Симончик Л.В.*, Премия РАН и НАН Беларуси, за выдающиеся научные результаты, полученные в ходе совместных исследований;

2013 – *Каплянский А.А., Феофилов С.П.*, Премия им. Д.С. Рождественского РАН, за цикл работ «Спектроскопические исследования структуры примесных центров и электронных процессов в диэлектриках, содержащих ионы редких земель и переходных металлов»;

2013 – *Копьев П.С.*, Премия им. А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за разработку метода молекулярно-пучковой эпитаксии и технологии создания на его основе низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур;

2013 – *Теплова Н.В.*, Медаль с премией для молодых ученых РАН, за цикл работ «Исследование микро-турбулентности плазмы токамака»;

2013 – *Глазов М.М.*, Медаль с премией для молодых ученых РАН, за цикл работ «Когерентная спиновая динамика электронов в наноструктурах»;

- 2013 – *Селькин А.В.*, Медаль Е.Ф. Гросса Оптического общества им. Д.С. Рождественского, за исследования экситонных состояний в приповерхностной области полупроводников;
- 2014 – *Калашикова А.М.*, Премия им. Л. Эйлера Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Новые методы эффективного сверхбыстрого управления магнитным состоянием вещества»;
- 2014 – *Давыдов В.Ю.*, Медаль Е.Ф. Гросса Оптического общества им. Д.С. Рождественского, за цикл исследований, позволивших установить новые значения фундаментальных физических характеристик полупроводниковых соединений нитридов металлов III-группы, и за создание новых оптических методик диагностики гетеро- и наноструктур, изготовленных на основе этих материалов;
- 2014 – *Калашикова А.М.*, Премия Президента РФ в области науки и инноваций для молодых ученых за вклад в развитие физики сверхбыстрых магнитных явлений и методов сверхбыстрого управления магнитным состоянием вещества;
- 2015 – *Ивченко Е.Л.*, Премия им. А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за создание теории оптических и фотогальванических эффектов в низкоразмерных системах;
- 2015 – *Баранов П.Г.*, Премия им. А.С. Попова Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Разработка нового поколения приборов радиоспектроскопии и наноразмерных квантовых сенсоров и излучателей»;
- 2015 – *Глазов М.М.*, Премия им. Л. Эйлера Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Спиновые и кинетические явления в наноструктурах и графене»;
- 2015 – *Кочерешко В.П.*, Медаль Е.Ф. Гросса Оптического общества им. Д.С. Рождественского, за исследования методами оптической спектроскопии многоэлектронных комплексов и магнитных свойств экситонов в полупроводниковых наноструктурах;
- 2015 – *Алексеев П.С.*, Медаль с премией для молодых ученых РАН, за цикл работ «Магнетотранспорт и спин-зависимый транспорт в наноструктурах с высокой подвижностью»;
- 2015 – *Глебова Н.В.*, Медаль с премией для молодых ученых РАН, за цикл работ «Разработка научно-технологических принципов энергоэффективных электрохимических систем преобразования энергии»;

- 2015 – *Кузнецова Я.В.*, Медаль с премией для молодых ученых РАН, за цикл работ «Разработка локальных электронно-зондовых методик исследования полупроводниковых наноструктур на основе Ш-N соединений»;
- 2016 – *Александров Е.Б.*, Золотая медаль РАН имени П.Н. Лебедева, за цикл работ «Квантовая и шумовая магнитоспектроскопия»;
- 2016 – *Курсаев Ю.Г.*, Премия им. А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за фундаментальные исследования спин-зависимых явлений в полупроводниковых и гибридных наноструктурах, спиновой динамики в разбавленных магнитных полупроводниках;
- 2017 – *Амусья М.Я., Чернышева Л.В.*, Премия им. А.Ф. Иоффе РАН, за цикл работ «Теория резонансных явлений в процессах взаимодействия фотонов, электронов и позитронов с атомами, фуллеренами и эндоэдралами»;
- 2018 – *Быков А.М.*, Премия им. А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦРАН, за создание нелинейной теории излучения космических объектов с экстремальным энерговыделением, внесшее весомый вклад в астрофизику высоких энергий;
- 2018 – *Вершовский А.К.*, Премия им. А.С. Попова Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Разработка радиооптических квантовых сенсоров»;
- 2018 – *Поддубный А.Н.*, Премия им. Л. Эйлера Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ «Резонансные оптические явления в наноструктурах и метаматериалах»;
- 2018 – *Забродский А.Г., Абрамов А.С., Андроников Д.А., Бобыль А.В., Теруков Е.И.*, Премия Правительства РФ в области науки и техники за разработку, промышленное освоение и коммерциализацию технологий создания высокоэффективных кремниевых фотоэлектрических модулей и технологий сооружения солнечных электростанций в регионах России;
- 2019 – *Глебова Н.В.*, Премия им. Л. Эйлера Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл работ по созданию новых материалов для электрохимических источников энергии с существенно увеличенной эффективностью;
- 2020 – *Лебедев А.А.*, Премия им. А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за исследования электрофизических свойств карбида кремния и разработку приборов на его основе;

- 2020 – *Иванов С.В.*, Премия им. Ж.И. Алферова Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦ РАН, за цикл приоритетных исследований физико-химических аспектов процесса молекулярно-пучковой эпитаксии полупроводниковых соединений A3B5 и A2B6, приведший к созданию эффективных квантоворазмерных наногетероструктур для элементной базы полупроводниковой оптоэлектроники и квантовой фотоники широкого спектрального диапазона;
- 2021 – *Каплянский А.А.*, Золотая медаль РАН имени П.Н. Лебедева, за цикл работ «Фотонно-кристаллические опало-подобные структуры: синтез и исследования оптических свойств»;
- 2021 – *Денисов К.С.*, Медаль с премией для молодых ученых РАН, за цикл работ «Спиновый и зарядовый транспорт в системах с магнитными скирмионами»;
- 2021 – *Попков В.И.*, Медаль с премией для молодых ученых РАН, за цикл работ «Особенности фазообразования в условиях ограниченности массопереноса: строение, термодинамические и функциональные свойства оксидных систем»;
- 2021 – *Александров Е.Б., Запасский В.А.*, Государственная премия РФ в области науки и техники, за создание и развитие нового научного направления – спектроскопии спиновых шумов.
- 2021 – *Грехов И.В.*, Почетный диплом «За выдающийся вклад в развитие электроэнергетики» ассоциация «Глобальная энергия»

Астрофизика и исследования фундаментальных процессов

А.М. Быков, А.В. Иванчик, А.В. Степанов, Д.Д. Фредерикс

Астрофизика и космология в настоящее время находятся в фазе взрывного роста, приводящего к качественному изменению представлений о фундаментальных физических процессах. Проблема «темной энергии», вызывающей ускоренное расширение Вселенной, наблюдаемое посредством детектирования сверхновых звезд, удаленных на космологические расстояния, и темной материи, необходимой для объяснения наблюдаемой структуры Вселенной, являются вызовами физики XXI века. Изучение физики сверхновых звезд с гигантским выделением энергии и уникальными возможностями эффективной конверсии выделенной энергии в излучение гамма-всплесков, ускорение ультрарелятивистских частиц и генерацию нейтрино различных энергий.

В астрофизических подразделениях ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведутся комплексные экспериментальные и теоретические исследования экстремальных астрофизических объектов с высоким выделением энергии: остатков сверхновых звезд, гамма-всплесков, активных галактических ядер. Исследования космических источников с экстремальными энергиями, электромагнитными и гравитационными полями, исследования физических процессов на Солнце, в звездах, квазарах, межзвездной и межгалактической среде в ранней и современной Вселенной необходимы как для понимания фундаментальных физических процессов, происходящих в космическом пространстве, так и чисто практических приложений. Работы в данной области направлены на определение фундаментальных свойств вещества и излучения в экстремальных условиях, недостижимых в земных лабораториях, и на проверку пределов применимости фундаментальных физических законов. Исследуются механизмы эффективной трансформации различных форм энергии в таких экстремальных космических объектах как остатки сверхновых звезд, источники гамма-всплесков, активные галактические ядра и т.п., а также влияние солнечной активности на климат Земли на различных временных масштабах. Работы, проводимые в этих направлениях в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, включают как разработку уникальной регистрирующей аппаратуры, в том числе, для экспериментов на орбитальных обсерваториях и зондах, так и создание современных многомасштабных теоретических моделей исследуемых объектов. Ниже перечислены некоторые результаты, полученные в последние годы по указанным направлениям работ.

Современные исследования космических источников с экстремальными энергиями, электромагнитными и гравитационными полями, в значительной мере связаны с физикой компактных объектов – нейтронных звезд, белых карликов и черных дыр. Это мощные источники электромагнитного излучения, наблюдаемые во всех диапазонах электромагнитного спектра. С началом гравитационной астрономии

самые катастрофические моменты эволюции этих объектов теперь наблюдаются и гравитационными обсерваториями. Сопоставление данных о гравитационном сигнале с одновременными наблюдениями гамма-всплесков, осуществляемыми, в частности, с помощью аппаратуры КОНУС, созданной в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, позволяет значительно продвинуться в понимании природы и эволюции компактных звезд и содержащих их звездных систем.

Наиболее достоверную информацию о физических процессах, происходящих в экстремальных условиях нейтронных звезд, и о фундаментальных свойствах вещества сверхъядерной плотности в их недрах можно получить путем сравнения количественной теории с многоволновыми наблюдениями. В последние годы в ФТИ им. А.Ф. Иоффе были развиты современные теории строения и эволюции сверхплотного вещества нейтронных звезд, позволяющие дать количественную интерпретацию многоканальным наблюдательным данным об этих объектах. Построены модели формирования наблюдаемых рентгеновских туманностей релятивистскими ветрами пульсаров. Были выполнены чувствительные наблюдения ряда пульсаров и их туманностей в рентгеновском, оптическом и радио диапазонах. В сочетании с развитыми моделями, эти наблюдения, проведенные на современных наземных и орбитальных обсерваториях, в ряде случаев позволили оценить такие параметры исследованных объектов, как расстояние, масса, возраст, температура поверхности и напряженность сверхсильного магнитного поля. Выяснена возможная роль пульсарных туманностей как источников избытка релятивистских позитронов, наблюдаемых космическими детекторами PAMELA и AMS-02.

Быстрые радиовсплески – мощные импульсы радиоизлучения длительностью несколько миллисекунд – были открыты в 2007 году. Ежедневно во Вселенной случается множество таких высокоэнергичных событий, однако их природа до сих пор оставалась невыясненной. Магнитары – редкие молодые нейтронные звезды с рекордными для Вселенной магнитными полями выше 10^{14} Гаусс, превышающими критическое поле поляризации вакуума квантовой электродинамики, производят мощные повторяющиеся вспышки рентгеновского излучения, открытые впервые в 1979 году астрофизиками ФТИ им. А.Ф. Иоффе с помощью аппаратуры КОНУС, установленной на борту спутников Венера 11 и 12. В апреле 2020 г. космическим гамма-спектрометром ФТИ им. А.Ф. Иоффе «KONUS-WIND» была зарегистрирована вспышка от магнитара SGR 1935+2154, с необычно жестким спектром [1, 2], сопровождавшаяся мощным радиовсплеском, измеренным радиотелескопами CHIME и STARE2 (рис. 1, 2). Одновременное детектирование и точное совпадение пиков на кривых блеска рентгеновского и радиоизлучения впервые позволило установить связь между галактическими магнитарами и быстрыми радиовсплесками. Детальный анализ необычных свойств этой вспышки позволил выдвинуть гипотезу о

генетической связи радиовсплесков с редкими аномально жесткими рентгеновскими вспышками магнитаров и подкрепить ее согласием оценок частоты таких событий.

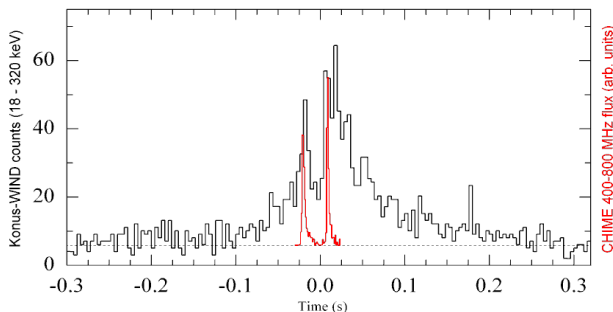


Рис. 1. Вспышка магнетара SGR 1935+2154 в рентгеновском диапазоне 18-320 кэВ (черная кривая, Конус-ВИНД) и в радиодиапазоне 0,4-0,8 ГГц (красная кривая, CHIME/FRB), 28.04.2020



Рис. 2. Регистрация всплеск магнетара в художественном представлении

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе активно проводятся теоретические и наблюдательные исследования межгалактической среды, в том числе, основанные на прецизионной спектроскопии квазаров, проводимой с помощью самых крупных наземных телескопов. Эти исследования позволили сделать выводы об эволюции структуры, физических условий (температура, плотность, ионизационное состояние) и химического состава вселенной в ранние эпохи ее существования. Наблюдения спектров удаленных квазаров важны для изучения возможных вариаций фундаментальных констант на космологических масштабах.

Проблема звездообразования лежит в основе понимания большинства наблюдаемых объектов во Вселенной. Сотрудниками ФТИ выполнены исследования процессов формирования нетепловых компонент в областях активного звездообразования – важнейших источников энергии и химического разнообразия галактик. Выявлены эффективные процессы ускорения ультрарелятивистских частиц и излучения нейтрино высоких энергий в компактных скоплениях молодых массивных звезд и коллапсировавших сверхновых в областях активного звездообразования. Построены оригинальные модели галактических певатронов. Исследована роль космических лучей в эволюции планетных атмосфер и их влияние на пригодность поверхностей экзопланет для известных форм жизни.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе активно ведутся исследования энергичных процессов на Солнце и их влияния на климат Земли. В частности, создано семейство чувствительных рентгеновских поляриметров, позволяющих изучать физические механизмы солнечных вспышек и построены количественные модели энергичных явлений, связанных со вспышечной активностью Солнца и генерацией потоков

ускоренных частиц – солнечных космических лучей, а также транспортом этих частиц в гелиосфере. Развита модель генерации различных видов космогенных изотопов в атмосфере Земли, позволяющие делать выводы о долговременных изменениях климата и их связи с солнечной активностью.

Литература

1. *Ridnaia A., Svinkin D., Frederiks D., Bykov A., Popov S., Aptekar R., Golenetskii S., Lysenko A., Tsvetkova A., Ulanov M., and Cline T.* A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst // *Nature Astronomy*. 2021. Vol. 5. P. 372-377.
2. *Аптекарь Р.Л., Быков А.М., Голенецкий С.В., Фредерикс Д.Д., Свинкин Д.С., Уланов М.В., Цветкова А.Е., Козлова А.В., Лысенко А.Л.* Космические гамма-всплески и мягкие гамма-репитеры – наблюдения и моделирование экстремальных астрофизических процессов // *Успехи физических наук*. 2019. Т. 189. С. 785-802.

Исследование физики и разработка технологий нагрева, эффективного удержания плазмы и генерации токов увлечения в сферическом токамаке нового поколения Глобус-М2

Е.З. Гусаков, В.К. Гусев, Н.В. Сахаров, В.Б. Минаев, В.И. Варфоломеев,
В.В. Дьяченко, Г.С. Курские

Термоядерный синтез считается одним из наиболее перспективных и безопасных способов получения энергии. Реакция синтеза легких ядер идет с выделением большого количества энергии, легко преобразуемой в тепловую. Для отработки основных принципов управления реактором и термоядерных технологий в настоящее время сооружается Международный Термоядерный Экспериментальный Реактор (ИТЭР) во Франции. Участники проекта являются Европейский союз, Россия, Япония, США, Индия, Китай и Корея. Лаборатория физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе активно участвует в проекте, создавая важную диагностику томсоновского рассеяния для дивертора ИТЭР. Одновременно в лаборатории ведутся исследования термоядерной плазмы на трех действующих токамаках с различными размерами и величиной удерживающего магнитного поля. На токамаке ГУМАН-3М исследуются режимы улучшенного удержания плазмы и неустойчивости, вызываемые быстрыми частицами, на токамаке ФТ-2 – волновые методы нагрева плазмы и генерации тока, а также физика турбулентного переноса. В начале XXI века в лаборатории начались исследования на новом классе термоядерных ловушек – сферических токамаках. Сферические токамаки, представляют собой предельный случай обычного токамака, сильно сжатого к оси симметрии. Они являются одним из наиболее вероятных кандидатов на роль компактного генератора термоядерных нейтронов, который можно использовать в гибридной энергетической

системе «синтез-деление». За исследования на первом российском сферическом токамаке Глобус-М группа ученых лаборатории была удостоена премии Правительства РФ в области науки и техники за 2009 год. В 2018 году был введен в эксплуатацию сферический токамак Глобус-М2 [1] (рис. 3). Глобус-М2 принадлежит к новому поколению сферических токамаков наряду с зарубежными проектами NSTX-U (США) и MAST-U (Великобритания), запуск которых только ожидается в ближайшие годы. Токмак удалось построить, осуществить его физический пуск и приступить к экспериментам благодаря совместным усилиям ученых и инженеров разных организаций. На сферическом токамаке Глобус-М2 ведутся исследования практически по всему спектру проблем и технологий термоядерного синтеза. Исследования плазмы на Глобус-М2 проводятся при температуре выше 10 миллионов градусов. Получена рекордная для компактных сферических токамаков плотность плазмы, выше 10^{20} частиц/м³. По сравнению с Глобус-М, температура плазмы увеличилась в 4 раза, а эффективность удержания – в 3 раза. Как результат десятикратное увеличение так называемого «тройного произведения» [2] (рис. 4) – основного критерия эффективности термоядерного реактора. При этом вывод установки на максимальные параметры еще предстоит осуществить в ближайшие годы. Исследования, проводимые на компактных сферических токамаках типа Глобус-М2, направлены на разработку технологий поддержания тока, нагрева, улучшения устойчивости и уменьшения воздействия плазмы на стенку. Такие технологии необходимы для безопасной, экономичной и долговременной эксплуатации термоядерного реактора будущего.

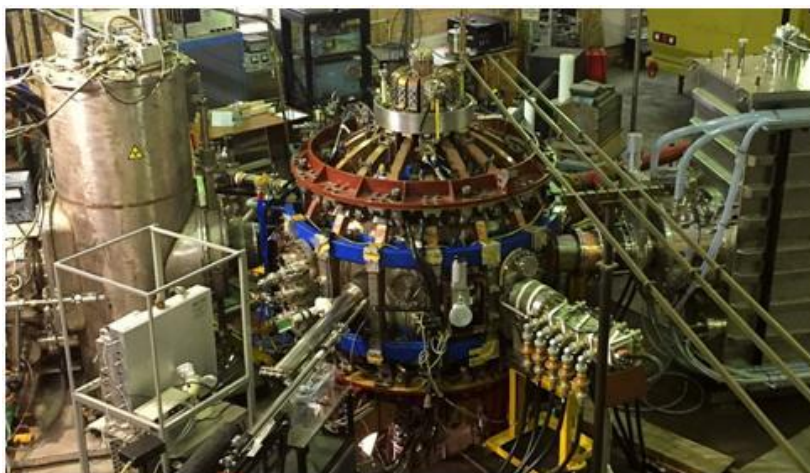


Рис. 3. Сферический токамак Глобус-М2 с подключенными системами нагрева и генерации тока в машинном зале ФТИ им. А.Ф. Иоффе

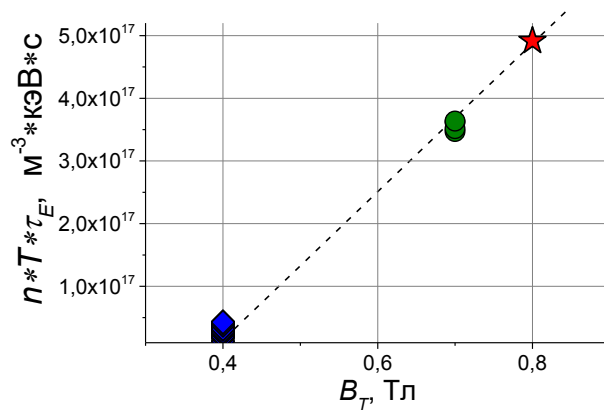


Рис. 4. Зависимость «тройного произведения» от магнитного поля в установках Глобус-М и Глобус-М2 при постоянном запасе устойчивости. Ромб, кружок и звездочка соответствуют значениям тока плазмы 0.2, 0.3 и 0.4 МА

Литература

1. V.B. Minaev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, V.I. Varfolomeev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, E.N. Bondarchuk, P.N. Brunkov, F.V. Chernyshev, V.I. Davydenko, V.V. Dyachenko, A.A. Kavin, S.A. Khitrov, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Kononov, V.A. Kornev, G.S. Kurskiev, A.N. Labusov, A.D. Melnik, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, V.A. Rozhansky, A.N. Saveliev, I.Yu. Senichenkov, P.B. Shchegolev, O.N. Shcherbinin, I.V. Shikhovtsev, A.D. Sladkomedova, V.V. Solokha, V.N. Tanchuk, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov and E.G. Zhilin Spherical tokamak Globus-M2: Design, integration, construction // 2017, Nucl. Fusion, v.57, 6 ArtNo: #066047.
2. G.S. Kurskiev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, I.M. Balachenkov, N.N. Bakharev, V.V. Bulanin, F.V. Chernyshev, A.A. Kavin, E.O. Kiselev, N.A. Khromov, V.B. Minaev, I.V. Miroshnikov, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, P.B. Shchegolev, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tukhmeneva, V.I. Varfolomeev, A.Yu. Yashin and N.S. Zhiltsov Tenfold increase in the fusion triple product caused by doubling of toroidal magnetic field in the spherical tokamak Globus-M2. // 2021, Nucl. Fusion, v.61, 6 ArtNo: #064001.

Создание уникальных кремниевых детекторов релятивистских частиц и разработка физики их радиационной деградации для международных экспериментов на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРНе

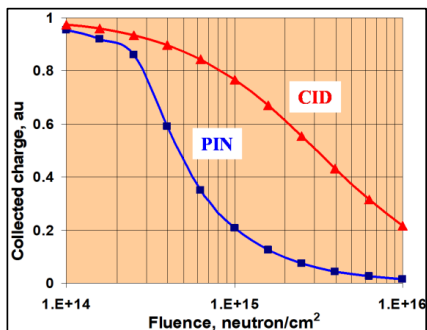
А.Г. Забродский, В.К. Еремин, М. Вербицкая, И.В. Еремин, Н.Н. Фадеева,
Ю.В. Тубольцев, А.С. Шепелев, Д.Д. Митина, А.А. Богданов

Большой Адронный Коллайдер (БАК) – крупнейший и наиболее совершенный инструмент, созданный человечеством для исследования Мироздания. Достигнутые энергии ускоренных частиц – 14 ТэВ для протонов и высокая интенсивность пучка позволили воспроизвести и исследовать взаимодействия между частицами в возрасте Вселенной, измеряемой тысячными долями секунды от момента Большого взрыва. ФТИ им. А.Ф. Иоффе как институт, сочетающий знания в области физики полупроводников и опыт создания полупроводниковых детекторов излучений, был приглашен в международную коллаборацию институтов по исследованию радиационной деградации кремниевых детекторов излучений под воздействием релятивистских адронов. Вклад института состоял в комплексном исследовании данной проблемы и был реализован важными для ЦЕРНа приборными разработками.

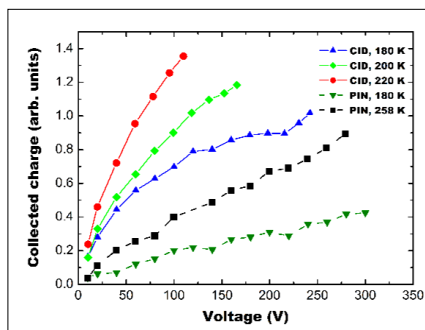
Важнейшим негативным эффектом воздействия ускоренных частиц на кремниевые детекторы является их радиационная деградация, т.е. уменьшение амплитуды электрического сигнала от зарегистрированной частицы. В этой проблеме институтом был предложен принцип и создан новый тип кремниевых детекторов – детекторов с инжекцией тока (Current Injected Detectors, CID), в которых используется эффект тока, ограниченного пространственным зарядом в полупроводниках, содержащих высокие концентрации глубоких уровней. Моделирование работы детекторов с инжекцией тока показало эффективную стабилизацию электрического поля в их чувствительной области с сопутствующим подавлением потерь заряда и, как следствие, снижение влияния облучения на сигнал детектора. Эксперименты, выполненные на пучке мюонов с энергией 225 ГэВ/кулон на ускорителе SPS в ЦЕРНе, показали более чем 3-х кратное снижение темпа радиационной деградации сигнала детекторов при дозе 1×10^{15} нейтрон/см² и увеличение радиационного ресурса до 10 раз, т.е. до дозы 1×10^{16} нейтрон/см² (рис. 5).

Была осуществлена разработка т.н. «edgeless» детекторов с минимизированной нечувствительной областью на периферии чипа, позволяющих регистрировать частицы в пространстве на десятки микрон удаленном от прямого пучка БАК. Работа была инициирована коллаборацией LHC-TOTEM в целях исследования малоуглового упругого и неупругого рассеяния протонов с энергиями до 14 ТэВ. Вся разработка, от физической концепции до технологического решения, была выполнена в России и завершена изготовлением 400 детекторов на отечественной технологической базе. Детекторы входят в состав т.к. «Roman pots», установленных на расстоянии

220 метров от точки взаимодействия протонов, что позволило изучать рассеяние частиц в пределах 10^{-6} рад. В настоящее время модули с детекторами ФТИ продолжают успешно использоваться в ЦЕРНе коллаборацией TOTEM в рамках эксперимента «CMS» как элемент прецизионного протонного спектрометра (рис. 6).



а



б

Рис. 5. Зависимость эффективности собирания заряда для кремниевого детектора, работающего в стандартном режиме обеднения чувствительной области (PIN) и с инжекцией тока (CID) от дозы облучения (а) и от напряжения при дозе облучения 1×10^{15} нейтрон/ cm^2 (б)

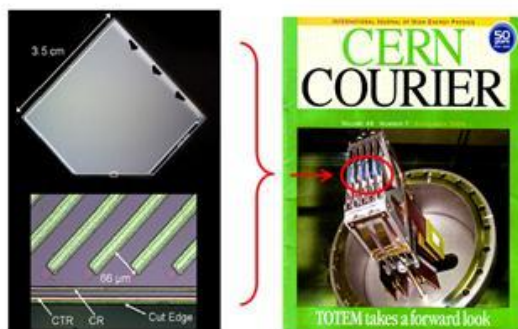


Рис. 6. Кремниевые «edgeless» детекторы, разработанные для эксперимента TOTEM. На фотографии слева: детекторный чип (вверху) и фрагмент торца чувствительной зоны (внизу)

Еще одним наукоемким проектом в области физики полупроводников проведенным с решающим участием ФТИ явилось создание прототипов мониторов потерь частиц пучка БАК. Мониторы должны обеспечивать непрерывное измерение потока частиц вышедших из пучка БАК и тем самым способных нагревать обмотки сверхпроводящих магнитов вплоть до разрушения их сверхпроводящего состояния и разрушению БАК. Уникальность разработки состоит в том, что мониторы должны находиться непосредственно в среде сверхтекучего гелия, т.е. при температуре 1,9 К, сохраняя предсказуемую чувствительность до дозы 1×10^{15} протон/ cm^2 . Первые

эксперименты, проведенные на ускорителе PS в ЦЕРНе, показали десятикратно увеличенную скорость радиационной деградации детекторов по сравнению с их работой при комнатной температуре. Цикл последующих исследований позволил оптимизировать структуру детекторов и тем самым стабилизировать дозовую зависимость их чувствительности с возрастанием дозы за счет возникновения эффекта лавинного умножения с внутренней отрицательной обратной связью. Большой объем уникального экспериментального материала продолжает изучаться в целях создания физики работы детектора долговременного сценария деградации при воздействии радиации в столь уникальных условиях (рис. 7).

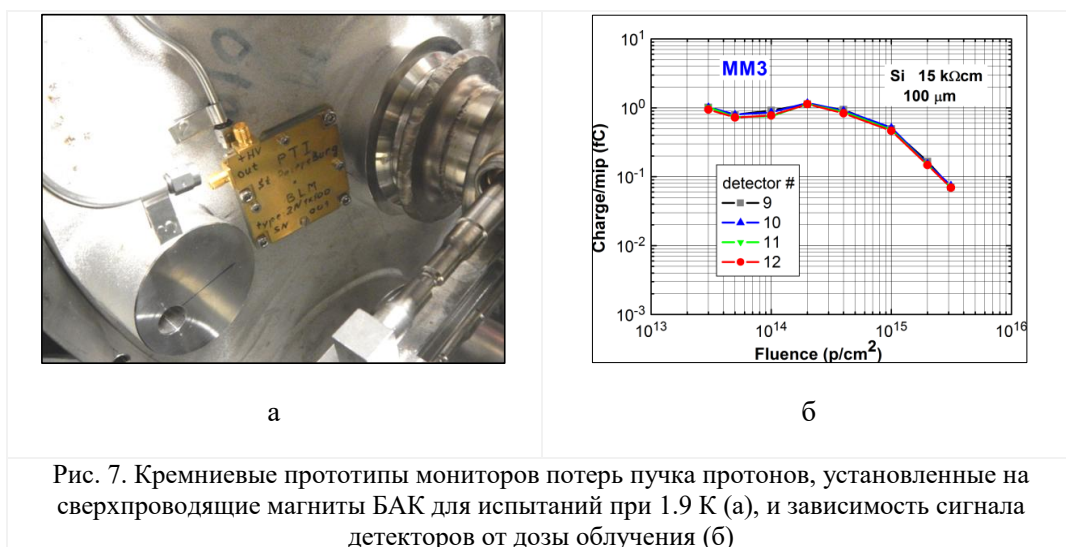


Рис. 7. Кремниевые прототипы мониторов потерь пучка протонов, установленные на сверхпроводящие магниты БАК для испытаний при 1.9 К (а), и зависимость сигнала детекторов от дозы облучения (б)

Литература

1. Eremin V., Härkönen J., Li Z., Verbitskaya E., Current injected detectors at super-LHC program // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Research A 583 (2007) 91-98.
2. Verbitskaya E., Eremin V., Ruggiero G. Development of radiation hard edgeless detectors with current terminating structure on p-type silicon // Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A 658 (2011) 108-117.
3. Sirunyan A.M., Tumasyan A.,... Eremin V., ... Zielinski K., et al., The CMS and TOTEM collaboration: Observation of proton-tagged, central (semi)exclusive production of high-mass lepton pairs in pp collisions at 13 TeV with the CMS-TOTEM precision proton spectrometer // J. High Energy Phys. 7 (2018) 153.
4. Kurfurst C., Dehning B., Sapinski M., ... Eremin V., Verbitskaya E., Zabrodskii A., Fadeeva N., Tuboltsev Y., Eremin I., et al., In situ radiation test of silicon and diamond detectors operating in superfluid helium and developed for beam loss monitoring // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. A 782 (2015) 149-158.

5. Verbitskaya E., Eremin V., Zabrodskii A., Bogdanov A., Shepelev A., Dehning B., et al., Development of silicon detectors for Beam Loss Monitoring at HL-LHC // J. Instrum. 2017, 12, C03036.

Низкоразмерные наногетероструктуры на основе A^2B^6 для оптоэлектроники и квантовой фотоники видимого спектрального диапазона

С.В. Иванов, А.А. Торопов, Т.В. Шубина, С.В. Сорокин, И.В. Седова, К.Г. Беляев, М.В. Рахлин

В 1991 году исследователи из 3M Company (США) сообщила о создании первого в мире лазерного диода (ЛД) на основе ZnSe, что послужило толчком к началу работ в мире по созданию долгоживущих сине-зеленых ЛД на основе широкозонных соединений A^2B^6 . С 1993 года эта тема получила развитие и в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, где по заказу Samsung Electronics Ltd. (Корея) были инициированы разработки технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) полупроводниковых соединений A^2B^6 с квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми точками (КТ) на подложках GaAs. В короткие сроки была разработана термодинамическая модель МПЭ соединений на основе ZnSe, обеспечивающая количественное описание технологического процесса [1], в 1995 году на основе выращенной двойной гетероструктуры с КЯ ZnCdSe/ZnSSe/ZnMgSSe был продемонстрирован сине-зеленый ЛД при 300 К, а в 1999 году в тесном сотрудничестве с Университетом г. Вюрцбург (Германия) и первый в мире непрерывный ЛД с КТ CdSe в структуре BeZnSe/BeMgZnSe [2]. Вскоре стало понятно, что малые времена жизни ЛД A^2B^6 определяются процессами «медленной деградации», связанной с нестабильностью азотного акцептора, поэтому основные усилия были сфокусированы на создании лазеров на основе нелегированных гетероструктур A^2B^6 с альтернативной (оптической или электронно-лучевой) накачкой, демонстрирующих существенно лучшую деградационную стабильность. В результате для лазеров зеленого диапазона с активной областью на основе КТ CdSe/ZnSe и волноводной сверхрешеткой ZnSe/ZnSSe были достигнуты рекордно низкие значения пороговой плотности мощности при оптической накачке (при 300 К) на уровне $I_{thr} \sim 0,8$ кВт/см², что эквивалентно $\sim 150-200$ А/см² для инжекционной накачки. С целью расширения спектрального диапазона в желтую область была разработана конструкция лазерной гетероструктуры с активной областью на основе КТ CdSe, асимметрично вставленных в напряженную КЯ $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$ толщиной 2-3 нм с содержанием Cd до $x \sim 0,5$ (рис. 8).

Была продемонстрирована генерация (при 300 К) при оптической накачке на рекордно большой длине волны $\lambda = 593$ нм при рекордно низкой для

полупроводниковых лазеров данного диапазона пороговой плотности мощности $I_{thr} \sim 2,5$ кВт/см².

На базе данных наногетероструктур при взаимодействии с учеными Института физики НАН Беларуси изготовлены импульсные инжекционные $A^2B^6/InGaN$ лазерные конвертеры (ИЛК), в которых активная гетероструктура A^2B^6 накачивается излучением $InGaN$ ЛД, сфокусированным системой микролинз. Было продемонстрировано, что вариация состава и конструкции активной области гетероструктуры A^2B^6 позволяет получать лазерное излучение на длинах волн 520–590 нм. При этом значения квантовой эффективности конверсии в зеленом (520–550 нм) спектральном диапазоне и импульсной выходной мощности при накачке промышленным $InGaN$ ЛД ($\lambda_{exc} = 416–440$ нм) составили $\eta_q = 20–30\%$ и $P_{out} \leq 5$ Вт, соответственно.

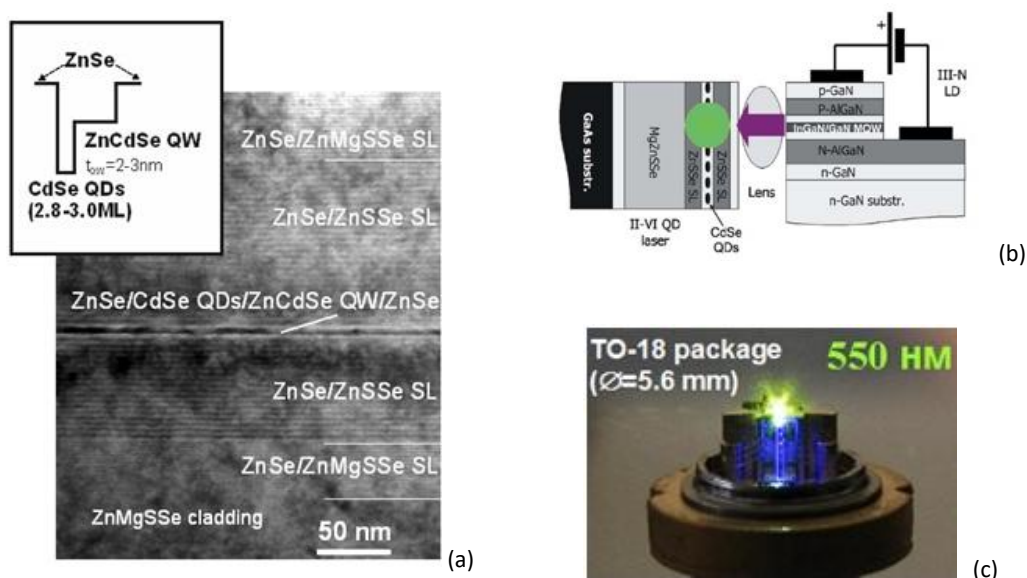


Рис. 8. ПЭМ изображение A^2B^6 лазерной гетероструктуры для желтого спектрального диапазона (а), схематическое изображение структуры $A^2B^6/InGaN$ инжекционного лазерного конвертера (б) и фотография компактного инжекционного лазерного конвертера A^2B^6/A^3N желто-зеленого диапазона ($\lambda = 550$ нм) (с)

В случае ИЛК, излучающего в желтом спектральном диапазоне ($\lambda = 590$ нм), максимальное значение выходной мощности составило $P_{out} = 0.7$ Вт при $\eta_q = 18,4\%$. Были изготовлены ИЛК зеленого и зелено-желтого (520–560 нм) диапазонов в конфигурации «микрочип», т.е. в стандартном корпусе TO-18 диаметром 5,6 мм. Компактные полупроводниковые ИЛК могут быть использованы в пико-проекторах для смартфонов и видеокамер, системах лазерного телевидения и др. Максимальные

достигнутые значения параметров микрочип-ИЛК ($\lambda=541$ нм) составили $P_{out}\sim 1.5$ Вт ($\tau_{pulse}=4$ нс, $f=1$ кГц) при $\eta_q=15\%$ (рис. 9).

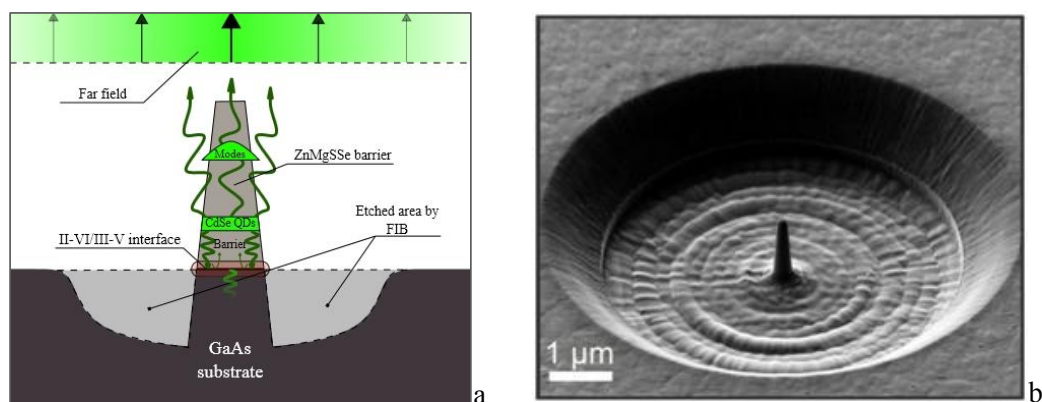


Рис. 9. Схематическое изображение фотонной нанопроволоки с одиночной КТ CdSe/ZnSe (а), изображение изготовленной при травлении сфокусированным ионным пучком нанопроволоки с одиночной КТ CdSe/ZnSe (б)

Новые возможности использования гетероструктур широкозонных соединений A^2B^6 появились в связи с развитием нового направления – квантовой фотоники. На основе выращенных методом МПЭ на GaAs гетероструктур с КТ CdSe/ZnSe/ZnMgSSe, сформированными оригинальным методом резкого высокотемпературного отжига напряженного слоя CdSe, были изготовлены с использованием метода фокусированного ионного травления эффективные источники одиночных фотонов зеленого спектрального диапазона, перспективные для применений в атмосферных оптических линиях защищенной квантовой связи. Созданные излучатели одиночных фотонов представляют собой КТ, помещенную внутри полупроводниковой конической нанопроволоки из широкозонного материала ZnMgSSe, действующей как многомодовая оптическая нанопроволока. Несмотря на поддержание большого числа оптических мод, такая нанопроволока собирает однофотонное излучение одиночной КТ и обеспечивает его эффективный вывод. При нерезонансной оптической накачке продемонстрированная средняя скорость излучаемых одиночных фотонов превышает 5 МГц с корреляционной функцией второго порядка $g^{(2)}(0)=0,25$ при практически важной температуре 220 К, которая может быть достигнута с помощью термоэлектрических преобразователей [3] (рис. 10).

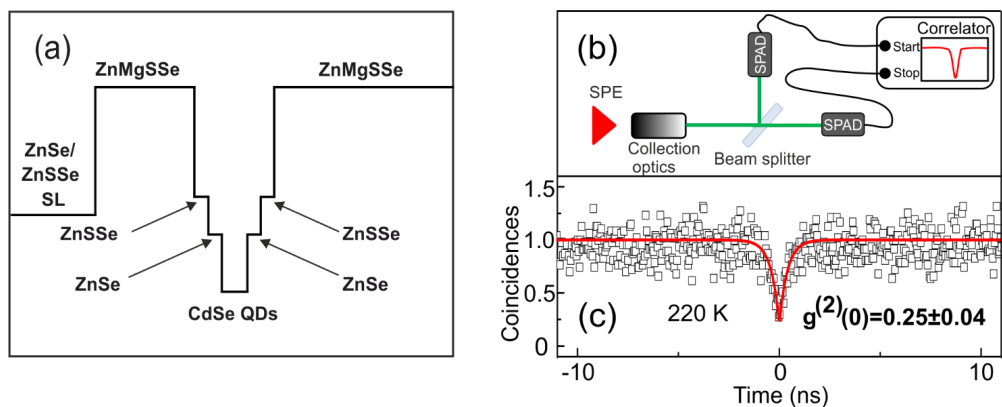


Рис. 10. Схематическое изображение энергетической зонной диаграммы гетероструктуры A^2B^6 с КТ CdSe/ZnSe (a), оптическая схема установки измерения корреляционной функции второго порядка g^2 (b), нормированная корреляционная функция второго порядка g^2 , измеренная при температуре 220 К для экситонной линии излучения одиночной КТ CdSe/ZnSe (c)

Литература

1. *Ivanov S.V., Sorokin S.V., Sedova I.V.* Molecular beam epitaxy of wide-gap II–VI laser heterostructures. In: Henini M., editor. *Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production* // Elsevier Inc., 2013. p. 611–630.
2. *Ivanov S.V., Toropov A.A., Sorokin S.V., Shubina T.V., Sedova I.V., Sitnikova A.A., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Waag A., Lugauer H.-J., Reuscher G., Keim M., Landwehr G.* CdSe-Fractional-Monolayer Active Region of Molecular Beam Epitaxy Grown Green ZnSe-Based Lasers // *Appl. Phys. Lett.* 74, 498 (1999).
3. *Rakhlin M., Sorokin S., Kazanov D., Sedova I., Shubina T., Ivanov S., Mikhailovskii V., Toropov A.* Bright Single-Photon Emitters with a CdSe Quantum Dot and Multimode Tapered Nanoantenna for the Visible Spectral Range // *Nanomaterials* 11, 916 (2021).

Мощные полупроводниковые лазеры ближнего ИК диапазона

Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Л.С. Вавилова, И.Н.Арсентьев, А.В. Лютецкий, А.А. Подоскин, А.Ю. Лешко, Д.А. Веселов, Д.Н. Николаев, В.В. Золотарев, И.С. Шашкин, Ж.И. Алферов, Д.З. Гарбузов, И.С. Гарасов

За последние 30 лет в ФТИ им. А.Ф. Иоффе была разработана и реализована концепция мощных полупроводниковых лазеров в системе твердых растворов In-Ga-Al-As-P, изопериодических с подложками InP и GaAs. Основой этой концепции является создание лазерных гетероструктур с малыми внутренними оптическими потерями. Снижение внутренних оптических потерь (любыми доступными способами) позволяет сохранить дифференциальную квантовую эффективность при увеличении длины резонатора [1]. Увеличение длины резонатора обеспечивает максимальные рабочие токи и, как следствие, высокую выходную мощность излучения. В результате применения разработанной концепции в полупроводниковых лазерах с шириной излучающей области 100 мкм достигнуты рекордные значения КПД $\approx 74\%$ и выходной оптической мощности 16 Вт в непрерывном режиме генерации при комнатной температуре [2]. Лазерные диоды изготовлены на основе разработанной запатентованной конструкции асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения AlGaAs/GaAs/InGaAs ($\lambda=1060$ нм) со сверхтолстым волноводом (1,7 мкм), выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии, имеющей минимальную величину внутренних оптических потерь $0,34 \text{ см}^{-1}$ (рис. 11, 12). Разработка и реализация конструкции мощных многомодовых лазеров с поверхностно интегрированным распределенным брэгговским зеркалом (П-РБЗ) высокого порядка дифракции позволила кардинально уменьшить их ширину спектра генерации. Продемонстрирована высокая спектральная стабильность излучения ($\delta\lambda < 3 \text{ \AA}$) при сохранении всех остальных выходных характеристик диодных лазеров [3].

В лазерных диодах условно безопасного для глаз диапазона длин волн (1 400–1 600 нм) достигнуты рекордные значения КПД $\approx 40\%$ и выходных оптических мощностей 4 Вт и 18 Вт в непрерывном и импульсном (100 нс/1 кГц) режиме генерации, соответственно ($T = 25^\circ\text{C}$) [4]. Работы выполнялись совместно с Индустриальным партнером – АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», Москва. Результаты не имеют аналогов в России и находятся на уровне мировых достижений. Разработка широко востребована в первую очередь в приборах специального назначения и медицине.

С целью увеличения импульсной оптической мощности с одиночного кристалла полупроводникового лазера была разработана новая технология полупроводниковых эпитаксиально-интегрированных наноструктур. Вертикальная интеграция достигается применением нового конструктивного решения посредством

последовательной туннельной связи полупроводниковых наноструктур, излучающих в ближнем ИК диапазоне (800–1 100 нм). Разработанные мощные полупроводниковые импульсные лазеры на основе туннельно-связанной лазерной гетероструктуры имеют следующие выходные характеристики: выходная оптическая мощность в импульсе не менее 200 Вт; срок службы более 10^9 штук импульсов; рабочая температура $25 \pm 1^\circ\text{C}$; длительность импульса 100 ± 30 нс; частота повторения импульса 1–3 кГц; апертура излучения 100 ± 10 мкм; диапазон длин волн излучения 915–1 060 нм [5].

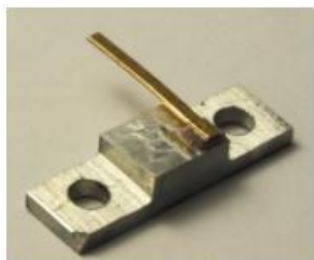


Рис. 11. Кристалл мощного полупроводникового лазера на теплоотводе

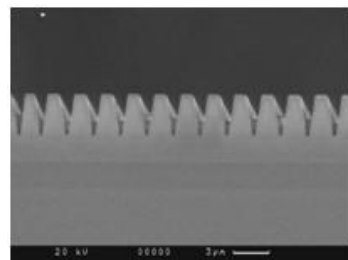
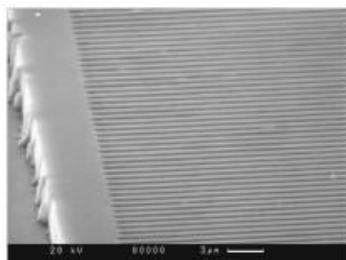


Рис. 12. СЭМ-изображения лазерной гетероструктуры с поверхностно интегрированным распределенным брэгговским зеркалом (вид сбоку и сверху)

Впервые для управления сверхвысокими интенсивностями лазерного излучения и токами инжекции с наносекундной и субнаносекундной динамикой переходных процессов разработаны и исследованы подходы, основанные на использовании эффекта электрической бистабильности в многопереходных полупроводниковых гетероструктурах. Использование многопереходных полупроводниковых гетероструктур с электрической бистабильностью позволило решить задачу монолитной интеграции быстродействующего ключа и генератора лазерного излучения (рис. 13, 14), что обеспечило предельное быстродействие переходных процессов переключения и высокие оптические мощности [7, 8]. Показано, что в динамике инжекционных токов накачки лазерной части существенную роль играет процесс модуляции избыточными носителями заряда слаболегированных областей базы и коллектора транзисторной части. В результате происходит формирование домена поля, обеспечивающего функцию виртуального эмиттера электронов и дырок за счет ударной ионизации. В разработанных низковольтных лазерах-тиристорах была достигнута пиковая мощность лазерных импульсов 55 Вт для одиночного излучателя и 100 Вт для микролинейки апертурой 1 000 мкм [6].

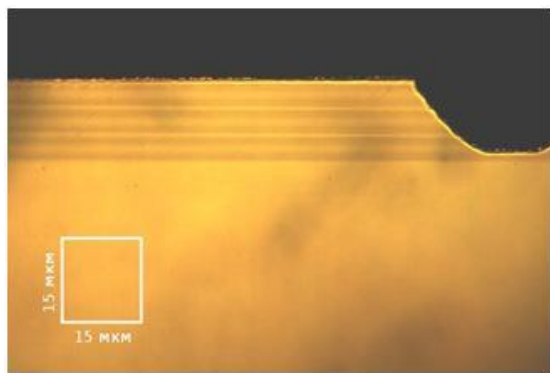


Рис. 13. СЭМ-изображение лазерной эпитаксиально-интегрированной AlGaAs/InGaAs/GaAs мезаструктуры с двумя туннельными переходами

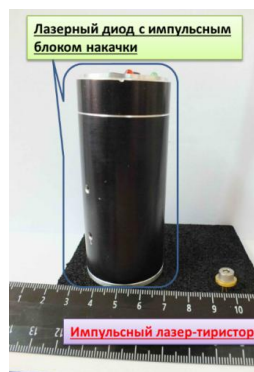


Рис. 14. Импульсные лазерные источники на основе полупроводниковых лазеров с блоком питания и лазера-тиристора

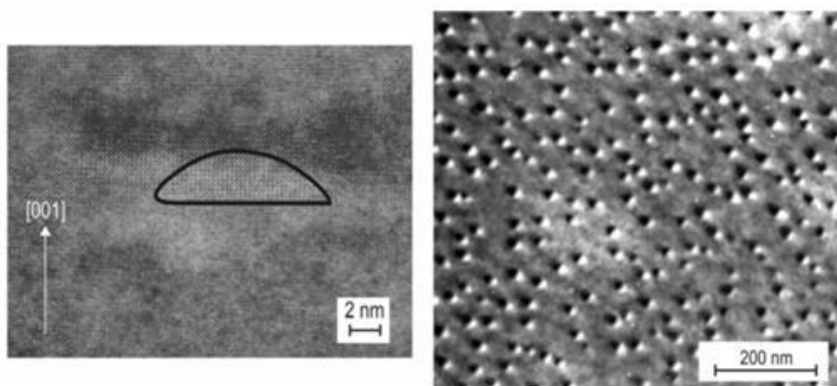
Литература

1. Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Тарасов И.С., Внутренние оптические потери в полупроводниковых лазерах // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 3. С. 374-379.
2. Pikhtin N.A., Slipchenko S.O., Sokolova Z.N., Stankevich A.L., Vinokurov D.A., Tarasov I.S. and Alferov Zh.I. 16 W continuous-wave output power from 100- μm -aperture laser with quantum well asymmetric heterostructure // Electronics Letters vol. 40, no. 22, 28th October, 2004, p. 1413-1414.
3. Золотарев В.В., Лешко А.Ю., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Лубянский Я.В., Воронкова Н.В., Тарасов И.С. Поверхностные интегрированные дифракционные решетки высших порядков для полупроводниковых лазеров // Квантовая электроника, 45:12 (2015), 1091–1097.
4. Волков Н. А., Андреев А.Ю., Яроцкая И.В., Рябоштан Ю.Л., Светогоров В.Н., Ладугин М.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Веселов Д.А., Пихтин Н.А., Полупроводниковые AlGaInAs/InP-лазеры ($\lambda=1450\text{--}1500$ нм) с сильно асимметричным волноводом // Квантовая электроника, 51:2 (2021), 133–136.
5. Винокуров Д.А., Коняев В.П., Ладугин М.А., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Петрунов А.Н., Пихтин Н.А., Симаков В.А., Слипченко С.О., Сухарев А.В., Фетисова Н.В., Шамахов В.В., Тарасов И.С. Исследование эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных полупроводниковых лазеров, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии // ФТП. 2010. Т. 44. Вып. 2. С. 251-255.
6. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A., Tarasov I.S. Effect of the spatial current dynamics on

Гетероструктуры с квантовыми точками A^3B^5 для оптоэлектроники нового поколения

В.М. Устинов

В начале 1990-х гг. в ФТИ им. А.Ф. Иоффе начались исследования нового типа полупроводниковых структур с пространственным ограничением носителей заряда во всех трёх измерениях, в которых реализуется предельный случай размерного квантования. Эти так называемые «сверхатомы» или квантовые точки (КТ) дают возможность наиболее кардинальной модификации электронного спектра по сравнению со случаем объёмного полупроводника (рис. 15). Качественный прорыв в данной области связан с использованием эффектов самоорганизации полупроводниковых наноструктур в режиме роста Странского–Крастанова. В гетероэпитаксиальной системе при наличии рассогласования по постоянной решетки между осаждаемым материалом и подложкой релаксация упругих напряжений и уменьшение упругой энергии приводят к образованию изолированных однородных островков с высокой поверхностной плотностью. В ФТИ были реализованы идеальные гетероструктуры с InAs/AlGaAs КТ с высоким кристаллическим совершенством, высоким квантовым выходом излучательной рекомбинации и высокой однородностью по размерам (10%).



а

б

Рис. 15. Изображения InAs квантовых точек на поверхности GaAs (100): а) вид в сколе высокого разрешения; б) вид в плане

Использование КТ в активной области лазерной структуры позволило продемонстрировать первый в мире инжекционный лазер на квантовых точках [1]. Экспериментально были подтверждены такие уникальные параметры лазеров на квантовых точках как высокая температурная стабильность порогового тока (характеристическая температура вплоть до 1200 К), низкая пороговая плотность (до 6 A/cm^2 на один слой), возможность выращивать до десяти слоев квантовых точек [2].

Детальные исследования физических свойств КТ в системе материалов InGaAs/AlGaAs и тщательная оптимизация режимов эпитаксиального роста с использованием эффектов внутренних структурных напряжений позволили расширить спектральный диапазон излучения структур до длин волн $\sim 1300 \text{ нм}$ и впервые создать лазеры этого диапазона на подложках GaAs как в классической геометрии лазера с резонатором Фабри-Перо, так и в геометрии с вертикальным оптическим резонатором при инжекционной и оптической накачке (рис. 16) [3].

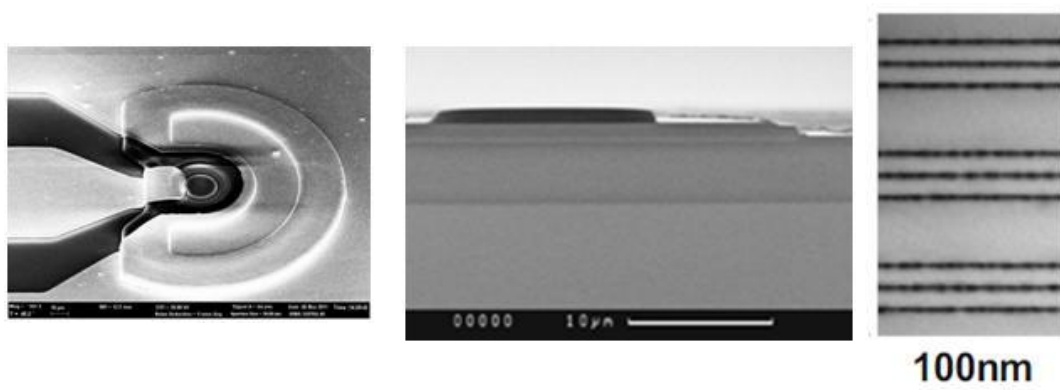


Рис. 16. Изображение топологии и поперечного сечения кристалла лазера с вертикальным оптическим микрорезонатором и активной областью на основе массивов самоорганизующихся КТ в электронном микроскопе

Развитие технологических приёмов эпитаксиального роста III-N гетероструктур позволило разработать методы формирования InGaN/GaN квантовых точек, на основе которых были созданы светодиоды, излучающие в диапазоне от синей до красной областей спектра, и белые светодиоды с монокристаллической активной областью, содержащей несколько слоев квантовых точек, излучающих при различных длинах волн, суммарное излучение которых дает белый свет без использования люминофорных покрытий [4].

В 2002 г. коллектив авторов из ФТИ во главе с Ж.И. Алферовым был удостоен Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники за цикл работ «Фундаментальные исследования процессов формирования и свойств гетероструктур с квантовыми точками и создание лазеров на их основе». Развитая в

ФТИ им. А.Ф. Иоффе концепция лазерных гетероструктур Al^3B^5 с самоорганизующимися квантовыми точками легла в основу создания нескольких высокотехнологических компаний и в настоящее время используется в производстве лазерных излучателей с уникальными характеристиками.

Литература

1. Grundmann M., Richter U., Ustinov V. M., Kop'ev P. S., Kirstaedter N., Bimberg D., Werner P., Ruvimov S. S., Ledentsov N. N., Gösele U., Alferov Z. I., Heydenreich J. and Maximov M. V. Low threshold, large To injection laser emission from (InGa)As quantum dots // Electron. Lett. 1994 30 1416–7.
2. Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Щукин В.А., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д., Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры // ФТТ. 1998. Т. 32(4) С. 385.
3. Ustinov V.M., Zhukov A.E., Egorov A.Y., Maleev N.A. Quantum dot lasers // Oxford Univ. Press, 2003.
4. Tsatsulnikov A.F., Lundin W.V. Stimulated Formation of InGaN Quantum Dots / “State-of-the-Art of Quantum Dot System Fabrications”, 172 p. Publisher: InTech, 2012. P.142-160. ISBN 978-953-51-0649-4.

Интегрально-оптические модуляторы на подложках ниобата лития (LiNbO_3) для информационно-телекоммуникационных применений, высокоточных волоконно-оптических датчиков и радиофотоники

И.В. Ильичёв, П.М. Агрузов, А.А. Усикова, В.В. Лебедев, А.В. Тронеv,
А.В. Варламов, М.В. Парфенов, А.В. Шамрай

Интегрально-оптические модуляторы на подложках ниобата лития (LiNbO_3) широко применяются в различных областях информационно-телекоммуникационных технологий [1]. Несмотря на то, что разработки модуляторов на подложках ниобата лития начались более полувека назад, интерес к данному направлению не только не ослабевает, а постоянно растет, что связано новыми практическими применениями, такими как квантовая фотоника, выдвигающими требования близкие, а иногда лежащие за фундаментальными пределами классической физики.

Лаборатория квантовой электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе является ведущим российским центром компетенции в области интегральной оптики на подложках LiNbO_3 , единственная в России обладает обеими промышленными технологиями изготовления градиентных оптических волноводов: термической диффузией титана и протонным обменом. Достигнутые минимальные оптические потери интегрально-оптических устройств (1,5 дБ при стыковке со стандартным одномодовым волокном SMF 28) соответствуют современному мировому уровню в данной области.

Оригинальная конфигурация электродов бегущей волны и технология их изготовления на основе гальванического осаждения серебра с последующим золочением, позволили достигнуть полосы частот модуляции выше 25 ГГц, при половолновом напряжении менее 5 В.

Разработана линейка интегрально-оптических модуляторов на основе оптических волноводов на подложках LiNbO_3 . В устройствах реализована модуляция всех параметров оптического излучения: амплитуды, фазы, состояния поляризации, а также сдвиг частоты оптического излучения. Широкий круг практических применений разработанных модуляторов включает системы обработки сигналов высокоточных оптических датчиков [2], радиофотонику [3], где модуляторы используются в системах генерации, передачи и обработки аналоговых СВЧ сигналов, а также системы квантовой криптографии [4]. Чипы амплитудных и фазовых модуляторов разработки ФТИ им. А.Ф. Иоффе используются в первой в России квантовой линии связи Москва–Санкт-Петербург, открытие которой состоялось 8 июня 2021 г.

Новые исследования, проводимые в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области интегральной оптики связаны с технологией гибридных волноводных структур на тонкопленочном ниобате лития. Данная перспективная технология позволит решить задачи миниатюризации и повышения степени интеграции волноводных элементов, снижения энергопотребления и увеличения быстродействия (расширения частотной полосы) интегрально-оптических устройств. Одной из разработок, над которой ведется работа в настоящее время, является интегрально-оптический детектор одиночных фотонов [5], один из ключевых элементов квантовых интегральных схем будущего (рис. 17).

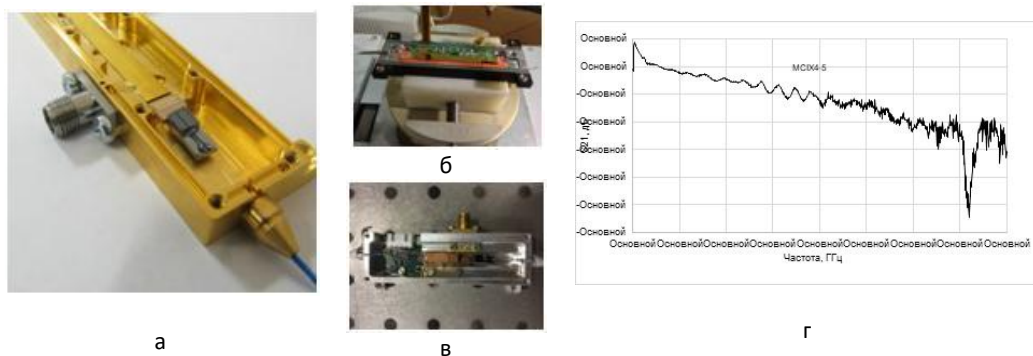


Рис. 17. Интегрально-оптические модуляторы разработки ФТИ им. А.Ф. Иоффе: а) сверхширокополосный амплитудный модулятор Маха-Цендера; б) двухканальный фазовый модулятор в составе волоконно-оптического гироскопа навигационного класса точности (АО «Концерн «ЦНИ «Электроприбор»); в) акустооптический модулятор сдвига частоты; г) Частотная характеристика сверхширокополосного модулятора с полосой частот выше 25 ГГц

Литература

1. *Петров В.М., Агрузов П.М., Лебедев В.В., Ильичев И.В., Шамрай А.В.*, Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития // УФН, 2021.
2. *Ильичев И.В., Агрузов П.М., Шамрай А.В.*, Интегрально-оптический модулятор для волоконно-оптического гироскопа // Патент РФ № 166908 от 24 ноября 2016.
3. *Устинов А.Б., Таценко И.Ю., Никитин А.А., Кондрашов А.В., Шамрай А.В., Иванов А.В.*, Принципы построения оптоэлектронных СВЧ генераторов // Фотоника, 2021, т.15 (3), с. 228-237.
4. *Петров В.М., Шамрай А.В., Ильичев И.В., Агрузов П.М., Лебедев В.В., Герасименко Н.Д., Герасименко В.С.*, Отечественные СВЧ интегрально-оптические модуляторы для квантовых коммуникаций // Фотоника, 2020, т.14 (5), с. 414-423.
5. *Парфенов М.В., Шамрай А.В.*, Повышение эффективности интегрально-оптического сверхпроводящего датчика одиночных фотонов на подложке ниобата лития за счет дополнительного покровного слоя с высоким показателем преломления // Письма ЖТФ, 2020, т.46 (16), с. 39-42.

Разработка, промышленное освоение и коммерциализация технологий создания высокоэффективных кремниевых фотоэлектрических модулей

Е.И. Тербуков

Результатом научной деятельности ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области аморфных гидрогенизированных полупроводников за последние десять лет стала новая подотрасль энергетики России – солнечная энергетика. Полученные результаты полного цикла фундаментальных, прикладных исследований и разработок технологий высокоэффективных кремниевых фотоэлектрических модулей, их промышленного освоения и коммерциализации позволили создать сетевые солнечные электростанции (СЭС) и автономные энергокомплексы в различных регионах страны.

Ключевая идея состоит в использовании технологий легированного гидрогенизированного кремния в производстве солнечных модулей (СМ). Используя научные заделы ФТИ им. А.Ф. Иоффе, разработана промышленная технология высокоэффективных гетероструктурных солнечных модулей на кремнии с КПД более 24% (рис. 18). Технология внедрена в производство на ООО «Хевел» в г. Новочебоксарске, которое обеспечило масштабное строительство СЭС в России (рис. 19).

По результатам работ опубликовано 60 статей и 3 монографии, получено 15 патентов РФ.

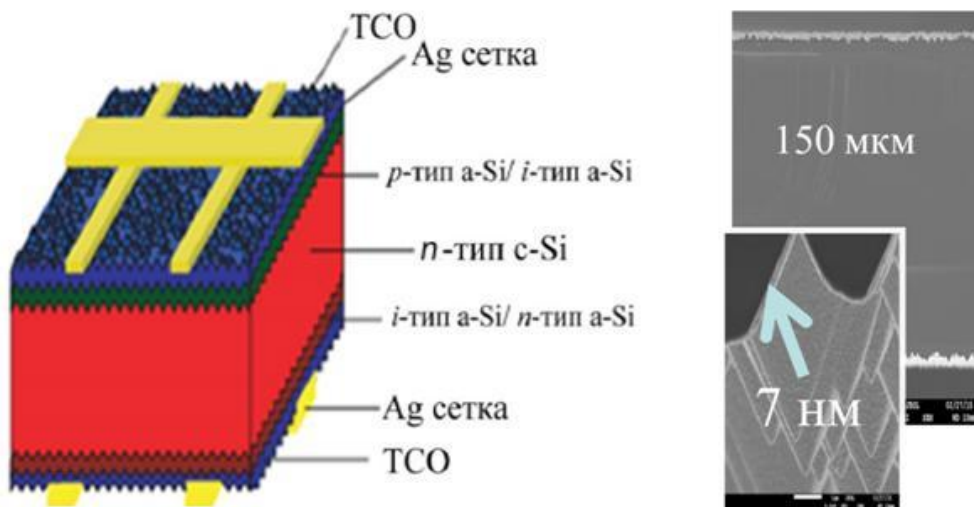


Рис. 18. Высокоэффективная гетероструктура a-Si:H/c-Si, КПД 24%



Рис. 19. Сетевая солнечная электростанция, 5 МВт, Республика Алтай

В ходе выполнения этих масштабных работ был создан научно-производственный консорциум в составе академического института, научно-технического центра, завода и производств по проектированию и строительству СЭС, осуществлен трансфер результатов научных исследований и разработок в промышленное производство. Начат экспорт отечественной наукоемкой продукции. Завод ООО «Хевел» вышел на годовой объём производства модулей 340 МВт, принято решение о расширении производства высокоэффективных солнечных модулей до

1,3 ГВт. Успешная реализация проекта выдвинула Россию в тройку мировых лидеров в области разработки высокоэффективных солнечных элементов на кремнии.

В 2018 г сотрудники ФТИ им. А.Ф. Иоффе – Теруков Е.И., Бобыль А.В., Забродский А.Г., Абрамов А.С. и Андроников Д. А. стали лауреатами Премии Правительства РФ в области науки и техники.

Литература

1. *Bobyl A.V., Terukov E.I., Abramov A.S., Andronikov D.A et.al.* Temperature dependence of photoconversion efficiency in HIT solar cells: Theory vs experiment // Journal of Applied Physics 119(22):225702, 2016,
2. *Abramov A.S., Andronikov D.A, Terukov E.I.* Springer's Series in Optical Science: High-Efficient Low-Cost Photovoltaics. Recent Developments. Second Edition, Chapter 7. Silicon Heterojunction Technology: A Key to High Efficiency Solar Cells at Low Cost 2020, 2 edition, pp. 113-132.

Разработка и внедрение каскадных солнечных элементов и энергосистем на их основе

В.М. Андреев, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.А. Садчиков, В.С. Калиновский, А.С. Власов, В.Р. Ларионов, Д.А. Малевский,
Ж.И. Алферов, В.Д.Румянцев, В.А. Грилихес, В.М. Лантратов

Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии является наиболее перспективным направлением возобновляемой энергетики. Солнечные батареи обеспечивают энергопитанием космические аппараты и получают все большее применение на Земле. Основным барьером в увеличении темпов развития солнечной фотоэнергетики является относительно высокая стоимость солнечной электроэнергии. Основными путями снижения стоимости являются: повышение КПД энергосистем и уменьшение расхода материалов для батарей.

За последние 30 лет в ФТИ накоплен значительный опыт по разработке каскадных фотопреобразователей, обеспечивающих наивысший КПД фотоэлектрического преобразования солнечной энергии. Разработаны каскадные космические и наземные фотопреобразователи и солнечные фотоэнергоустановки на их основе с концентраторами солнечного излучения [1-3]. Сейчас КПД концентраторных каскадных GaInP/GaAs/Ge фотопреобразователей превышает 35% в космических условиях и 40% на Земле. Увеличение КПД каскадных фотопреобразователей достигнуто за счет внутреннего спектрального «расщепления» солнечного излучения на несколько спектральных интервалов и осуществления более эффективного преобразования энергии фотонов каждого из этих интервалов в определенной части полупроводниковой структуры (рис.20).

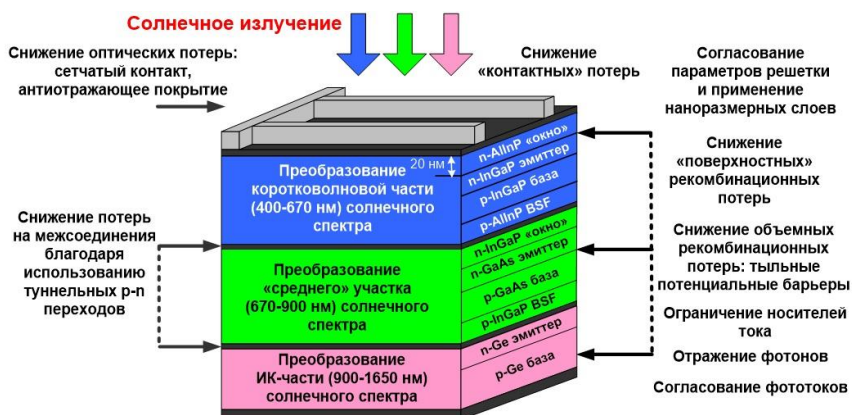


Рис. 20. Структура и назначение различных частей 3-х переходного каскадного солнечного элемента и пути увеличения его эффективности

Разработанные каскадные фотопреобразователи обеспечили значительное увеличение КПД и радиационной стойкости космических солнечных батарей – важнейшей составной части космических аппаратов. Созданы солнечные элементы, оптимизированные для работы на околоземных орбитах и на космических аппаратах, запускаемых в сторону от Солнца, например, в условиях околомарсианских орбит и на Марсе, характеризующихся меньшей рабочей температурой солнечных батарей по сравнению с рабочей температурой «околоземных» космических батарей. В космических условиях КПД таких элементов составляет порядка 38% при температуре минус 50°C и кратности концентрирования 100-300 «солнц». В наземных условиях КПД достигает величины более 40% в диапазоне температур $\pm 50^\circ\text{C}$ (рис. 21).

В разработанных наземных концентраторных модулях (рис. 22) и фотоэнергосистемах на основе каскадных фотопреобразователей при 500-кратном концентрировании солнечного излучения достигнуто более чем двукратное увеличение удельного (с единицы площади батарей) энергопотребления за счет большего КПД и слежения за положением Солнца. Обеспечено также снижение расхода и стоимости солнечных элементов в 500 раз пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения.

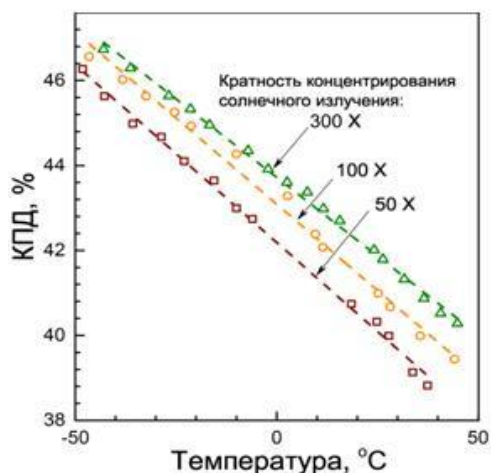


Рис. 21. Зависимость КПД каскадного солнечного элемента от температуры при различных кратностях концентрации «наземного» солнечного излучения



Рис. 22. Солнечная батарея на основе 576 каскадных солнечных элементов и концентраторов – линз Френеля на системе ориентации на Солнце

Модули с концентраторами излучения должны быть все время точно ориентированы на Солнце. В разработанных фотоэлектрических установках модули расположены на электронно-механической системе слежения, снабжённой датчиком положения Солнца. Работая в полностью автоматическом режиме, установки расходуют на собственные нужды менее 0,1% от энергии, генерируемой размещёнными на них модулями.

Разработанные каскадные солнечные элементы и энергосистемы на их основе с концентраторами солнечного излучения обеспечивают снижение стоимости получаемой электроэнергии за счет снижения площади солнечных элементов и увеличения удельной (с единицы площади) мощности батарей. Прецизионное отслеживание положения Солнца и улучшенная температурная стабильность КПД приводит к дополнительному увеличению количества электроэнергии, вырабатываемой концентраторными солнечными фотоэнергоустановками по сравнению с традиционными батареями.

Литература

1. *Alferov Zh.I., Andreev V.M., Shvarts M.Z.* III–V Solar Cells and Concentrator Arrays // High-Efficient Low-Cost Photovoltaics. Recent Developments. Second Edition Springer Ser. Opt. Sci. 2020. Vol. 140. P. 133-174.
2. *Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D.* III-V heterostructures in photovoltaics // Concentrator Photovoltaics // Springer Series in Optical Sciences. 2007. Vol. 130. P. 25-50.

3. *Andreev V.M., Grilikhes V.A., Rummyantsev V.D.* Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight // N.Y.: John Wiley & Sons Ltd. 1997.

Мощная импульсная полупроводниковая электроника нано и субнаносекундного диапазона

И.В. Грехов, М.И. Векслер, А.В. Горбатюк, П.А. Иванов, А.Ф. Кардо-Сысоев, С.В. Коротков, В.И. Брылевский, А.Г. Люблинский, П.Б. Родин, И.А. Смирнова

В лабораториях мощных полупроводниковых приборов и прикладных проблем сильноточной электроники проведены фундаментальные исследования физических принципов быстрого переключения высоковольтных полупроводниковых приборов на основе кремния и карбида кремния. Созданы новые быстродействующие ключи – кремниевые ударно-ионизационные динисторы и карбидкремниевые дрейфовые диоды с режимом восстановления, обладающие уникальными параметрами по мощности и быстродействию. Развита нелинейная теория процессов генерации и рассеивания неравновесной электронно-дырочной плазмы в быстродействующих полупроводниковых переключателях. Определены новые высокоэффективные электрофизические решения, позволившие разработать компактные генераторы мощных импульсов высокого напряжения с нано и пикосекундной длительностью и сверхмощные генераторы микросекундного диапазона на созданной в ФТИ полупроводниковой элементной базе – диодных и динисторных обострителях импульсов, дрейфовых диодах, реверсивно-включаемых динисторах.

Спектр применения мощных короткоимпульсных генераторов простирается от лабораторных устройств для проведения уникальных физических экспериментов до крупномасштабных промышленных технологий (рис. 23-26). Освоенными областями применения являются:

- системы питания импульсных лазеров и ускорителей;
- устройства для создания плазмохимических реакций;
- очистка промышленных отходов;
- модификация поверхности медицинских изделий;
- магнитная штамповка;
- устройства для сверхскоростного метания плазмы;
- устройства для создания сверхмощных ударных волн в газе и жидкости;
- сверхширокополосная радиолокация (в том числе подземная);
- направленное излучение мощных электромагнитных импульсов;
- новые системы связи.

Разработанные новые полупроводниковые приборы внедрены в производство отечественной промышленностью (ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск; АО «Группа Кремний Эл», г. Брянск), производство импульсных генераторов на

новой элементной базе успешно коммерциализировано (ООО «Мегаимпульс», РФ; FID GmbH, ФРГ). Примером применения экстремально мощных импульсных устройств в масштабных государственных проектах является установка мегаджоульного класса, создаваемая в РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) для достижения управляемого термоядерного синтеза.



Рис. 23. Коммутатор микросекундных импульсов на основе разработанного в ФТИ рекордно-мощного импульсного полупроводникового ключа микросекундного диапазона – реверсивно-включаемого динистора: рабочее напряжение 24 кВ, ток в импульсе 300 кА, длительность импульса 300 мкс

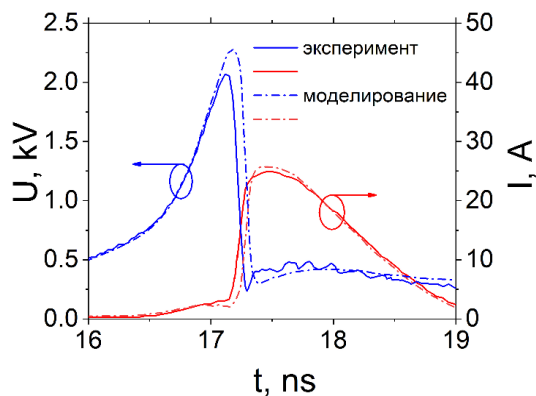


Рис. 24. 100-пикосекунднопереключение высоковольтного кремниевого диодного обострителя импульсов в режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя: напряжение на приборе (синие кривые) и ток в последовательной 50-омной нагрузке (красные кривые)



Рис. 25. Коммутатор наносекундных импульсов на основе ударно-ионизационных динисторов: рабочее напряжение 24 кВ, ток в импульсе 5 кА, длительность импульса 200 нс, рабочая частота 100 Гц



Рис. 26. Генератор наносекундных импульсов со сверхширокополосной антенной: амплитуда 50 кВ, длительность фронта 0.4 нс, ширина импульса 1 нс, частота повторения до 1 кГц

Литература

1. Grekhov I.V., Pulse power generation in nano- and subnano- second range by means of ionizing fronts in semiconductors: the state of the art and future prospects // IEEE Trans. Plasma Science, 38:5, pp. 1118-1123 (2010).
2. Kardo-Sysoev A.F. New Power Semiconductor Devices for Generation of Nano- and Subnanosecond Pulses, in Ultra-Wideband Radar Technology, ed. J. D. Taylor – CRC Press, 2000, pp. 205–290.
3. Grekhov I.V., Korotkov S.V., Rodin P.B., Novel closing switches based on propagation of fast ionization fronts in semiconductors // IEEE Trans. on Plasma Science 36, 378 (2008).
4. Grekhov I.V., Ivanov P.A., Kristyuk D.V., Konstantinov A.O., Korotkov S.V., Samsonova T.P., Sub-nanosecond semiconductor opening switches based on 4H–SiC p⁺pn⁺-diodes // Solid-State Electronics 47:10, pp. 1769-1774 (2003).
5. Brylevskiy V., Smirnova I., Gutkin A., Brunkov P., Rodin P., Grekhov I., Delayed avalanche breakdown of high-voltage silicon diodes: various structures exhibit different pico-second range switching behavior // J. Appl. Phys., 122, 186701 (2017).
6. Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Korotkov D.A., Zhmodikov A.L., Silicon dynistors with subnanosecond switching times // Review of Scientific Instruments. 91. 084704 (2020).

Исследования в области физической электроники

А.Н. Зиновьев, Н.Н. Аруев, Н.Р. Галль, М.В. Кузьмин, В.М. Микушкин, И.И. Пронин

Исследования в данной области направлены на развитие представлений о взаимодействии атомов, молекул, кластеров с поверхностью и механизмах явлений на поверхности, методов диагностики поверхностных слоев, в частности, масс-спектрометрии, а также новых подходов для создания функциональных материалов и изучения биообъектов с использованием методов физической электроники.

Из последних результатов можно выделить установление нового механизма торможения частиц в веществе [1], учитывающего перестройку электронных уровней в квазимолекуле, образующейся на время столкновения. При этом с большими сечениями происходит образование автоионизационных состояний, их распад ведет к ионизации частиц и является основным каналом неупругих потерь энергии при столкновении. Предложены скейлинги для расчета сечений, что позволяет проводить расчет тормозных потерь для неисследованных случаев. Если ранее расхождение теории и эксперимента достигало 10 раз, то сейчас оно устранено.

Получены важные результаты при облучении пучками материалов, перспективных для использования в качестве первой стенки токамака-реактора. Показано [2], что распыление стенки камеры быстрыми атомами дейтерия и трития, покидающими плазму, приводит к поступлению атомов бериллия в плазму с

концентрацией до 5% от плотности плазмы. В плазме атомы бериллия ионизируются до ядер, могут ускоряться потенциалом плазма-стенка и бомбардируют дивертор из вольфрама. Рассчитаны коэффициенты распыления вольфрама ионами бериллия и их угловые зависимости. Показано, что данный процесс может привести к опасному поступлению примеси вольфрама в плазму и вследствие значительных радиационных потерь влиять на нагрев ионов в плазме.

Проводятся разнообразные исследования фуллереновых пленок, а также других углеродных наноструктур с использованием синхротронного излучения [3,4]. Установлено, что длительный высокотемпературный отжиг (800°C – 2 ч) монослойного оксида графена на поверхности кремния в атмосфере водорода приводит к удалению кислородных групп и восстановлению графенового монослоя с последующим островковым гидрированием его внутренней поверхности интеркалированным водородом. В результате на SiO_2 поверхности формируется термостойкая «пятнистая» наноструктура, состоящая из узкозонных полупроводниковых островков C-H графена ($E_g = 0,46$ эВ) в окружении графена с барьером Шоттки на границе.

Показано, что при фазовом переходе, вызывающем образование однослойного графена на металле, имеется принципиальное отличие критической степени покрытия θ_{cg} углерода в фазе хемосорбированного «газа» на поверхности от равновесной степени покрытия θ_{eq} . При достижении θ_{cg} происходит фазовый переход, и зарождаются островки графена, а при θ_{eq} островки графена разной относительной площади находятся в равновесии с хемосорбированным углеродным «газом», при этом $\theta_{eq} > \theta_{cg}$. Этот эффект имеет место для металлов, растворяющих в объеме углерод. Он объясняется доминирующей ролью периметра островков, через который и происходит обмен атомами между островками и углеродным «газом» [5].

Разработан и представлен новый метод низкотемпературной пассивации тонкопленочных структур вида SiO_x/Si [6], который дает возможность уменьшить плотность состояний, обусловленных дефектами, в запрещенной зоне в области границы раздела. Показано, что указанное уменьшение плотности состояний является следствием формирования не наблюдавшейся ранее кристаллической фазы оксида кремния и, в свою очередь, приводит к уменьшению токов утечек в приборах. Метод может быть легко интегрирован в традиционные кремниевые технологии и использован для улучшения работы приборов на основе структур SiO_x/Si в полупроводниковой электронике, фотонике и медицине.

Предложен новый критерий оценки точности расчета абберационных искажений траекторий ионов в краевых магнитных полях статических масс-анализаторов [7]. Это позволяет разрабатывать новые конструкции малогабаритных масс-спектрометров с повышенной в 10 раз чувствительностью для атомной промышленности и медицины.

Литература

1. *Zinoviev A.N., Babenko, P.Y., Meluzova D.S., Shergin A.P.* Contribution of molecular orbital promotion to inelastic energy losses in ion-solid collisions // 2020, Nucl. Instr. and Meth. Sect. B v.467 p.140-145.
2. *Babenko P.Y.; Mironov M.I.; Mikhailov V.S., Zinoviev A.N.* Evaluation of Be fluxes into the ITER tokamak plasma due to sputtering of the first wall by D and T atoms leaving the plasma// 2020, Plasma Phys. Control. Fusion, v.62, 4 #045020.
3. *Микушкин В.М., Крюков А.С.* Электронно-стимулированное восстановление поверхности оксида графита // 2016, Письма ЖТФ, т.42, 7 1-9.
4. *Дунаевский С.М., Лобанова Р.Ю., Михайленко Е.К., Пронин И.И.* Электронная структура графена на карбиде кремния, интеркалированного атомами кремния и кобальта // 2021, ФТТ, т.6 706-711
5. *Рутьков Е.В., Афанасьева Е.Ю., Галль Н.Р.* Различия в равновесной и критической степени покрытия при фазовом переходе в слое углерода на металле при образовании графена // Письма в ЖЭТФ, 2020, том 111, с. 513 – 516
6. *Kuzmin M. et al.* Decreasing Interface Defect Densities via Silicon Oxide Passivation at Temperatures Below 450°C // ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020. v.12 (41), p.46933-46941.
7. *Саченко В.Д., Антонов А.С.* Критерий корректности расчета траекторий ионов в краевых магнитных полях статических секторных масс-анализаторов // Масс-спектрометрия, 2020. т.17, №3, с.197-201.

Новые термоэлектрические материалы и устройства

А.Т. Бурков, М.В. Ведерников, Ю.В. Иванов, П.П. Константинов
Д.А. Пшеная-Северин, В.К. Зайцев, М.И. Федоров

Лаборатория физики термоэлементов ФТИ была организована А.Ф. Иоффе и является ведущим научным центром в области исследования термоэлектрических материалов и разработки термоэлектрических устройств. В лаборатории в 1991 году был впервые экспериментально реализован термоэлемент с пассивной сверхпроводящей ветвью для охлаждения ниже температуры жидкого азота [1], рис. 27. Попытки реализации такого охладителя были предприняты несколькими группами вскоре после открытия ВТСП материалов, однако не были успешны.

В течение длительного времени проводилось систематическое изучение термоэлектрических свойств силицидов. Одним из важных результатов этих исследований явилась разработка термоэлектрических сплавов $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$, состоящих из недефицитных и экологичных элементов, и обладающих высокой термоэлектрической эффективностью [2]. Сплавы имеют рекордно низкую для

термоэлектрических материалов плотность, всего в 2,5 раза выше плотности воды, и самую высокую удельную термоэлектрическую эффективность, что важно, например, при создании источников энергии для космических применений. Эти работы инициировали интенсивные исследования сплавов $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$ в ведущих мировых термоэлектрических группах. При создании сплавов был впервые применен метод инжиниринга зонной структуры – целенаправленного изменения параметров зонной структуры путем легирования и сплавления, который сейчас широко используется для повышения термоэлектрической эффективности материалов.

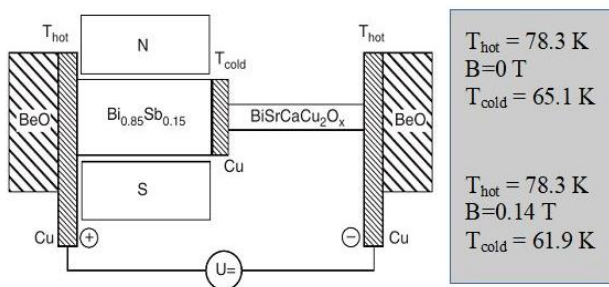


Рис. 27. Термоэлемент с активной ветвью из сплава $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, находящейся в магнитном поле, и с пассивной ветвью из керамики $YSrCaCu_2O_x$. Термоэлемент обеспечил рекордное понижение температуры на 16 К ниже температуры жидкого азота

Многие эффективные термоэлектрические материалы относятся к классу топологических материалов, таких как топологические изоляторы и полуметаллы Вейля. Наиболее известны в этом ряду соединения Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3 и их сплавы, которые одновременно являются самыми эффективными в настоящее время термоэлектрическими материалами. Поверхностные состояния в этих слоистых соединениях имеют линейный закон дисперсии и топологически защищены от рассеяния назад на немагнитных примесях. Существуют также материалы с топологически-нетривиальной объемной электронной структурой. В 2017-2020 гг. в лаборатории физики термоэлементов ФТИ был выполнен цикл работ по исследованию электронной структуры и термоэлектрических свойств моносилцида кобальта $CoSi$, и показано, что это соединение является топологически-нетривиальным полуметаллом [3]. В точках Γ и R зоны Бриллюэна этого соединения имеются точки Дирака, в окрестности которых дисперсия зон линейна, а топологические заряды этих узлов имеют аномально большие значения ± 4 , соответственно. В то время как квазичастицы в полуметаллах Вейля описываются тем же уравнением, что и ультррелятивистские частицы в квантовой теории поля, квазичастицы в полуметаллическом силициде кобальта не имеют аналогов в релятивистской теории. Нетривиальные топологические состояния в объеме $CoSi$

приводят к появлению необычных поверхностных состояний, называемых дугами Ферми (рис. 28).

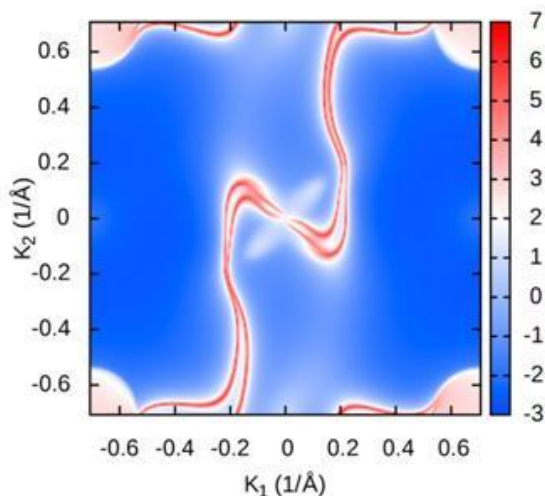


Рис. 28. Распределение плотности поверхностных состояний на уровне Ферми (дуги Ферми) в поверхностной зоне Бриллюэна CoSi

Литература

1. *Kusnetsov V.L., Vedernikov M.V.* Thermocouple with a Passive High Temperature Superconductor Leg. In: *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. Ed. D.M. Rowe, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
2. *Zaitsev V.K., Fedorov M.I., Gurieva E.A., Eremin I.S., Konstantinov P.P., Samunin A.Yu., and Vedernikov M.V.* Highly effective $\text{Mg}_2\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ thermoelectrics // *Phys. Rev. B* 74, 045207 (2006).
3. *Pshenay-Severin D.A., Ivanov Y.V., Burkov A.A., Burkov A.T.* Band structure and unconventional electronic topology of CoSi. // *J. Phys.: Condens. Matter.*, 30, 135501 (2018).

Исследование свойств карбида кремния и разработка прототипов приборов на его основе

А.А. Лебедев, М.Е. Левинштейн, Е.В. Калинина, С.П. Лебедев

В лаборатории Физики полупроводниковых приборов было проведено широкое исследование оптических и электрических свойств полупроводниковых прототипов карбида кремния (SiC). Полученные результаты были использованы для разработки технологии роста эпитаксиальных слоев SiC заданными параметрами. Это позволило создать экспериментальные образцы целого ряда полупроводниковых приборов (в том числе – СВЧ диапазона) на основе карбида кремния. Проведенные исследования показали, что разработанные SiC приборы по предельным рабочим температурам, удельным коммутируемым мощностям и радиационной стойкости соответствуют ранее сделанным теоретическим оценкам. Таким образом, была экспериментально доказана возможность работы полупроводниковых приборов при температурах более 800°C (рис. 29) и уровнях излучения в среднем на два порядка больших, чем предельные значения для Si-приборов с теми же рабочими параметрами. В настоящее время результаты данной работы внедряются на ЗАО «Светлана электронприбор» (Санкт-Петербург). Полученные во ФТИ им. А.Ф. Иоффе результаты во многом стимулировали существующий сейчас в мире интерес к карбиду кремния.

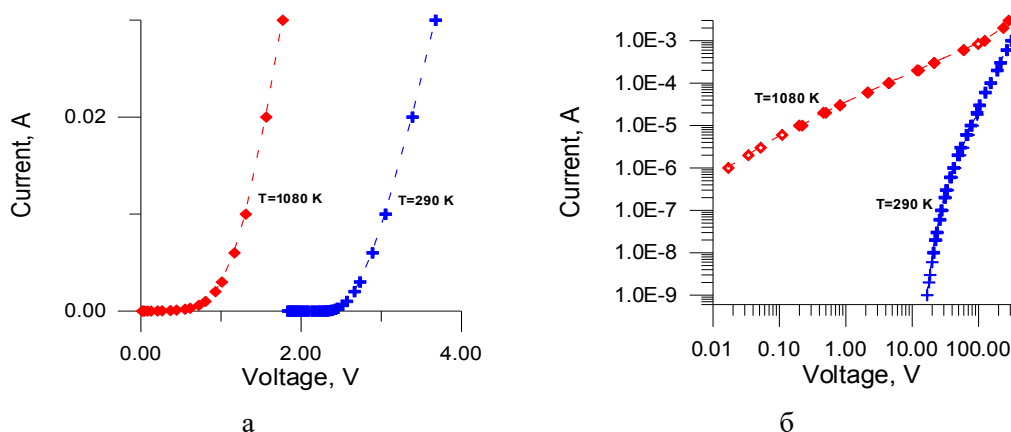


Рис 29. Прямые (а) и обратные (б) вольтамперные характеристики SiC PN структур при комнатной температуре и при 800°C

Также был выполнен цикл пионерских работ по исследованию природы явления политипизма кристаллов на примере карбида кремния. Была разработана качественная модель, описывающая процесс трансформации политипа в процессе эпитаксии. В ходе работы была разработана уникальная технология роста эпитаксиальных пленок кубического карбида кремния на основе подложек гексагонального SiC.

Впервые были получены гетеродиоды n-6H-SiC/p-3C-SiC и p-6H-SiC/n-3C-SiC, двойные гетероструктуры p-6H-SiC/n-3C-SiC/n-6H-SiC, исследованы их электрофизические свойства, построена энергетическая диаграмма и объяснены наблюдавшиеся квантово-размерные эффекты. Фактически был создан новый тип гетеропереходов – между двумя различными кристаллическими модификациями (политипами) одного полупроводникового материала.

В последние годы в лаборатории была разработана технология формирования графена термодеструкцией поверхности SiC, исследованы свойства и изготовлены сверхчувствительные газовые и биосенсоры на их основе. Полученные приборы имеют большие перспективы для использования в медицине для диагностики различных болезней на ранней стадии их возникновения (рис. 30, 31).

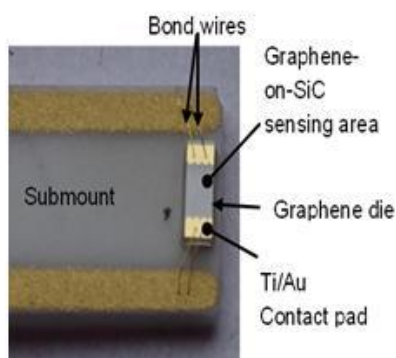


Рис 30. Внешний вид разработанного биосенсора на основе графена

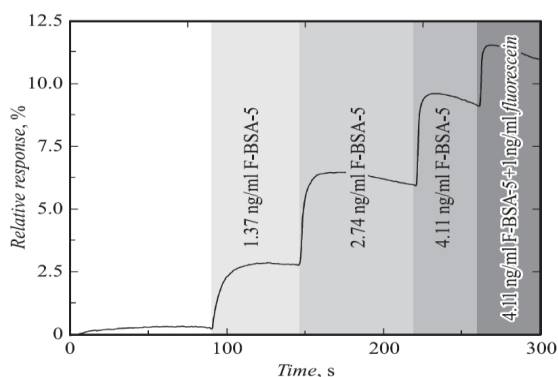


Рис 31. Отклик биосенсора на контакт с растворами конъюгата бычьего сывороточного альбумина (F-BSA-5)

Литература

1. Лебедев А.А. Центры с глубокими уровнями в карбиде кремния // ФТП. Т. 33. № 2 (1999). С. 129-155.
2. Лебедев А.А., Стрельчук А.М., Давыдов Д.В., Савкина Н.С., Кузнецов А.Н., Сорокин Л.М. // Электрические характеристики гетероперехода of (p)3C-SiC-(n)6H-SiC // ПЖТФ, 28 N 18, (2002) 89.
3. Lebedev A.A., Hetrojunctions and superlattices based on silicon carbide. // Semiconductor Science Technology, 21 (2006) R.
4. Лебедев А.А., Лебедев С.П., Левицкий В.С., Новиков С.Н., Давыдов В.Ю., Смирнов А.Н., Литвин Д.П., Макаров Ю.Н. Сверхчувствительный газовый сенсор на основе графена // ЖТФ. Т. 86. № 3 (2016). С. 135-139.
5. Lebedev A.A., Davydov S.Yu., Eliseyev I.A., Roenkov A.D., Avdeev O., Lebedev S.P., Makarov Yu., Puzyk M., Klotchenko S., Usikov A.S, Graphene on SiC substrate: Theoretical Background, Preparation and Characterization // Materials. 2021, 14, 590.

Разработка интеллектуальных наноструктурированных кристаллических материалов с эффектом памяти формы для создания нового поколения мехатронных и робототехнических систем

В.И. Николаев, С.А. Пульнев, А.И. Прядко

В Институте (лаборатория физики профилированных кристаллов) проводится работа по росту и исследованию монокристаллов сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ). Целью исследования является создание функциональных материалов с большими обратимыми деформациями, возвращаемыми при обратном мартенситном превращении. Данные кристаллы способны совершать при восстановлении деформации памяти формы полезную работу, развивая при этом большие значения силы (рис. 32). По отношению сила/масса (в диапазоне мини) выполненные на их основе силовые двигатели превосходят все традиционные (электрические) и иные конструкции силовых моторов. Для данного типа двигателей на ЭПФ нами опробованы два типа монокристаллов с ЭПФ сплав Cu-Al-Ni и сплав Ni-Fe-Ga-Co. Технология роста которых по способу Степанова развивается в нашей лаборатории. К настоящему моменту проделана большая работа по исследованию способов управления свойствами выращиваемых кристаллов на стадии ростовых процессов и пост-ростовых обработок, включая предварительную деформацию (задание деформации памяти формы). Показана возможность высокоскоростного восстановления памяти формы в кристаллах при их нагревании через интервал структурных превращений. При определенных условиях данный процесс имеет взрывоподобный характер, образец на подставке самопроизвольно подскакивает на высоту несколько метров, оценки начальной скорости показывают, что начальная скорость достигает 20-30 м/с. Разработка принципов работы робототехнических систем на основе взрывного ЭПФ носит абсолютно инновационный характер и имеет хорошие перспективы. В настоящий момент достигнуто управляемое движение объекта по заданной баллистической траектории с помощью ЭПФ в монокристалле.

Интенсивно ведутся исследования в области управления деформацией кристалла при циклической работе двигателей. Впервые нами продемонстрирована возможность управления силовыми двигателями в режимах их позиционирования и задании момента силы.

Разработан оригинальный термомеханический управляемый вращательный двигатель с двумя силовыми элементами, из монокристаллов сплава Cu-Al-Ni с эффектом памяти формы. Исследованы аспекты управления непрерывной циклической работой этого двигателя в режимах полной и неполной деформации памяти формы. Управление силовыми элементами достигается согласованием скоростей их нагрева и охлаждения (показаны на рисунке снизу). Полученные

результаты свидетельствуют о возможности эффективного управления двигателем в циклическом режиме.

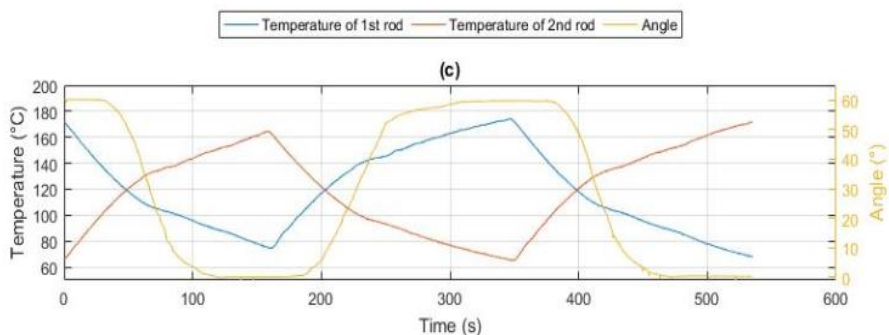


Рис. 32. Структурная схема и макетный образец управляемого циклического двигателя (вверху), зависимость температур силовых элементов и угла поворота вала двигателя от времени (внизу)

Исследования по разработке действующих макетов робототехнических устройств ведутся совместно с Федеральным государственным автономным научным учреждением «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК) и СПбПУ Петра Великого.

Литература

1. *Nikolaev V.I., Stepanov S.I., Yakushev P.N., Krymov V.M., Kustov S.B.* Burst-like shape recovery and caloric effects in Ni-Fe-Ga-Co single crystalline shape memory alloys // 2020, *Intermetallics*, v.119 ArtNo: #106709.

2. Priadko A., Pulnev S., Kovalev O., Ilin I. Algorithm for positioning of rotary actuators based on shape memory Cu-Al-Ni tensile force elements //2020, Mater. Phys. Mech., v.46, 1,: 50-56.
3. Малыгин Г.А., Николаев В.И., Пульнев С.А. Влияние наночастиц HfO₂ на форму и параметры кривых псевдоупругой деформации монокристаллов сплава Cu-Al-Ni // 2019, ЖТФ, т.89, 1, 132-136.

Стабильные гидрозолы алмазных наночастиц для применения в технике и медицине

А.Я. Вуль, А.Т. Дидейкин, А.Е. Алексенский, к.ф.-м.н. А.Е. Швидченко

Разработана лабораторная технология получения стабильных гидрозолой алмазных наночастиц со средним размером 4-5 нм с положительным и отрицательным электрокинетическими потенциалами и метод модификации поверхности наночастиц ионами металлов. Предложена модель, объясняющая прочность агломератов промышленных детонационных алмазов, синтезируемых из углерода взрывчатых веществ (рис. 33, 34).

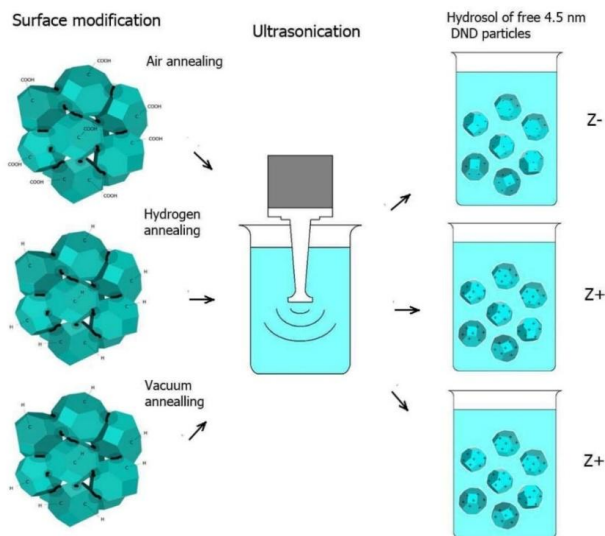


Рис. 33. Способ получения гидрозолой наноалмазов путем sp^3-sp^2 регибридизация электронных оболочек

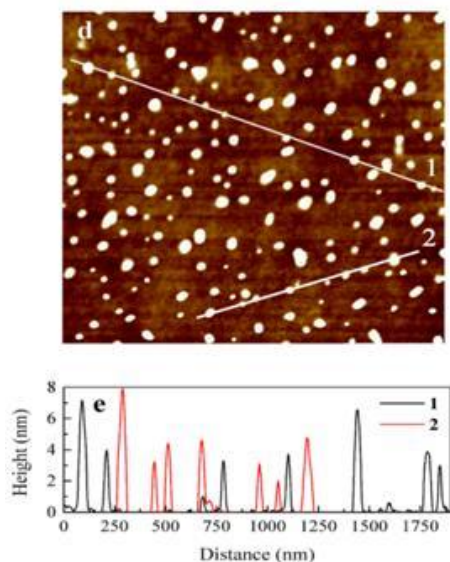


Рис. 34. Атомно-силовая изображение нанометровых частиц алмаза на поверхности кремния

Экспериментально подтверждена применимость разработанной технологии для получения стабильных гидрозолей с указанными параметрами при использовании промышленных детонационных наноалмазов различных производителей (Россия, Белоруссия, Китай, Япония). Технология имеет мировой приоритет. Экспериментально показано, что ион гадолиния (GdIII), химически связанный с поверхностью алмазной наночастицы, уменьшает время спин-решеточной и спин-спиновой релаксации протонов воды, приводящее к резкому увеличению сигнала ядерного магнитного резонанса при использовании комплекса наноалмаз-(GdIII). Полученные результаты позволяют говорить о синтезированном комплексе как новом контрастном агенте для ядерной магнитной томографии.

Литература

1. *Aleksenskii A.E., Eydelman E.D., Vul A.Ya.* Deagglomeration of detonation nanodiamonds // *Nanoscience Nanotechnology Lett.*, 3, 68-74 (2011).
2. *Dideikin A.T., Aleksenskii A.E., Baidakova M.V. et al.* Rehybridization of carbon on facets of detonation diamond nanocrystals and forming hydrosols of individual particles // *Carbon*, 737-745 (2017).
3. *Vul A.Y., Eidelman E.D., Aleksenskiy A.E., Shvidchenko A.V., Dideikin A.T. et al.* Transition sol-gel in nanodiamond hydrosols // *Carbon* 114, 242-249 (2017).
4. *Panich A.M., Salti M., Prager O., Swissa E., Kulvelis Yu.V., Yudina E.B., Aleksenskii A.E., Goren S.D., Vul. A.Y., Shames A.I.* PVP-coated Gd-grafted nanodiamonds as a novel and potentially safer contrast agent for in vivo MRI // *Magnetic Resonance in Medicine*, 86, 1-8 (2021).

Обнаружение жидкости Латтинжера в системах нанопроволок из полупроводников

Ю.А. Кумзеров, Ю.А. Фирсов, А.В. Фокин, Ю.В. Иванов, О.Н. Урюпин

Еще в 50-х годах прошлого столетия было показано, что модель Ферми-жидкости, широко используемая при описании физических свойств металлов и полупроводников, теряет применимость в одномерном случае. В дальнейшем была разработана модель жидкости Латтинжера, которая описывала универсальное низкочастотное поведение любой одномерной системы взаимодействующих фермионов и предсказывала существенное изменение свойств таких объектов по сравнению со свойствами обычных трехмерных материалов. В частности, в таких системах отсутствуют обычные возбуждения (электроны и дырки), а появляются независимые коллективные возбуждения спина и заряда (так называемое спин-зарядовое разделение), которые при определенных условиях приводят к степенным зависимостям проводимости как функции температуры и напряжения.

Для экспериментальной реализации одномерного объекта, описываемого моделью жидкости Латтинжера, было предложено использовать природный минерал – хризотилловый асбест, который представляет собой набор параллельных одинаковых нанотрубок (образцы, показанные на верхней части рис. 35а содержат до 10^{10} таких нанотрубок), диаметры каналов которых могут достигать до единиц нанометров (это видно в электронном микроскопе на срезах пучков нанотрубок на нижней части рис. 35а). Под высоким давлением, достигающим до нескольких тыс. атмосфер, в такие наноканалы удается ввести расплавы ряда металлов и полупроводников и, таким образом, получить системы одинаковых параллельных нанопроволок с рекордно малыми диаметрами [1]. В случае заполнения наноканалов легкоплавкими металлами (такими как ртуть, галлий, индий, олово, свинец) получаются уникальные системы сверхпроводящих нанопроволок, демонстрирующих существенное отличие сверхпроводящих параметров от свойств обычных массивных металлов. В частности, было обнаружено увеличение критического магнитного поля в ртутных нитях в 500 раз, значительное увеличение плотности критического тока, а также существенный рост критической температуры. При исследовании изменения свойств таких нанопроволок в зависимости от их диаметров (при уменьшении диаметров от 20 нм до 2 нм) удалось впервые экспериментально изучить процесс появления и последовательного развития специфических одномерных эффектов при приближении к одномерному пределу [2]. В случае же заполнения наноканалов полупроводниками (были введены расплавы InSb и Te, отдельная нанопроволока InSb с диаметром 4 нм показана на снимке с электронного микроскопа) был реализован этот одномерный предел, т.е. получена квантовая одномерная система, соответствующая модели жидкости Латтинжера и демонстрирующая предсказанные

степенные зависимости (рис. 35б). В настоящее время—это единственный физический объект, который демонстрирует такие зависимости в столь широком температурном диапазоне (от комнатной до гелиевой температур) при изменении электропроводности в масштабах, достигающих до 6 порядков (т.е. в миллион раз) [3]. В этих же объектах был обнаружен новый вид магнетосопротивления, связанный с влиянием магнитного поля на спиновую систему [4] и необычное поведение термоэлектрических свойств жидкости Латтинжера [5].

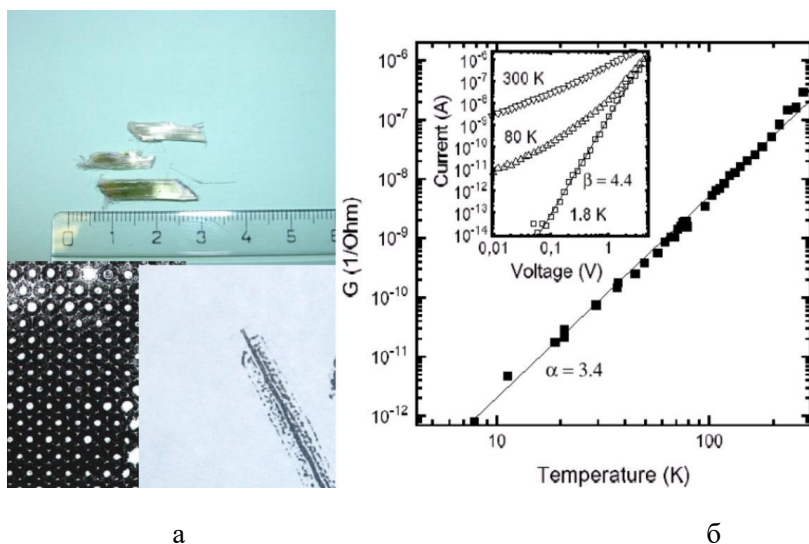


Рис. 35. Образцы нанотрубок (а, сверху) и срез пучков нанотрубок (а, внизу); квантовая одномерная система, соответствующая модели жидкости Латтинжера и демонстрирующая предсказанные степенные зависимости (б)

Коэффициент Зеебека идеальной однородной жидкости Латтинжера равен нулю, а отличная от нуля термоэдс должна наблюдаться в неоднородной жидкости Латтинжера, содержащей потенциальные барьеры (примеси, сужения, микротрещины). На рис. 36 показана экспериментальная температурная зависимость коэффициента Зеебека пучка нанопроволок InSb диаметром около 5 нм [6]. На том же графике представлена аппроксимирующая эти данные теоретическая кривая. Термоэдс одномерного проводника, содержащего сильный потенциальный барьер, рассчитана в рамках модели Латтинжера. В расчете использован туннельный гамильтониан, учитывающий зависимость вероятности прохождения электрона через барьер от его волнового числа. Учет этой зависимости приводит к радикальному изменению величины и температурной зависимости термоэдс жидкости Латтинжера.

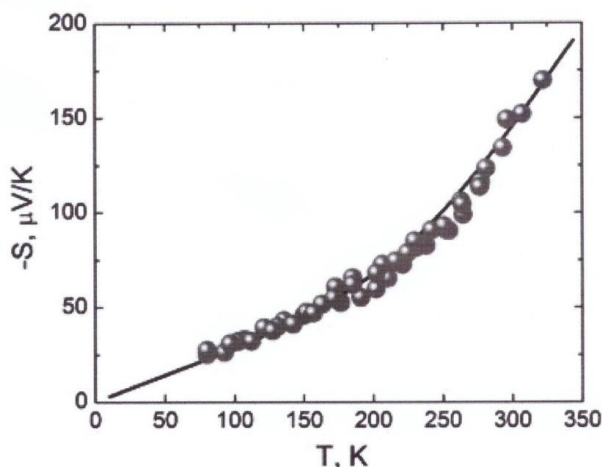


Рис. 36. Экспериментальная температурная зависимость коэффициента Зеебека пучка нанопроволок InSb диаметром около 5 нм

В работе принимали участие д.ф.-м.н. С. В. Зайцев-Зотов и Prof. P. Monceau.

Литература

1. Kumzerov Y., Vakrushev S., Nanostructures within porous materials, In «Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology» // (H.S.Nalwa Ed.), 2004, American Scientific Publishers, vol.VII, pp.811-849.
2. Кумзеров Ю.А., Набережнов А.А., Влияние ограниченной геометрии на сверхпроводящие свойства легкоплавких металлов // Физика низких температур, 2016. Т.42, №11, с.1311-1327.
3. Zaitsev-Zotov S.V., Kumzerov Yu.A., Firsov Yu. A., Monceau P., Luttinger-liquid-like transport in long InSb nanowires // J.Phys.: Condens.Matter, 2000, v.12,N20, p.L303-L309.
4. Zaitsev-Zotov S.V., Kumzerov Yu.A., Firsov Yu. A., Monceau P., Unconventional magnetoresistance in long InSb nanowires // JETP Letters, v.77, N3, (2003), pp.135-139.
5. Urypin O.N., Vedernikov M.V., Shabaldin A.A., Ivanov Y.V., Kumzerov Y.A., Fokin A.V., Thermoelectric properties of InSb nanowires over a wide temperature range // Journ. of Electronic Materials, 2009, v.38, N7, pp.990-993.
6. Иванов Ю.В., Урюпин О.Н., Термоздс латтинжеровской жидкости // ФТП, 2019, т.53, 5 с. 648-653.

Спектроскопия спиновых шумов

Е.Б. Александров, В.С. Запаский

Разработан радикально новый подход к спектроскопии, в первую очередь – к спектроскопии магнитного резонанса. В основе всех видов классической спектроскопии лежит наблюдение переходов между энергетическими состояниями, между которыми существует исходная разность населённостей. В оптической области частот условие наличия разности населённостей выполняется автоматически, поскольку энергия оптических квантов обычно на порядки превышает энергию теплового возбуждения. В радиочастотной области спектра ситуация решительно меняется: близкие по энергии уровни энергии при тепловом равновесии заселены почти одинаково, так что требуемая разность населённостей должна быть создана искусственно. Кроме того, поскольку вероятность спонтанного испускания пропорциональна кубу частоты перехода, наблюдение спонтанного излучения в радиочастотной области спектра неэффективно даже при наличии исходной разности населённости; поэтому радиоспектроскопия требует использования внешнего резонансного электромагнитного поля для возбуждения вынужденных переходов. Разность населённостей в радиочастотном диапазоне первоначально достигалась с помощью техники молекулярных пучков (метод Раби), позже – за счёт применения низких температур и сверхсильных магнитных полей, и, наконец, посредством методов оптической накачки, т.е. избирательного взаимодействия резонансного света с энергетическими состояниями.

Авторами цикла работ был предложен радикальный пересмотр исходного принципа радиоспектроскопии посредством отказа от его ключевого пункта – индуцирования внешним электромагнитным полем вынужденных переходов между уровнями энергетической структуры; идея нового подхода состояла в наблюдении за естественными флуктуациями намагниченности парамагнитной среды, не подверженной никакому возмущающему воздействию [1, 2]. При этом автоматически отпадает требование создания начальной разности населённости – исследуемый объект не нужно готовить (замораживать, поляризовать, помещать в сильное поле). Сама исследовательская аппаратура резко упрощается и унифицируется: если традиционный радио-спектрограф был жестко привязан к определённой частоте резонанса, поскольку содержал в своей конструкции микроволновой тракт с высокодобротным резонатором в сочетании с перестраиваемым источником постоянного сверхсильного магнитного поля, то для нового метода требуется только лазер непрерывного действия, согласованный по частоте со спектром пропускания исследуемого образца. Прошедший через образец свет анализируется поляриметром [2], выходной сигнал которого подвергается спектральному анализу в

радиочастотном диапазоне, для чего сегодня используются современные методы Фурье-анализа.

Основы спектроскопии спиновых шумов (как впоследствии стал называться предложенный авторами метод) были заложены работой [2]. Для измерений был развит метод лазерной поляриметрии с предельно достижимой чувствительностью - и был впервые зарегистрирован магнитный резонанс в шумах фарадеевского вращения. Отношение сигнала к шуму при этом составляло 100:1.

К началу 80-х годов работами по прямой регистрации магнитного резонанса в спектре шумов фарадеевского вращения [2, 3], по лазерной поляриметрии предельной чувствительности [4] и по спектроскопии флуктуаций интенсивности [5] был заложен экспериментальный и идеологический фундамент нового направления физических исследований. Новый подход представлял большой академический интерес, в частности – как великолепная иллюстрация флуктуационно-диссипативной теоремы (рис. 37).

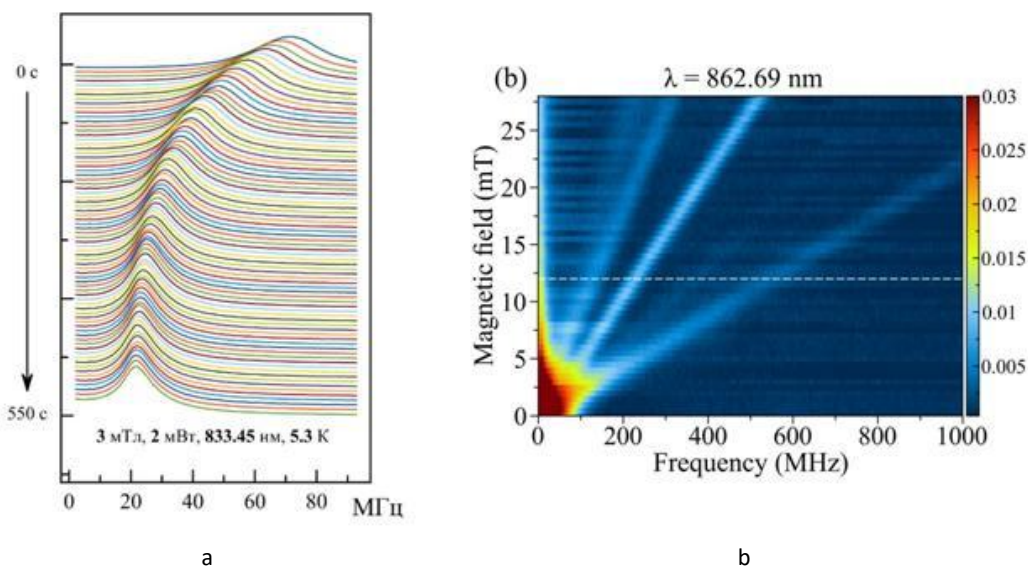


Рис. 37. Регистрация спиновой релаксации оптически ориентированной ядерной подсистемы в кристалле n-GaAs посредством наблюдения динамики спектра электронных спиновых шумов [10] (а); впервые зарегистрированный спектр ЭПР в примесном диэлектрическом кристалле: полевая зависимость ЭПР спектра спиновых шумов иона Nd^{3+} в кристалле CaF_2 [11] (б)

Период широкого практического применения нового метода стартовал после демонстрации применимости оптической техники спиновых шумов к полупроводниковым системам. После этого спектроскопия спиновых шумов продемонстрировала взрывной рост популярности, обнаружила ряд совершенно новых возможностей и уникальных свойств [5-11]. Новое научное направление

существенно обогатило арсенал методов спектроскопии магнитного резонанса, важнейшие приложения которой тесно связаны с современными технологиями полупроводниковых наноструктур. Благодаря невозмущающему характеру измерительной процедуры, высокой абсолютной чувствительности и чувствительности к корреляционным характеристикам спинового движения, предложенный метод нашел широкое применение для решения задач современной спинтроники, нацеленной на использование спиновых степеней свободы в устройствах оптической обработки и хранения информатики.

На основе спектроскопии спиновых шумов развит новый метод трехмерной томографии, предложен и реализован способ прямой регистрации процесса ядерной спиновой релаксации в полупроводниках, разработан метод оптической спектроскопии высокого разрешения. В настоящее время работы по лазерной спектроскопии спиновых шумов ведутся во многих странах мира (в Германии, Франции, США, Японии и др.) с общим признанием приоритета нашей науки; достижения спектроскопии спиновых шумов последних лет свидетельствуют о важности этого научного направления в современной экспериментальной физике.

Литература

1. Александров Е.Б., Козлов В.П., Кулясов В.Н., Спектр шумов спонтанного излучения // ЖЭТФ, том 66, №4, 1974.
2. Александров Е.Б. и Запасский В.С., Магнитный резонанс в спектре шумов фарадеевского вращения // ЖЭТФ, том 81, вып. 1(7), с. 132–138, 1981.
3. Александров Е.Б. и Запасский В.С., Магнитный резонанс в шумах интенсивности рассеянного света // УФН, том 153, вып. 2, с. 363–364, 1987.
4. Запасский В.С., Методы высокочувствительных поляриметрических измерений // ЖПС, том 37, вып. 2, 184-196, 1982.
5. Александров Е.Б., Голубев Ю.М., Ломакин А.В., Носкин В.А., Спектроскопия флуктуаций интенсивности оптических полей с негауссовой статистикой // УФН, 140, с. 547–582, 1983.
6. Zapasskii V.S. and Kozlov G.G., Correlation analysis of spectral fluctuations in inhomogeneously broadened spectra // Optics Express, v. 8, no. 9, 509-516 (2001).
7. Zapasskii V.S., Greilich A., Crooker S.A., et al Optical spectroscopy of spin noise, Physical Review Letters, 110, 176601, 2013.
8. Zapasskii V.S., Spin-noise spectroscopy: From proof of principle to applications // Advances in Optics and Photonics, vol. 5, 131-168, 2013.
9. Александров Е.Б. и Запасский В.С., О фотонах и спинах // СПб, изд-во С.-Петербургского Университета, 2009. 254 с.

10. Ryzhov I.I., Kozlov G.G., Smirnov D.S., Glazov M.M., Efimov Yu.P., Eliseev S.A., Lovtcius V.A., Petrov V.V., Kavokin K.V., Kavokin A.V., and Zapasskii V.S., Spin noise explores local magnetic fields in a semiconductor // Scientific Reports, 6:21062, 2016.
11. Kamenskii A.N., Greilich A., Ryzhov I.I., Kozlov G.G., Bayer M., and Zapasskii V.S., Giant spin noise gain enables magnetic resonance spectroscopy of impurity crystals // Physical Review Research, 2, 023317 (2020).

Исследования оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах

В.В. Павлов, Р.В. Писарев

За последние три десятилетия исследования оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах были связаны с такими фундаментальными разделами физики, как оптика магнитоэлектриков и мультиферроиков, нелинейная оптика магнитных диэлектриков и полупроводников, магнитооптика низкоразмерных магнитных структур, сверхбыстрый оптомагнетизм. Различными методами изучался широкий класс материалов – объемные ферро-, ферри- и антиферромагнетики, сегнетоупорядоченные кристаллы, тонкоплёночные структуры и наноструктуры. Полученные результаты в области нелинейной оптики и сверхбыстрого магнетизма получили широкое признание как в нашей стране, так и за рубежом.

К наиболее значимым результатам, безусловно, относится обнаружение и исследование ряда новых линейных и нелинейных магнитооптических явлений – гиротропное двупреломление света, индуцированная внешним магнитным полем или магнитным порядком генерация оптических гармоник, оптическое возбуждение антиферромагнитного резонанса и когерентных фононных мод. Успешно развивается перспективное научное направление – сверхбыстрая фемтосекундная нелинейная оптическая спектроскопия. Получены пионерские результаты мирового уровня, опубликованные в журнале Nature [1]. В качестве примера на рис. 38 показано фарадеевское вращение в ортоферрите диспрозия DyFeO_3 , измеренное фемтосекундным оптическим методом накачки и зондирования.

Широкое признание как у российской, так и мировой научной общественности получили работы в области магнитоэлектрической и нелинейной оптической спектроскопии антиферромагнетиков, в частности, по определению ряда специфических механизмов оптических нелинейностей, связанных с электронной и спиновой структурами магнитоупорядоченных кристаллов [2].

В последнее время развиваются такие научные направления как диэлектрическая спектроскопия магнитоупорядоченных соединений и нелинейная спектроскопия спиновых состояний в полупроводниках [3] и магнитных

диэлектриках [4]. С использованием современных оптических методов проводятся исследования фотоиндуцированных и нелинейных магнитооптических явлений [5].

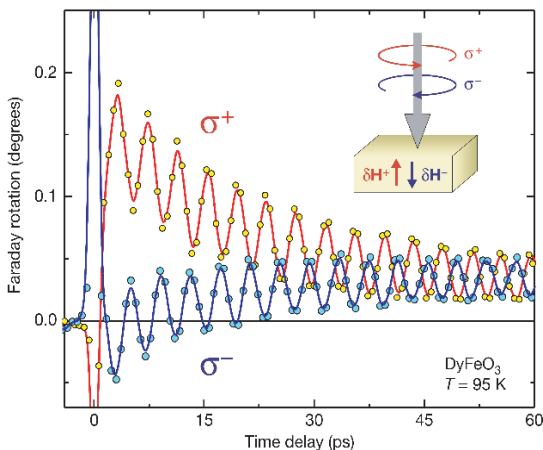


Рис. 38. Сверхбыстрое нетепловое возбуждение антиферромагнитного резонанса в DyFeO_3 , вызванное фемтосекундными лазерными импульсами с правой (σ^+) и левой (σ^-) круговой поляризацией [1]

Литература

1. Kimel A.V., Kirilyuk A., Usachev P.A., Pisarev R.V., Balbashov A.M., Rasing Th., Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses // Nature 435, 655-657 (2005).
2. Fiebig M., Pavlov V.V., Pisarev R.V., Second-harmonic generation as a tool for studying electronic and magnetic structures of crystals: review // J. Opt. Soc. Am. B 22, 96-118 (2005).
3. Yakovlev D.R., Pavlov V.V., Rodina A.V., Pisarev R.V., Mund J., Warkentin W., Bayer M. Exciton spectroscopy of semiconductors by the method of optical harmonics generation (review) // Phys. Solid State 60, 1471-1486 (2018).
4. Mund J., Yakovlev D.R., Poddubny A.N., Dubrovин R.M., Bayer M., Pisarev R.V. Toroidal nonreciprocity of optical second harmonic generation // Phys. Rev. B 103, L180410 (2021).
5. Kats V.N., Nefedov S.G., Shelukhin L.A., Usachev P.A., Averyanov D.V., Karateev I.A., Parfenov O.E., Taldenkov A.N., Tokmachev A.M., Storchak V.G., Pavlov V.V. Giant quadratic magneto-optical Kerr effect in (Eu,Gd)O films for magnetic field sensing // Appl. Mater. Today 19, 100640 (2020).

Электрически управляемое дальнедействующее обменное взаимодействие в гибридных системах ферромагнетик/полупроводник

В.Л. Корнев, Ю.Г. Кусраев

Изучение спиновых взаимодействий представляет интерес, как для фундаментальной физики, так и для приложений. Интеграция магнетизма в полупроводниковую электронику позволит создать весь компьютер на одном чипе. Одним из путей решения этой задачи является создание гибридной системы ферромагнетик-полупроводник (ФМ/ПП). В такой системе может быть реализовано управление поляризацией спинов в полупроводнике за счет влияния ферромагнетика и, наоборот, управление намагниченностью ферромагнетика за счет влияния полупроводника. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведутся активные исследования в этом направлении, в частности, рассматриваются вопросы о величине взаимодействия между элементами гибридной системы и расстоянии, на котором оно реализуется. Объединенная спиновая система ФМ/ПП является гибкой, поскольку можно контролировать магнитную анизотропию оптически и электрически.

Были созданы гибридные структуры ФМ-ПП с резкими интерфейсами. В гетероструктуре Со/барьер CdMgTe/квантовая яма CdTe/CdMgTe обнаружено новое дальнедействующее обменное взаимодействие. Решен фундаментальный вопрос о том, как далеко и за счет какого механизма передается спин-спиновое взаимодействие от ферромагнетика к полупроводнику. Результаты исследований показывают, что дырки на акцепторах в КЯ (рис. 39а) поляризуются вследствие эффективного $p-d$ обмена с атомами кобальта (рис. 39b). Удивительным оказалось то, что этот эффект – дальнедействующий, в отличие от короткодействующего, не связанный с перекрытием волновых функций носителей заряда в КЯ и магнитных атомов ФМ (рис. 39с). Было предположено, что дальнедействующее обменное взаимодействие обусловлено воздействием эллиптически поляризованных фононов (рис. 39d) на спиновые уровни акцептора в КЯ.

Продемонстрирован электрический контроль обменной связи в структуре, состоящей из ферромагнитного слоя Со и полупроводниковой квантовой ямы CdTe, разделенной тонким (Cd, Mg)Te-барьером. Электрическое поле поперек плоскости структуры изменяет величину обменного взаимодействия ферромагнетика и дырок на акцепторах в полупроводниковой квантовой яме. Взаимодействие определяется изгибом зон в яме и максимально в случае плоских зон. Эффект не связан со сдвигом центра тяжести волновых функций, поэтому не может быть объяснен обычной моделью обменного взаимодействия. Он объясняется в рамках механизма эффективного дальнедействующего обмена, осуществляемого через эллиптически

поляризованные фононы. Данный результат открывает принципиальную возможность интеграции электрически управляемого магнетизма в полупроводниковую электронику, практически без тепловыделения.

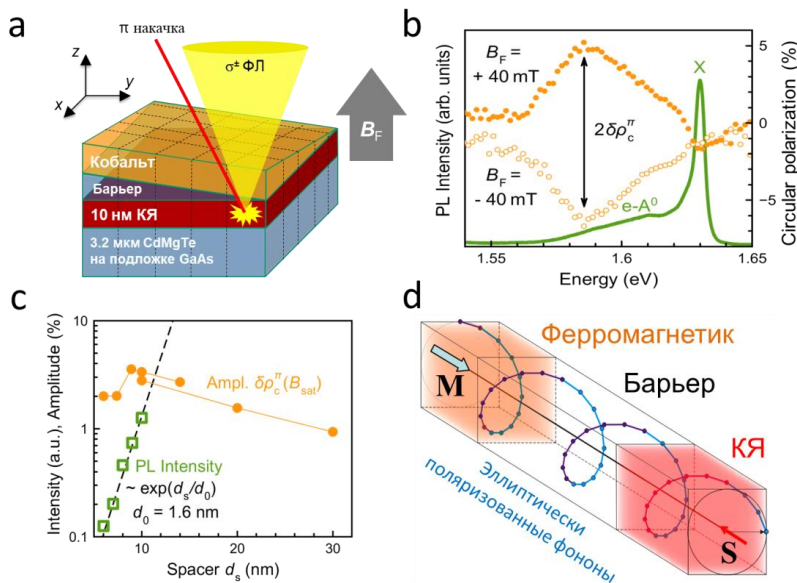


Рис. 39. Результаты исследования спин-спинового взаимодействия от ферромагнетика к полупроводнику

Литература

1. Akimov I.A., Salewski M., Kalitukha I.V., Poltavtsev S., Debus J., Kudlacik D., Sapega V. F., Kopteva N. E., Kirstein E., Zhukov E. A., Yakovlev D. R., Karczewski G., Wiater M., Wojtowicz T., Korenev V.L., Kusrayev Yu.G., Bayer M., et al. Direct measurement of the long-range p-d exchange coupling in a ferromagnet-semiconductor Co/CdMgTe/CdTe quantum well hybrid structure // *Physical Review B* 96, 184412 (2017).
2. Kalitukha I.V., Salewski M., Akimov I.A., Korenev V.L., Sapega V.F., Yakovlev D.R., Karczewski G., Wiater M., Wojtowicz T., Korenev V.L., Kusrayev Yu. G., Bayer M., et al. Interfacial ferromagnetism in a Co/CdTe ferromagnet/semiconductor quantum well hybrid structure // *Physics of the Solid State* 60, 8, 1578–1581 (2018).
3. Korenev V.L., Kalitukha I.V., Akimov I.A., Sapega V.F., Zhukov E.A., Kirstein E., Ken O.S., Kudlacik D., Karczewski G., Wiater M., Wojtowicz T., Ilyinskaya N.D., Lebedeva N.M., Komissarova T.A., Kusrayev Yu.G., Yakovlev D.R., and Bayer M. Low voltage control of exchange coupling in a ferromagnet-semiconductor quantum well hybrid structure // *Nature Communications*, 10, 2899 (2019).

Открытие спин-гальванического эффекта и изучение спиновых и долинных фототоков

Е.Л. Ивченко, С.А. Тарасенко, В.В. Бельков, С.Д. Ганичев

Сформировано и разработано новое направление в физике полупроводников – оптическая генерация чисто спиновых и долинных токов в отсутствие электрического напряжения. Предложены и реализованы фотогальванические методы регистрации неравновесной спиновой поляризации носителей заряда и чисто долинных токов.

Теоретически и экспериментально установлено, что релаксация или прецессия электронного спина в полупроводниковых системах со спин-орбитальным расщеплением энергетического спектра приводит к возникновению электрического тока. Эффект генерации высокочастотного тока, обусловленного прецессией спина в магнитном поле, является аналогом дрожащего движения релятивистского электрона (нем. Zitterbewegung). Квантово-механическое дрожание отдельных электронов в полупроводниках можно сделать когерентным, если синхронизовать спиновую динамику электронов, например, методами оптической ориентации во внешнем магнитном поле. Когерентное дрожание ансамбля электронов сохраняется до тех пор, пока спиновая когерентность не разрушается процессами релаксации.

Предсказаны и исследованы новые оптические эффекты: генерация спиновых фототоков в полупроводниковых наноструктурах и долинных фототоков в многодолинных системах (углеродные нанотрубки, кремний, графен). Показана возможность создания квантово-механического распределения носителей заряда, при котором электроны с противоположной спиновой ориентацией (рис. 40а) или в различных долинах (рис. 40б) двигаются в различные стороны, а суммарный электрический ток отсутствует.

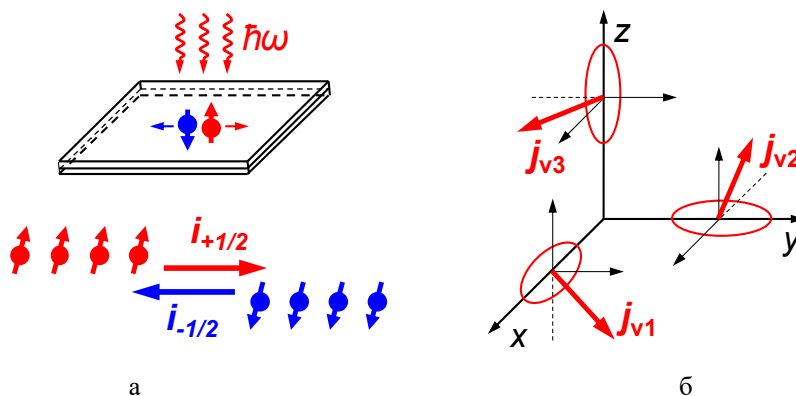


Рис. 40. Квантово-механическое распределение носителей заряда в полупроводниках

Направления электронных потоков в долинах и ориентация переносимого спина определяются симметрией точки экстремума долины и оператора спин-орбитального взаимодействия, а также поляризацией света. Приложение внешнего магнитного поля приводит к разбалансу спиновой подсистемы и, как следствие, к возникновению макроскопического тока. Разбаланс чисто долинных токов в кремниевых структурах возникает при отклонении направления распространения циркулярно поляризованного света от кристаллографической оси, расположенной симметрично относительно всех долин.

Литература

1. *Ивченко Е.Л., Лянда-Геллер Ю.Б., Пикус Г.Е.*, Ток термализованных носителей, ориентированных по спине // ЖЭТФ 98, 989 (1990).
2. *Ganichev S.D., Ivchenko E.L., Bel'kov V.V., Tarasenko S.A. et al.*, Spin-galvanic effect // Nature 417, 153-156 (2002).
3. *Тарасенко С.А., Ивченко Е.Л.*, Фототоки чистых спинов в низкоразмерных структурах // Письма в ЖЭТФ 81, 292 (2005).
4. *Ganichev S.D., Bel'kov V.V., Tarasenko S.A., Danilov S.N. et al.*, Zero-bias spin separation // Nature Phys. 2, 609 (2006).
5. *Тарасенко С.А., Пошакинский А.В., Ивченко Е.Л. и др.*, Эффект дрожащего движения электронов с расщепленными по спину состояниями // Письма в ЖЭТФ 108, 348 (2018).

Широкозонные III-N наногетероструктуры: от эпитаксии до систем освещения

*А.В. Аладов¹, А.Л. Закгейм¹, В.В. Лундин², М.Н. Мизеров¹, А.В. Сахаров²,
В.М. Устинов¹, А.Ф. Цацульников¹, А.Е. Черняков¹*

¹ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук (НТЦ микроэлектроники РАН)

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Настоящая статья посвящена основным научным достижениям НТЦ микроэлектроники РАН за последние 30 лет в связи с соответствующим юбилеем воссоздания Российской академии наук (Указ Президента РСФСР № 228 от 21 ноября 1991 г.). По случайному совпадению, лишь на несколько месяцев раньше, по инициативе акад. Ж.И. Алферова и под его научным руководством был основан НТЦ микроэлектроники РАН (в то время с приставкой «при ФТИ им. А.Ф. Иоффе», Постановление Президиума АН СССР № 75 от 19 марта 1991 г.). Таким образом, настоящая статья является одновременно кратким итогом деятельности института за все время существования.

Целью создания НТЦ микроэлектроники РАН было построение «моста» между фундаментальными исследованиями, ведущимися в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области микро- и оптоэлектронных приборов на основе АЗВ5 гетероструктур, и прикладными разработками, способствующими продвижению новых научных результатов в промышленность. Несмотря на крупнейшие политические и экономические изменения, последовавшие в ближайшие годы, направление деятельности НТЦ микроэлектроники РАН от фундаментальных исследований к прикладным в области физики и технологии элементной базы электроники на основе наногетероструктур сохранилось.

Среди наиболее крупных научно-технических достижений НТЦ микроэлектроники РАН, достигнутых в результате многолетней работы, можно выделить разработку технологии широкозонных материалов на основе соединений нитрида галлия (AlInGaN), начиная от разработки уникального эпитаксиального оборудования для газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС), технологий выращивания гетероструктур для транзисторов и светоизлучающих приборов до создания принципиально новых источников света на основе высокоэффективных AlInGaN светодиодов. Новое поколение полупроводниковых источников света отличается не только высоким энергосбережением (в 3–5 раз меньше потребление, чем у лучших газоразрядных ламп), но и принципиально новое качество – возможность динамического управления спектрально-цветовыми характеристиками в процессе работы. Это качество,

получившее название «умный или интеллектуальный» свет (*smart light*), расширяет функциональные возможности специальных осветительных приборов для медицины, агротехники, музеев и др., но главное, открывает перспективы создания варьируемого эргономичного общего освещения, благоприятного для жизнедеятельности и здоровья человека [1].

Изготовление полупроводниковых приборов на основе гетероструктур начинается с этапа их эпитаксиального выращивания. Для России характерно мелко- и среднесерийное производство (несколько тысяч эпитаксиальных пластин в год), которое, например, существует в вертикально-интегрированных компаниях, работающих в области производства СВЧ транзисторов. Однако, консолидация крупных мировых производителей полупроводниковых приборов на основе нитрида галлия, в первую очередь синих светодиодов, привела к тому, что на рынке продаются установки ГФЭ МОС с очень высокой производительностью, которая избыточна для России. Таким образом, стала актуальной задача разработки установки ГФЭ МОС с ограниченным размером реактора, которая позволяла бы в сжатые сроки и с небольшими затратами проводить этап НИОКР и легко разрабатывать и внедрять технологии в производство. На рис. 1 представлена разработанная в НТЦ микроэлектроники РАН установка МОС-гидридной эпитаксии Dragon-125, предназначенная для НИОКР и мелкосерийного производства [2].

С использованием разработанного оборудования в НТЦ микроэлектроники РАН были развиты технологии эпитаксиального роста гетероструктур для СВЧ и силовых транзисторов, потребителями которых являются все ведущие предприятия России (АО «НПП "Исток" им. А.И. Шокина», АО «НПП "Салют"», АО «НПФ "Микран"», АО «Светлана-Электронприбор», АО «ОКБ-Планета» и др.), а также для светоизлучающих приборов, наиболее важными среди которых являются интеллектуальные полупроводниковые источники света.



Рис. 1. Установка ГФЭ МОС для опытного производства III-N гетероструктур

Задача создания таких приборов является комплексной и многопрофильной. Помимо представленных выше ростовых технологий, важное значение имеют постростовые технологии изготовления высокоэффективных светодиодов видимого спектрального диапазона, разработка оптических блоков формирования световых потоков, электронных блоков питания и управления, программного обеспечения регулирования спектрально-цветовыми характеристиками генерируемого освещения. Все перечисленные выше задачи решались в НТЦ микроэлектроники РАН с последующим промышленным освоением в ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника (Санкт-Петербург).

Результаты исследований в сжатом виде заключаются в следующем.

1) Теоретически и экспериментально исследованы процессы ГФЭ МОС выращивания AlInGaN наногетероструктур различного типа: квантовые ямы (КЯ), нити, точки и короткопериодные сверхрешетки (КПСР) как основы для создания высокоэффективных полупроводниковых излучателей видимого спектрального диапазона. В качестве иллюстрации на рис. 2а представлены полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) изображения квантовых точек InGaN в GaN. На основе разработанных технологий были созданы сложные гетероструктуры с монокристаллической активной областью с КЯ, излучающими на двух длинах волн в синей и зеленой областях спектра, дающие при сложении белый свет (монокристаллический белый светодиод) [3].

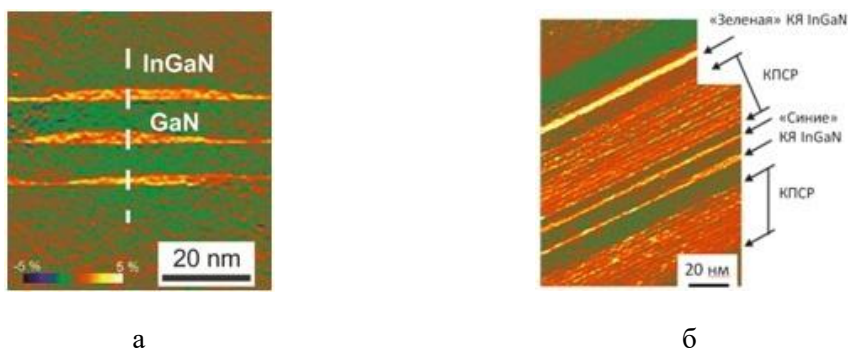


Рис. 2. Изображения в ПЭМ: (а)– квантовые точки InGaN в GaN, (б) – гетероструктура с двумя излучающими областями монокристаллического белого светодиода

2) На основе математического моделирования и экспериментальных исследований процессов генерации и распространения света, растекания тока и отвода тепла были предложены конструкции излучающих кристаллов, реализующих: (i) эффекты многопроходности, внутренней фокусировки и переизлучения света для достижения высокого внешнего квантового выхода, (ii) однородное растекание тока при минимальных джоулевых потерях для создания мощных излучателей большой

площади и (iii) эффективный теплоотвод для обеспечения больших рабочих токов. В совокупности, это позволило создать светодиоды, «флип-чип» конструкции с многоуровневой металлизацией (рис. 3), сочетающие высокую эффективность и мощность генерируемого излучения, что является критическим условием для светотехнических применений [4].

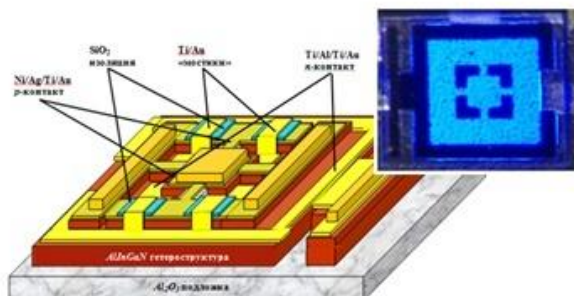


Рис. 3. Схематическое изображение мощного AlGaInN светодиода «флип-чип» конструкции и фотография ближнего поля свечения (на вставке)

3) С использованием разработанных высокоэффективных излучателей на различные длины волн, при их объединении в полихромные многокристальные матрицы по принципу RGB-смешения, были созданы интеллектуальные источники света (ИИС), имеющие широкие перспективы для целей специального и общего освещения. Общая структурная схема ИИС, включая электронные и оптические, блоки показана на рис. 4. Электронная часть содержит пульт дистанционного управления, задающий временной спектрально-цветовой и яркостной режим работы светильника (выбор из библиотеки или создание собственного), приемо-передающие модули дистанционного управления, процессор (микроконтроллер) задания токовых режимов и драйверы, обеспечивающие требуемые токи питания светодиодных модулей (R,G,B,W – красных, зеленых, синих и белых, соответственно) и собственно светодиодные модули. Оптическая часть содержит отражательные и фокусирующие элементы для собирания и смешивания излучения отдельных светодиодов и формирования конечной диаграммы направленности излучения источника [5].

В качестве примеров на рис. 5–8 показаны опытные образцы разработанных в НТЦ микроэлектроники РАН светодиодных динамически управляемых светильников различного назначения. Они включают систему освещения производственных помещений (рис. 5), пульт дистанционного управления которой, позволяет выбрать из имеющейся библиотеки временной режим изменения яркости и цветовой температуры освещения, в частности, имитировать естественный дневной свет с его более теплыми тонами утром и вечером и холодными тонами в середине дня. На

рис. 6 представлен светодиодный музейный осветитель с индивидуальной настройкой подсветки, позволяющей наилучшим образом выявить цветовую палитру картины. На рис. 7 показан светодиодный аппаратно-программный комплекс для коррекции психофизиологического состояния человека, а на рис. 8 светодиодный хирургический осветитель для контрастной визуализации биологических тканей.

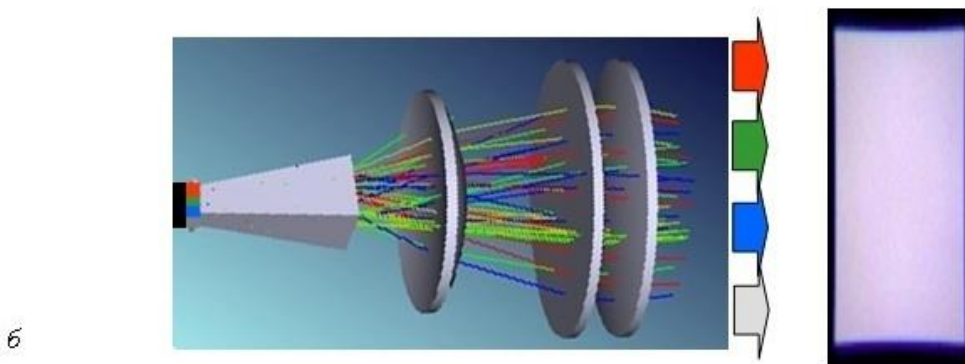
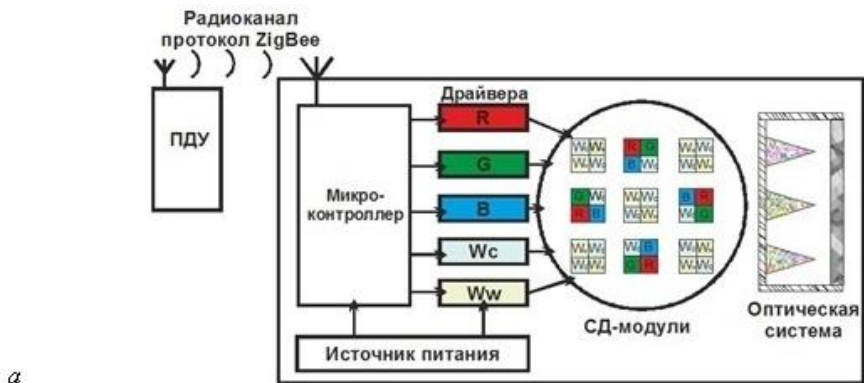


Рис. 4. Блок-схема (а) и оптическая схема (б) светодиодного ИИС



Рис. 5. Светодиодная интеллектуальная система освещения: (а) – отдельный ИИС, (б) – система из 30 ИИС под общим управлением, (в) – пульт дистанционного управления с библиотекой режимов работы



Рис. 6. Светодиодный управляемый осветитель для музейного освещения: (а) – фотография, (б)– сравнительный вид живописи при освещении лампой накаливания и ИИС с оптимально подобранным спектром

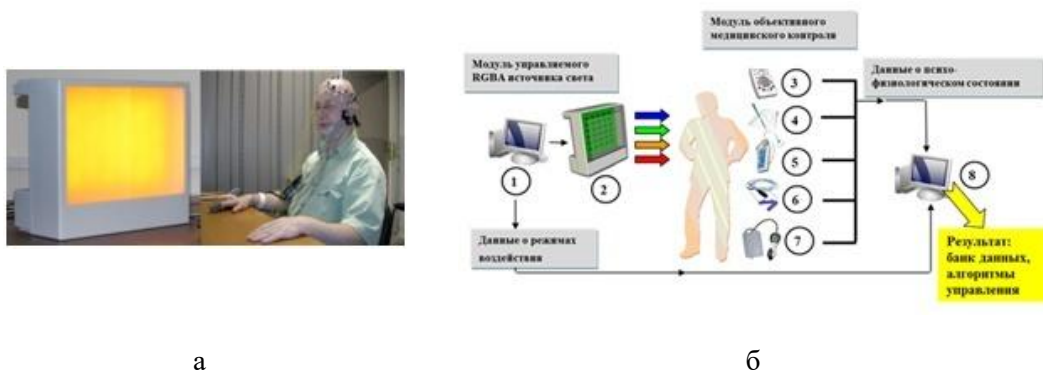


Рис. 7. Аппаратно-программный комплекс на базе ИИС для диагностики и коррекции психофизиологического состояния человека. (а) – человек-оператор в процессе исследований, (б) – функциональная схема комплекса, включающего световое воздействие и анализ физиологических параметров в ответ на воздействие



Рис. 8. Светодиодный хирургический осветитель для контрастной визуализации биологических тканей: (а)– общий вид, (б) – контрастная визуализация кровеносных сосудов на фоне мышечной ткани

Таким образом, в качестве основных результатов мирового уровня за последние 30 лет можно выделить:

- разработку оборудования для ГФЭ МОС для выращивания III-N гетероструктур;
- разработку технологии эпитаксиального роста III-N гетероструктур для СВЧ и силовых транзисторов и светоизлучающих приборов на основе квантовых ям и короткопериодных сверхрешеток с высоким внутреннем квантовым выходом излучения ($> 70\%$) в широком спектральном диапазоне (340-540 нм);
- разработку светодиодов оригинальной «флип-чип» конструкции с многоуровневой металлизацией, в которых реализованы высокие значения КПД ($>50\%$) и выходной оптической мощности (единицы ватт);
- разработку серии опытных образцов светодиодных интеллектуальных источников света с высокими мощностными и спектрально-цветовыми характеристиками для широкой сферы применения: общее освещение, музейное освещение, медицина, агротехника и др.

Литература

1. *Закгейм А.Л.* Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья человека // Светотехника. 2012. № 6. С. 12-18.
2. *Лундин В.В.* и др. Реакторы для МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия: настоящее и будущее // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 1. С. 5-9.
3. *Устинов В.М.* и др. Монолитные белые светодиоды: подходы, технология, дизайн // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2012. № 6. С. 1-4.
4. *Закгейм Д.А.* и др. Мощные светодиодные кристаллы AlGaInN с двухуровневой металлизацией // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 9. С. 1287-1293.
5. *Аладов А.В.* и др. Полихромные спектрально-перестраиваемые осветительные приборы со светодиодами: опыт разработки и применения // Светотехника. 2013. № 5-6. С. 34-40.

Основные достижения СПбФ ИЗМИРАН с 1991 по 2021 год

А.Д. Перечёсова, Б.А. Копытенко

Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн организован в 1946 г., после переезда Института под Москву (г. Троицк, Москва). Научно-исследовательский институт земного магнетизма (НИИЗМ) был образован 11 октября 1939 г. в Ленинграде, однако история Института начинается с создания магнитной обсерватории в Санкт-Петербурге в 1830 г.

В настоящее время (2021 г.) в состав СПбФ ИЗМИРАН входят следующие научные подразделения: Отдел геомагнитных исследований, включает Лабораторию наземных геомагнитных исследований (Группа магнитных свойств, магнитная станция «Красное Озеро», геофизическая станция «Лехта»), Сектор магнитной картографии, Сектор информационных геомагнитных технологий; Лаборатория магнитосферных возмущений; Лаборатория морских геомагнитных исследований, Магнито-ионосферная обсерватория «Воейково».

Ниже отражены основные достижения СПбФ ИЗМИРАН за последние тридцать лет с 1991 г., за эти годы было опубликовано более 1000 научных работ.

Фундаментальные и прикладные исследования в области магнитного поля Земли и солнечно-земной физики: разработка аналитических и картографических моделей пространственно-временного распределения геомагнитного поля; исследование широкого класса геомагнитных аномалий, их физической природы и связей со строением и процессами, протекающими в земной коре и мантии как на континентах, так и на океанах, а также магнитных аномалий техногенного происхождения; изучение вариаций магнитного поля Земли и их связи с процессами, протекающими в околоземном пространстве (ионосфере, магнитосфере); изучение особенностей протекания геомагнитных вариаций в сейсмоактивных районах с целью разработки методов прогноза землетрясений по магнитным возмущениям; разработка методов и средств измерения векторного геомагнитного поля в стационарных условиях и на движущихся носителях, включая ферромагнитные; исследования магнитосферных эффектов космических лучей, а также изучение воздействия вариаций космических лучей, солнечной активности и изменений геомагнитного поля на климат Земли.

Магнито-ионосферная обсерватория «Воейково»

В Магнито-ионосферной обсерватории (МИО) СПбФ ИЗМИРАН выполняются регулярные измерения компонент магнитного поля Земли, их временных вариаций и параметров ионосферы (с 1957 г.). В настоящее время ряд наблюдений магнитного склонения (с 1724 г.), компонент H , Z и полного поля T

(с 1878 г.) в Санкт-Петербурге и его окрестностях (включая Воейково) является практически непрерывным и наиболее длинным рядом наблюдений магнитного поля Земли в России (рис 1, б). Регулярные длительные наблюдения постоянного и переменного поля Земли и параметров ионосферы проводятся на МИО СПбФ ИЗМИРАН и магнитной станции «Красное озеро» (рис 1, а), в том числе по проекту «Интермагнет».

Разработана модель решения обратной задачи вертикального зондирования ионосферы применительно к данным, полученным на ионосферных станциях типа «АИС-М» и структура интеллектуальной информационной системы (ИИС) магнитных измерений (МИ). Использование модели ИИС МИ позволяет эффективно решать различные задачи.

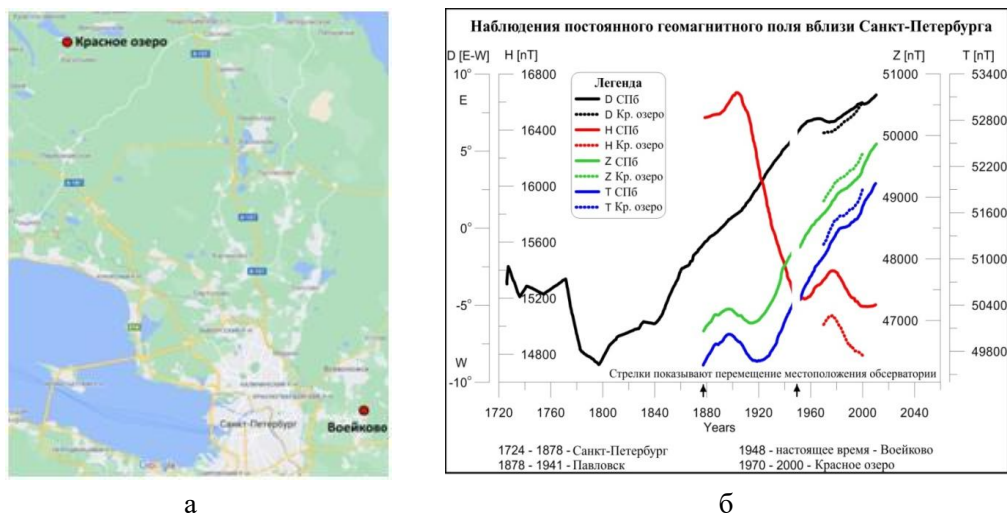


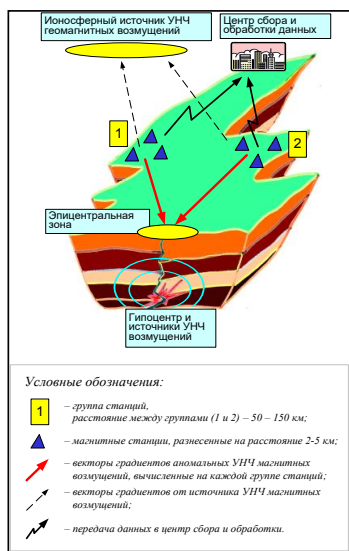
Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений СПбФ ИЗМИРАН (а) и вековые вариации магнитного поля Земли в окрестностях Санкт-Петербурга (б)

Лаборатория наземных геомагнитных исследований

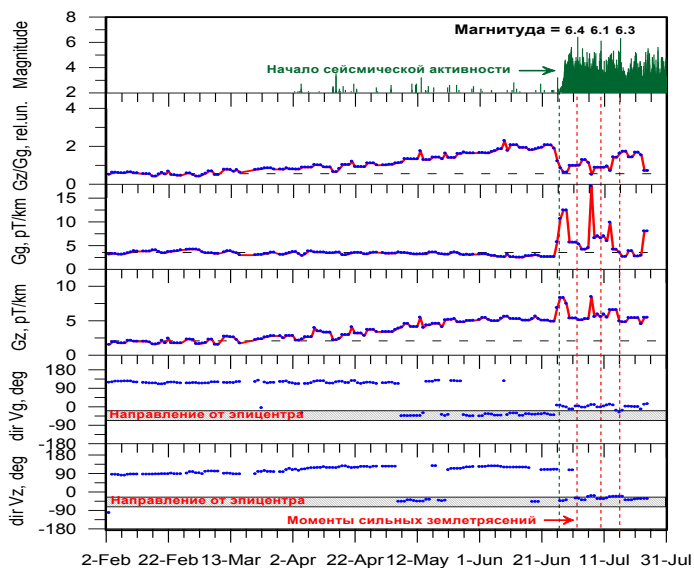
В СПбФ ИЗМИРАН разработаны новые типы торсионных высокочувствительных цифровых магнитометров (GI-MTS-1). Предложен оригинальный метод пассивной геофизической магнитной локации в ультранизкочастотном диапазоне 0,001-10 Гц для определения динамики ионосферных токовых систем и сторонних токовых систем в земной коре [1, 2, 3]. Метод в сочетании с высокоточными измерениями находит широкое применение при изучении физических процессов генерации короткопериодных геомагнитных колебаний, в практике прогноза распространения радиоволн и при выявлении локальных аномалий интенсивности, градиентов и фазовой скорости распространения ультранизкочастотных магнитных возмущений перед сильными землетрясениями, и для выполнения высокоточных геомагнитных съемок в труднодоступных районах

Земли. Разработаны оригинальные алгоритмы для местоположения и динамики ионосферных источников геомагнитных вариаций, а также местоположения локальных источников электромагнитных возмущений в континентальной и океанической земной коре, приуроченных к очагам готовящихся сильных землетрясений ($M > 5$) (рис. 2) [4].

В районе г. Медвежьегорск (Карелия) проводилось исследование геоэлектрических свойств земной коры с помощью магнито-теллурического зондирования и оригинального градиентно-фазового зондирования с учетом фазовых скоростей распространения УНЧ геомагнитных возмущений. Предварительно получено хорошее соответствие этих двух методов (эксперимент Шунгит-2012). По данным густой меридиональной цепочки трехкомпонентных магнитовариационных станций в Карелии (5 МВС на геомагнитных широтах $58,9^\circ - 61,6^\circ$) во время геомагнитной суббури определялось перемещение проекции плазмоспаузы вдоль земной поверхности в узком диапазоне L-оболочек (3.7 — 4.4) в магнитосфере Земли.



а



б

Рис. 2. Схема магнитной локализации эпицентра землетрясения (а) и Поведение величин градиентов (Gg, Gz), их отношений и направлений фазовых скоростей (V_g, V_z), азимута локального источника УНЧ геомагнитных возмущений в полосе частот $F = 0,1 - 0,3$ Гц до и во время сейсмоактивного периода. Япония, полуостров Изу, 2000 г (б)

Разработана методика составления карт распределения пространственных вариаций градиентов магнитного поля с целью определения местоположения намагниченных объектов на дне моря (п-ов Сахалин) (рис. 3а). Съемка выполнялась с подвижного носителя. Для проведения магнитометрических работ использовалась мобильная автоматизированная градиентная установка, составленная из двух

разнесенных высокочувствительных трехкомпонентных магнитовариационных станций [5, 6].

Магнитная локация суббури и геоэлектрических неоднородностей выявлены в ходе эксперимента BEAR (рис. 3б).

В ходе уникального для мировой практики эксперимента «FENICS» в 2014-2018 годах (рис. 4а) по глубинному частотному зондированию литосферы Фенноскандинавского щита с использованием двух взаимно ортогональных промышленных ЛЭП в частотном диапазоне 0,1–200 Гц. Впервые экспериментально обнаружен на территории Карело-Кольского региона промежуточный проводящий слой дилатантно-диффузионной природы («слой ДД») в поле естественных вариаций АМТ-диапазон и в докембрийской кристаллической земной коре на глубинах от 2-3 до 7-10 км [7].

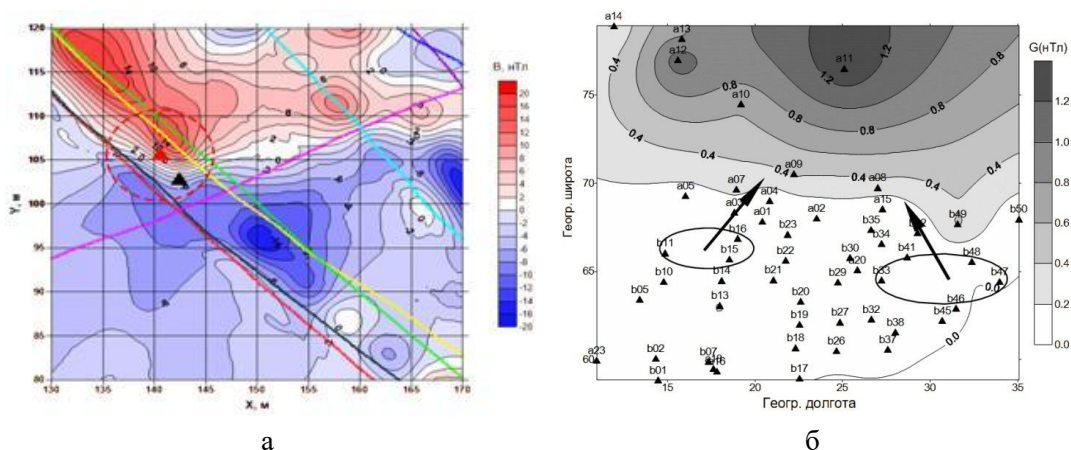


Рис. 3. Пространственное распределение X-компоненты градиента магнитного поля в районе известной мишени (красный треугольник). Черным треугольником показано положение мишени, выделенное по результатам дифференциальных измерений. Цветными линиями нанесены галсы подвижного носителя (а) и мгновенные изолинии и направления векторов градиентов полной горизонтальной компоненты для геомагнитных пульсаций Pc4 (T=40 сек.). 19.07.1998 г. (12.24 UT) - эксперимент BEAR (б)

Сигналы зарегистрированы на удалениях до 5600 км между передающими и приемными станциями – на Шпицбергене, в Харькове, на Камчатке и в других районах. Установлена высокая степень горизонтальной однородности (одномерности) электрического разреза литосферы Фенноскандинавского щита в интервале глубин 10 – 50 км (коэффициент анизотропии не выше 1,2). Исследованы параметры «нормального» глубинного электрического разреза литосферы Фенноскандинавского щита и выполнена его реологическая и геотермическая интерпретация. На западе Карелии и в Центральной Финляндии по результатам эксперимента «FENICS» установлена аномалия пониженного поперечного сопротивления литосферы,

конформная с областью погружения границы Мохоровичича до глубины 55–60 км [8, 9].

Результаты электромагнитных зондирований с естественными и контролируруемыми источниками позволили детально исследовать геоэлектрический разрез в районе Ен-Яхинской сверхглубокой скважины СГ-7. В разрезе верхней части коры устойчиво выделяются два слоя пониженного сопротивления: в интервале глубин 150-200 м и 500-1500 м. Основные перспективы дальнейших глубинных электромагнитных исследований газо-нефтяных структур на территории ЯНАО.

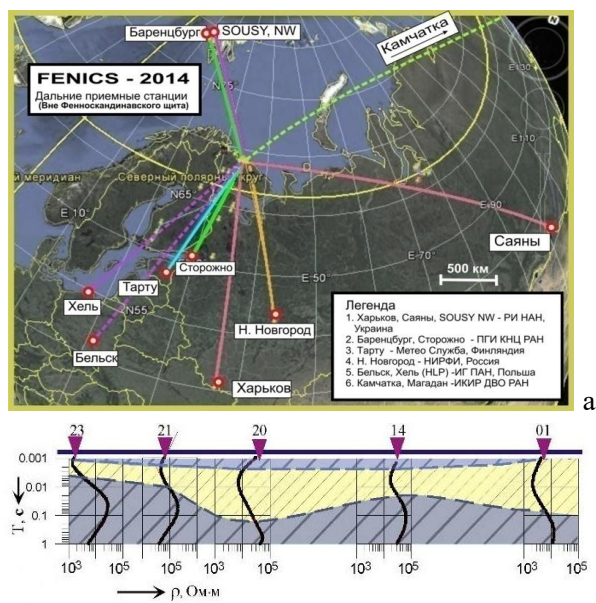


Рис. 4. Схема расположения дальних точек наблюдения в эксперименте «FENICS» (а) и кривые кажущегося сопротивления АМТЗ на профиле Ловозеро-Пулозеро. Желтой штриховкой показано положение «слоя ДД» (б)

Путем проведения высокоточных частотных зондирований и с контролируемыми источниками на территории Кольского полуострова и в Центральной Финляндии доказано существование неоднородного промежуточного проводящего ДД – «слоя» (рис. 4б). Его продольная проводимость находится в пределах от десятых долей до единиц сименсов. Считается, что существование свободных флюидов (метеорной воды) на глубине обусловлено дилатантно-диффузионными явлениями [10].

В результате расширяются возможности интерпретации дистанционного зондирования как ионосферы, так и Земли с использованием контролируемых наземных источников КНЧ диапазона, а также повышается их информативность.

Помимо изучения строения литосферы при помощи крайненизкочастотных волн экспериментальные исследования показали наличие вариаций амплитуды [11] и

поляризионных характеристик поля [12] в нижней части КНЧ диапазона и на более низких частотах в различных геофизических условиях при отсутствии вариаций в диапазоне СНЧ. Эти особенности поведения поля, подтверждены теоретическими расчетами, показывающими, что при низкой проводимости Земли влияние ионосферы в ближней зоне может быть заметным. Полученные результаты следует принимать во внимание в задачах глубинного зондирования земли и мониторинга состояния ионосферы с применением контролируемых источников, в особенности при работах на экстремально низких частотах в областях с низкой проводимостью Земли.

Установлено, что просачивание КНЧ-волн во внешнюю ионосферу днем возможно в высоких широтах благодаря наличию главного ионосферного провала, который не описывается имеющимися эмпирическими моделями среднеширотной ионосферы. Поэтому при высокоширотном расположении источника или трассы распространения осцилляции импеданса ионосферы и амплитуды поля с частотой могут возникать и в дневное время. Таким образом, более высокая чувствительность КНЧ-волн (по сравнению с СНЧ) к изменениям во внешней ионосфере открывает хорошие возможности использования этого диапазона в исследованиях околоземного пространства [13].

Выявлен и объяснен механизм воздействия variability солнечной активности и изменений геомагнитного поля на климат Земли; предложенный механизм корректен с энергетической точки зрения; построена модель воздействия солнечных космических лучей на аэрозольный и озоновый слои атмосферы; расчеты подтверждены экспериментом. Впервые проведен анализ воздействия вариаций солнечной активности на процессы в нижней атмосфере с учетом временной шкалы variability солнечной активности. Показано, что имеют место существенные физические различия в отклике нижней атмосферы на воздействие кратковременных (часы, дни) и долговременных (годы и более) вариаций солнечной активности. Полученный результат имеет принципиальное значение для понимания физического механизма воздействия солнечной активности на процессы в системе атмосфера-океан, а также для выявления вклада естественных факторов в современные климатические изменения [14].

Впервые проведен анализ воздействия вариаций солнечной активности на процессы в нижней атмосфере с учетом временной шкалы variability солнечной активности. Показано, что имеют место существенные физические различия в отклике нижней атмосферы на воздействия кратковременных и долговременных вариаций солнечной активности. Экспериментально показано, что климатический отклик на солнечное воздействие имеет региональную структуру, что связано с особенностями глобальной атмосферной циркуляции. Полученный результат имеет принципиальное значение для понимания физического механизма воздействия

солнечной активности на процессы в системе атмосфера-океан и вклада естественных факторов в современные климатические процессы [15].

С целью выяснения природы комбинированных воздействий солнечного и внутриатмосферных факторов на климатическую вариабельность были собраны данные о вариациях радиального прироста хвойных деревьев в северо-западном регионе России (Республика Коми). Климат региона благодаря близости к зоне полярных сияний подвергается как воздействию солнечной активности, так и воздействию Арктических и Северо-Атлантических климатических осцилляций [16].

Сектор магнитной картографии

Создан банк геомагнитных данных, включающий результаты измерений МПЗ по всему земному шару. Банк включает модули обработки, анализа, интерпретации геомагнитной информации; вычисления различных аналитических моделей МПЗ как для поверхности Земли, так и околоземного пространства; мониторинг карт различного масштаба всех элементов геомагнитного поля, новейшие мировые карты компонент магнитного поля Земли эпохи 2020 [17].

В результате интерпретации магнитных и гравитационных аномалий Европы впервые выделен глубинный маркирующий горизонт магнетитовой зоны древней коры в приполярной части Европы и найдены глубинные особенности геотермальных зон, позволяющие оценить перспективы вертикальной миграции флюидного потока и глубинной подпитки термальных вод стран Центральной Европы.

На основе компонентных измерений магнитного поля НИС «Заря», магнитных аномалий WDMAM 2007 и спутника (CHAMP) проведено исследование латеральных и вертикальных неоднородностей глубинного строения земной коры. По магнитометрическим данным подтверждено наличие реологически ослабленных зон в средней и верхней части земной коры и уточнен характер их распределения для интервала глубин 5-20 км. На примере известных нефтегазовых бассейнов Северного и Средиземного морей показана роль элементов флюидных систем в подпитке месторождений углеводородов [18, 19].

Разработана методика комплексной интерпретации данных магнитометрической, гравиметрической съемки, сейсмических зондирований, измерений теплового потока и геологического районирования для поиска крупных подземных резервуаров геотермальных вод. Для известных месторождений изучена роль элементов флюидных систем в подпитке углеводородных (УВ) и геотермальных месторождений. На рисунке 5 представлены результаты совмещенного геомагнитного и геоэлектрического разреза вкрест простирания глубинной флюидной системы Прибайкалья и отмечены известные месторождения. Оригинальный региональный прогноз позволяет выделять перспективные участки для постановки детальных электроразведочных работ.

Разработана методика и технология вычисления цифровых магнитных карт векторных составляющих геомагнитного поля с использованием данных модульной магнитной съемки и вычислены карты на полигонах территории России и по акваториям омывающих морей, с целью их дальнейшего использования для решения прикладных задач.

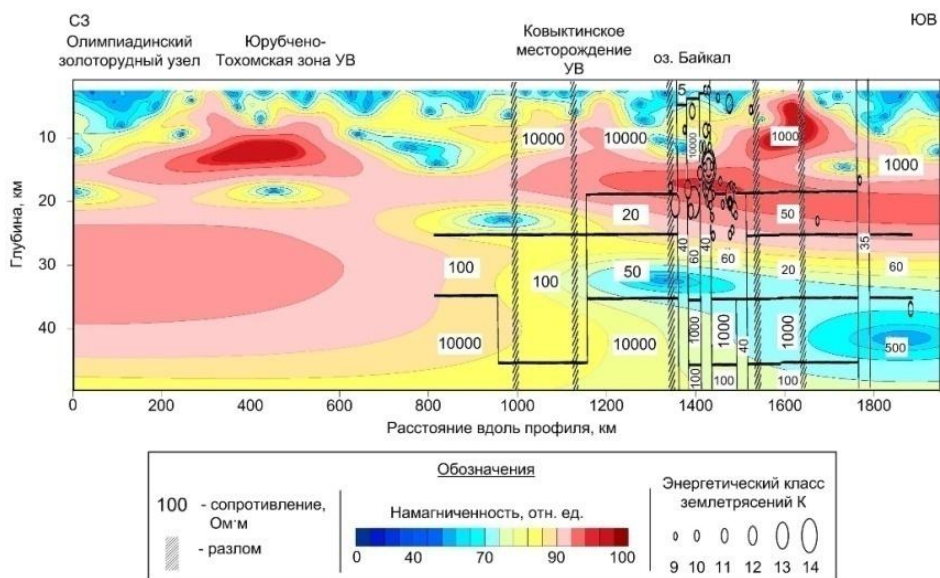


Рис. 5. Совмещенный геомагнитный и геоэлектрический разрез по профилю в Прибайкалье по данным М.Н. Бердичевского (1999). Энергетический класс землетрясений и положение разломных зон по А.Ю. Кисину (2009)

Группа магнитных свойств

Совместное рассмотрение палеомагнитных и археологических данных для образцов отложений палеолитической стоянки Костёнки 16 (Углянка) позволило обоснованно выявить экскурс Гётебург и, в соответствии с магнитостратиграфической шкалой, определить возраст в пределах 13 000-12 350 лет ВР [20, 21].

На территории Русской равнины проведены палеомагнитные исследования образцов отложений археологических стоянок Костёнки 14, Подол III/I, Баранова Гора. Выделены экскурсы Каргаполово (40 000 лет назад), Моно (24 000 лет назад) и Геттенбург (12 500 лет назад). По материалам отложений построены траектории виртуального магнитного полюса (ВМП) (рис 6).

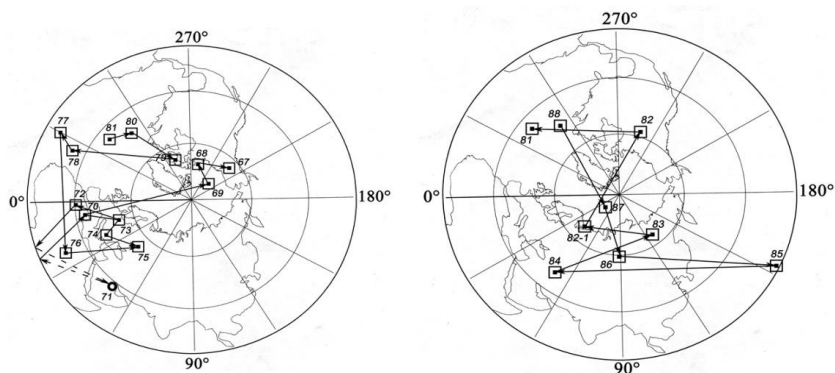


Рис. 6. Траектория движения (ВГП) в зоне экскурса Каргаполово (цифры – номера образцов), 1 этап – вверху, 2 этап – внизу

Лаборатория магнитосферных возмущений

Определены магнитосферные вариации космических лучей на основе расчетов геомагнитных порогов для современных моделей.

Обнаружены два противоположных типа долготных распределений фотосферного магнитного поля (National Solar Observatory, Kitt Peak 1976 – 2003 гг.) для двух периодов 11-летнего солнечного цикла: подъема-максимума и спада-минимума. Концентрация магнитных полей наблюдается на активных долготах, разнесенных на 180° , а именно, на кэррингтоновских долготах 180° для подъема-максимума и $0^\circ/360^\circ$ для спада-минимума. Объединение данных за весь период 1976 – 2003 гг. (со сдвигом распределения спад-минимум на 180°) дает исключительно гладкое распределение с максимумом около 180° . Аналогичная картина получена для солнечных пятен за 1917 – 2003 гг. Подтверждено предположение, что смена активных долгот на Солнце тесно связана с перестройкой локальных и глобальных магнитных полей в ходе 22-летнего магнитного цикла Солнца.

Гелиоширотное распределение фотосферных магнитных полей по поверхности Солнца было рассмотрено на основе синоптических карт обсерватории Китт Пик (1976-2003 гг.) раздельно для следующих групп полей: 0 – 5 Гс, 5 – 20 Гс, 20 – 100 Гс и $B > 100$ Гс. Была получена одна синоптическая карта за весь исследуемый период, которая отражает особенности расположения на диске Солнца различных проявлений солнечной активности.

Получены вариации Н-компоненты во время гигантской магнитной бури 29 августа — 5 сентября 1859 года в Риме. Показано, что кривые Н-компоненты в Санкт-Петербурге и в Риме почти повторяют друг друга; амплитуда возмущения в Риме определена как $H = 2\,800$ нТл [22].

Продолжены исследования жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в магнитных полях эмпирических моделей магнитосферы в возмущенные периоды. Показано, что в периоды сильных возмущений геомагнитные пороги,

полученные для модели Ts01 более чувствительны к изменениям параметров ММП, чем для модели Ts04 [23, 24].

Лаборатория морских геомагнитных исследований

В результате фундаментальных исследований на НИС «Заря» (1950-1992 гг.) впервые выявлены магнитные аномалии и особенности их распределения на акватории Мирового океана; получены первые сведения о вековой вариации элементов геомагнитного поля на океанах. Вышел из печати «Атлас магнитных карт Балтийского моря», который содержит аналоговые и цифровые карты пяти элементов магнитного поля Земли (МПЗ) — D, I, F, Y, Z — в масштабе 1:5 000 000, а также сведения о нормальных полях МПЗ, вековых вариациях, геологическом строении дна Балтийского моря. Работа выполнена в рамках Международного проекта с участием Института геодезии и картографии Республики Польша. Основой для создания «Атласа» послужили уникальные компонентные магнитные съемки, выполненные НИС «Заря» (СПбФ ИЗМИРАН) в период 1970—1990 гг. [25].

Разработана оригинальная методика и выделены аномалии, приуроченные к минимуму в спектре геомагнитного поля (крупные региональные магнитные аномалии), обоснована физическая природа этих аномалий и показано, что их источники связаны с глубинными частями литосферы и верхней мантии Земли [26, 27].

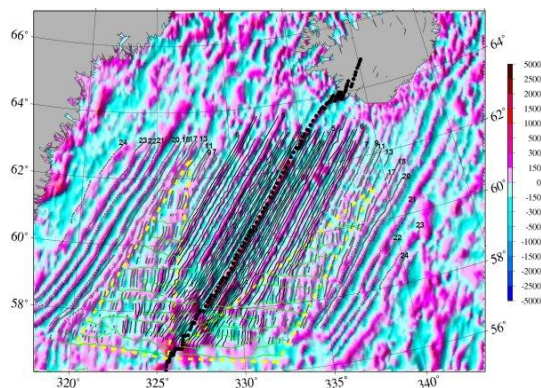
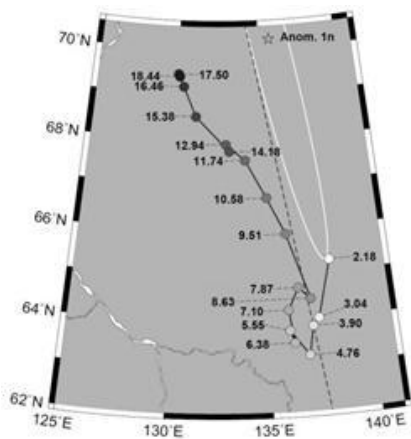


Рис. 7. Теневая карта АМП в северной Атлантике и оси линейных магнитных аномалий. Цифрами указаны номера аномалий. Зона недолговечных трансформных разломов, обведенная желтой пунктирной линией, образовалась во время второй фазы спрединга (хроны 18 – 6с) и юго-западного продвижения несегментированной оси хребта. Точечные серые линии показывают магнитные изохроны. Зеленые линии показывают положение трансформных разломов и нетрансформных смещений, выделенных по спутниковым гравиметрическим и магнитометрическим данным

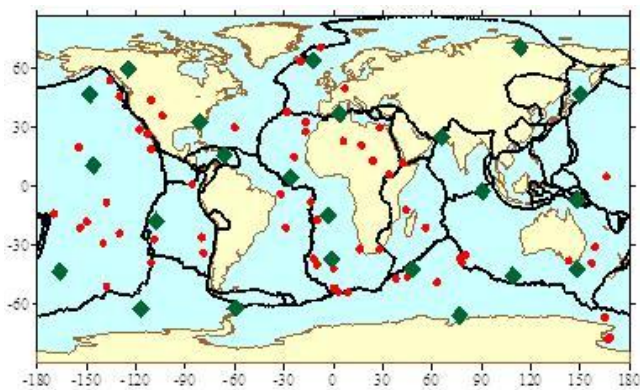
Проведен детальный геосторический анализ аномального магнитного поля (АМП) и идентифицирована вся последовательность спрединговых магнитных аномалий на хребте Рейкьянес от аномалии 24 (54 млн. лет) до осевой аномалии

(рис. 7, 8а). Найдены доказательства существования трех стадий эволюции хребта Рейкьянес, которые характеризуются различным режимом коровой аккреции, связанным с различной степенью влияния Исландского горячего пятна. Определены временной интервал каждой стадии и причины изменения режима аккреции коры [28].

В результате детального анализа оригинальных магнитометрических данных в Северной Атлантике впервые построена детальная кинематическая модель вращения Сев. Американской и Евразийской плит за последние 20 млн. лет с дискретностью 1 млн. лет.



а



б

Рис. 8. Полюс вращения для аномалии 1n с эллипсом доверия и продвижение во времени осредненных положений полюсов вращения Евразийской и Северо-Американской плит, определенное по четырем последовательным полюсам методом скользящего среднего с весовыми коэффициентами. Цифрами указан средний возраст хронов, использованных для вычисления положения данного среднего полюса. Самый молодой полюс (2,18 млн. лет) является осредненным полюсом для аномалий 1n, 2n, 2An.1 и 2An.3, а самый древний полюс (18,44 млн. лет) осредненным для аномалий 5D, 5E, 6пу, и 6по. Пунктирная линия показывает круг большого радиуса, соединяющий молодой средний полюс с точкой на хребте Рейкьянес.

Все полюсы, расположенные вдоль этого большого круга, задают одинаковые направления движения плит (а). Полюс вращения Локализация источников, приуроченных к границе ядромантия, относительно горячих точек и глобальных тектонических разломов.

Местоположение источников на эпоху 1995 года показано зелеными ромбами, горячие точки – красными кругами (б)

Построена динамическая модель источников главного магнитного поля Земли (ГМПЗ). Модель представляет собой набор диполей, выделяемых методом последовательного разделения вкладов отдельных источников независимо для каждой эпохи. Наиболее мощные источники получены в толще жидкого ядра. Диполи, определяющие локальные аномалии ГМПЗ, приурочены к границе ядромантия. Параметры всех источников изменяются во времени непрерывно, что

позволяет исследовать степень влияния диполей разного уровня на пространственную структуру векового хода ГМПЗ и проводить сравнение с другими геофизическими процессами. Сравнительный квазигармонический анализ изменения дипольной составляющей ГМПЗ и флуктуаций скорости вращения Земли показал, что наблюдаемый сдвиг по фазе отдельных гармоник может быть связан с влиянием проводящей мантии. Амплитудно-фазовые характеристики мантии, как фильтра, получены в рамках однослойной модели (рис. 8б) [29].

Получен ряд статистических характеристик изменения векового хода ГМПЗ на территории России и Европы. Проведено сравнение с аналогичными характеристиками векового хода, определяемого отдельными источниками разного масштаба. Показана роль источников 2-3-го порядка малости в формировании короткоживущих (30-40 лет) фокусов векового хода.

Проведена детальная идентификация линейных магнитных аномалий на акватории Норвежско-Гренландского бассейна в Кайнозойское время на основе анализа обобщенной базы магнитометрических данных и составлена карта изохрон. Выполнен анализ изменения скоростей спрединга вдоль линий дрейфа для различных сечений центров спрединга. Определено время изменения скоростей спрединга.

В 2019-2020 гг. по результатам всероссийского конкурса СПбФ ИЗМИРАН принял участие в масштабной кругосветной океанографической экспедиции, организованной главным командованием Военно-морского флота России при поддержке Русского географического общества к берегам Антарктиды на океанографическом исследовательском судне «Адмирал Владимирский». Одной из основных задач экспедиции было изучение магнитного поля Земли и уточнение местоположения Южного полюса Земли с помощью буксируемого протонного магнитометра (полного поля) и компонентных измерений магнитного поля аппаратурой СПбФ ИЗМИРАН на ферромагнитном судне.

Международное сотрудничество

На протяжении многих лет ведется сотрудничество с рядом стран: США (Геологическая служба США, Американский геофизический союз, Национальная администрация по исследованию океана и атмосферы (NOAA), Колумбийский университет), Японией (Университет электрокоммуникаций, Токио), Финляндией (Университет Оулу, Университет Йюенсу, Геофизическая обсерватория Соданкюля), Францией (Институт физики Земли, Париж), Италией (Третий Римский университет). Филиал принимает активное участие в международных программах, проектах, в работе международных научных форумов.

В 2012 г. на магнитной станции «Красное Озеро» (Ленинградская область) запущена в эксплуатацию магнитометрическая аппаратура по проекту «Интермагнет».

Участие в грантах и награды

СПбФ ИЗМИРАН участник Грантов РФФИ, Грант NSF, МНФ Дж.Сороса, Инко-Коперникус, ИНТАС, программ фундаментальных исследований Президиума РАН и международных экспериментальных исследований (эксперимент BEAR). Имеет дипломы VII Международного Промышленного Форума «Российский промышленник» (2003 г.), IX Международной Выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (2004 г.), диплом II степени за разработку комплекса «ОЧАГ-1» для определения местоположения очага предстоящего сильного землетрясения (2004 г.)

В 2004 г. д.ф.-м.н., профессор Копытенко Ю.А. награжден премией им. А.П. Карпинского в области наук о Земле. В 2012 г. д.ф.-м.н., профессор О.М. Распопов награжден Дипломом Европейской научно-промышленной палаты «За большой вклад в геофизику».

Научные журналы

По инициативе СПбФ ИЗМИРАН создан новый международный журнал – International Journal of Geomagnetism and Aeronomy, издаваемый Американским геофизическим союзом (главный редактор О.М. Распопов до 2013).

Литература

1. *Molchanov O.A., Kopytenko Yu.A., Voronov P.M., et al.* Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the spitak (ms = 6.9) and loma prieta (ms = 7.1) earthquakes: comparative analysis// Geophysical Research Letters. 1992. Т. 19. № 14. P. 1495-1498.
2. *Ismaguilov V.S., Kopytenko Yu.A., Voronov P.M., Hattori K., Hayakawa M., Molchanov O.A.* ULF magnetic emissions connected with under sea bottom earthquakes// Natural Hazards and Earth System Science. 2001. Т. 1. № 1-2. P. 23-31.
3. *Kopytenko Y., Ismagilov V., Hayakawa M., Smirnova N., Troyan V., Peterson T.* Investigation of the ULF electromagnetic phenomena related to earthquakes: contemporary achievements and the perspectives// Annali di Geofisica. 2001. Т. 44. № 2. P. 325-334.
4. *Kopytenko Yu.A., V.S. Ismaguilov, K.Hattori, and M.Hayakawa.* Anomaly disturbances of magnetic fields before the strongest earthquake in Japan on March 11, 2011. «Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes», editor M. Hayakawa. 2012, 55(1), P. 101-107
5. *Kopytenko Y.A., Sergushin P.A., Petrishchev M.S., Levanenko V.A., Zaytsev D.B.* Torsion magnetic variometer with kevlar-hanger-based sensor // Key Engineering Materials Vol. 437 (2010). – Trans Tech Publications, Switzerland, 2010. P. 621-624.

6. *Kopytenko Y.A., Sergushin P.A., Petrishchev M.S., Levanenko V.A., Perechesova A.D.* Device for Manufacturing Torsion Bars with Helical Anisotropy UISAT-1 // Key Engineering Materials Vol. 437 (2010). – Trans Tech Publications, Switzerland, 2010. P. 625-628.
7. *Zhamaletdinov A.A., Shevtsov A.N., Velikhov Ye.P. et al.* The study of Interaction Electromagnetic Waves ELF-ULF Range (0.1-200 Hz) with the Earth Crust and the Ionosphere in the Field of Industrial Power Transmission («FENICS» Experiment) // 2015. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics 14(2), 5-49.
8. *Жамалетдинов А.А.* О природе границы Конрада в свете результатов бурения Кольской сверхглубокой скважины и данных глубинной геоэлектрики // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 3. С. 332-336.
9. *Жамалетдинов А.А.* О флюидной природе промежуточных проводящих слоев в земной коре по результатам электромагнитных зондирований и каротажа сверхглубоких скважин // Физика Земли. 2011. № 2. С. 53-63.
10. *Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Токарев А.Д., Корья Т.* Частотное электромагнитное зондирование земной коры на территории Центрально-Финляндского гранитоидного комплекса // Известия РАН. Физика Земли. 2002. № 11. С. 54-68.
11. *Терещенко Е.Д., Терещенко П.Е., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф., Жамалетдинов А.А.* Влияние ионосферы на возбуждение электромагнитного поля диапазона КНЧ и более низких частот в ближней зоне // Журнал технической физики. 2018. Вып. 6. С. 907-913.
12. *Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Терещенко П.Е.* Влияние ионосферы и неоднородной структуры Земли на поляризационные характеристики магнитного поля в диапазоне частот 0.2-200 Hz в ближней зоне горизонтальной заземленной антенны // Журнал технической физики. 2019. Т. 89. № 7. С. 1092-1098.
13. *Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф., Терещенко П.Е.* Немонотонная амплитудно-частотная зависимость магнитного поля, контролируемого наземного КНЧ-источника в дневное время // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 9. № 3. С. 104-110.
14. *Van Geel B., Raspopov O.M., Renssen H., Van der Plicht J., Meijer H.A.J., Dergachev V.A.* The role of solar forcing upon climate change // Quaternary Science Reviews. 1999. Т. 18. № 3. P. 331-338.
15. *Пудовкин М.И., Распов О.М.* Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 5. С. 1-22.
16. *Raspopov O.M., Dergachev V.A., Ogurtsov M., et al.* The influence of the de vries (~ 200 year) solar cycle on climate variations: results from the central asian mountains and

their global link // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2008. Т. 259. № 1. P. 6-16.

17. *Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Мировые карты компонент магнитного поля земли эпохи 2020 // Труды XV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2020. С. 288-291.

18. *Петрова А.А., Петрищев М.С., Копытенко Ю.А., Латышева О.В.* Выявление флюидоподводящих каналов в Арктических морях по аномалиям магнитного и гравитационного полей // Материалы Всероссийской конференции «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики». ФИЦКИА РАН. Архангельск, 2020. С. 810-815.

19. *Копытенко Ю.А., Латышева О.В., Петрова А.А.* Влияние разломных зон земной коры на эволюцию толщины и кромки ледяного покрова Арктики // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2020. № S674. С. 207-211.

20. *Gus'kova E.G., Raspopov O.M., Dergachev V.A., Iosifidi A.G., and Sinitsyna G.V.* Manifestation of the Gothenburg Geomagnetic Field Excursion in Sediments on the Northwestern Central Russian Upland. ISSN 0016-7932, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012. Vol. 52. N 3. P. 675-683.

21. *Гуськова Е.Г., Распопов О.М., Дергачёв В.А., Иосифиди А.Г., Сеницын А.А.* Палеомагнитные исследования археологических памятников Костёнки 14 (Маркина Гора) и Костёнки 16 (Углянка). *Geocosmos*. 2012. С. 44-50.

22. *Тясто М.И., Птицына Н.Г., Веселовский И.С., Яковчук О.С.* Экстремально сильная геомагнитная буря 2-3 сентября 1859 года по архивным магнитным данным Российской сети наблюдений // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2009. Т. 49. № 2. С. 163-173.

23. *Тясто М.И., Данилова О.А., Дворников В.М., Сдобнов В.Е.* Отражение параметров солнечного ветра в жесткости геомагнитного обреза космических лучей в период сильной магнитной бури в ноябре 2003 г. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2008. Т. 48. № 6. С. 723-740.

24. *Tyasto M.I., Danilova O.A., Ptitsyna N.G., Sdobnov V.E.* Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the great geomagnetic storm of November 2004 // *Journal of Advances in Space Research*. 2013. P. 1230–1237.

25. *Баткова Л.А., Боярских В.Г., Демина И.М.* Комплексная база данных компонент геомагнитного поля на акватории океанов по результатам съемок, выполненных на немагнитной шхуне «Заря» // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2007. Т. 47. № 4. С. 571-576.

26. *Ivanov S.A., Merkur'ev S.A.* Resolvability of the interval between inversions using marine magnetic anomalies based on the Rao-Cramer inequality // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. Vol. 53. N. 6. P. 785-793.

27. *Ivanov S.A., Merkur'ev S.A.* Interpretation of Marine Magnetic Anomalies. Part I. A Survey of Existing Methods and Analysis of the Analytic Signal Method // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014. Vol. 54. N. 3. P. 388-396.
28. *Меркурьев С.А., Деметц Ч., Гуревич Н.И.* Эволюция геодинамического режима аккреции коры у оси хребта Рейкьянес, Атлантический океан // *Геотектоника*. 2009. № 3. С. 14-29.
29. *Демина И.М., Никитина Л.В., Фарафонова Ю.Г.* Вековые вариации главного магнитного поля земли в рамках динамической модели его источников // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. Т.4 8. № 4. С. 567-575.

2.2. ОТДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ

**Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии
наук – история создания и развития**
И.Г. Малыгин, В.И. Прицкер, О.А. Королев

В статье рассмотрены различные аспекты и этапы развития ИПТ РАН – единственного научного учреждения в стране, ориентированного на решение фундаментальных проблем общетранспортного, не зависящего от ведомственной принадлежности характера. Такая ориентация в конечном итоге предопределила постановку фундаментальных исследований, направленных на решение комплексных транспортных проблем пространственного развития Российской Федерации и создание интеллектуальной мультимодальной транспортной системы страны, соответствующей требованиям IV индустриальной революции. Учитывая, что транспорт является локомотивом социально-экономического развития нашего общества, успешное решение поставленных перед Институтом задач трудно переоценить.

Институт проблем транспорта Академии наук СССР (ИПТАН) был учрежден по постановлению Президиума АН СССР от 26.11.1990 г. №1248 на базе структурных подразделений Комиссии АН СССР по проблемам транспорта. Научные подразделения Института включали пять лабораторий, размещенных в Ленинграде, и филиал, распложенный в Москве. Согласно постановлению целью организации Института было создание «...благоприятных условий для успешного развития фундаментальных исследований межотраслевых транспортных проблем...». Научно-методическое руководство Институтом было возложено на Отделение машиностроения, механики и процессов управления (ОММПУ) АН СССР. Этим же постановлением организатором и первым директором Института был назначен академик Н.С. Соломенко (рис. 1).

Николай Степанович Соломенко (1923–1995) крупный учёный в области механики деформируемых тел и строительной механики корабля [1], доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1977), академик АН СССР (1984), академик РАН (1991), лауреат Государственной премии СССР (1984), участник Великой Отечественной войны с июля 1941 по май 1945, инженер-контр-адмирал (1975).

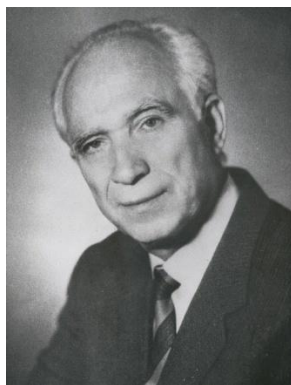


Рис. 1. Соломенко Николай Степанович – первый директор ИПТ РАН

Под его руководством разработана структура Института и разработаны научные направления исследований:

- надежность и безопасность транспортных средств и технологий;
- экология транспортных процессов;
- управление, компьютеризация и информатика в транспортных системах и процессах;
- развитие перспективных видов транспорта;
- транспортная энергетика;
- развитие городского транспорта;
- социально-экономические проблемы развития транспорта;
- анализ зарубежного опыта функционирования транспортных систем;
- участие в разработке и реализации прогнозов и комплексных программ научно-технического прогресса по разделу «Транспорт».

Николай Степанович успешно руководил Институтом вплоть до скоропостижной смерти в 1995 г.

В память о больших заслугах Н.С. Соломенко в научно-технической и организационно-методической деятельности Институту в сентябре 2006 года было присвоено его имя.

После его смерти распоряжением ОПММУ РАН от 04.07.1995 г. №4 временное исполнение обязанностей директора возложено на заместителя по научной работе О.В. Белого, который впоследствии постановлением Президиума РАН от 21.04.1998 г. №147 утвержден в должности директора Института (рис. 2).

Белый Олег Викторович (1941), доктор технических наук (1997), профессор (2004), заслуженный деятель науки Российской Федерации (2008), Почетный работник транспорта России (2003), лауреат третьего Международного конкурса «Человек года на транспорте» (2003), академик Российской академии транспорта (РАТ), автор 12 монографий и более 100 публикаций, посвященных транспортной

тематике. Имеет правительственные и ведомственные награды, в том числе грамоты Министерства транспорта Российской Федерации, ОАО «РЖД», а также Президента РАН.



Рис. 2. Белый Олег Викторович – директор ИПТ РАН с 1995 по 2015 гг.

О.В. Белым была оптимизирована структура института, до сих пор включающая 5 лабораторий, размещенных в Санкт-Петербурге, и Московский отдел. Под его руководством выполнен ряд фундаментальных исследований и прикладных работ в интересах Министерства транспорта РФ, крупных транспортных организаций и, прежде всего, ОАО «Российские железные дороги». Предложена и развита методология имитационного моделирования транспортных систем, позволяющая перейти от неэффективных и дорогостоящих эмпирических методов исследования к научно обоснованным методам моделирования, не требующим больших финансовых и материальных затрат. Разработаны основные принципы стратегии развития транспортной отрасли РФ, общие принципы управления и обеспечения безопасности на транспорте, рассмотрены экологические аспекты функционирования транспорта, вопросы оптимизации взаимодействия видов транспорта и развития высокоскоростного движения. [2]. С 2006 г. Институт ежегодно проводит международную научно-практическую конференцию «Транспорт России: проблемы и перспективы», привлекающую с каждым годом все большее количество участников.

В 2011 г. связи с возросшей ролью в транспортной отрасли информационных технологий и искусственного интеллекта научно-методическое руководство Институтом из ОЭММПУ РАН было передано Отделению нанотехнологий и информационных технологий (ОНИТ) РАН, при этом перечень научных направлений принял вид:

- научные основы анализа, синтеза и определения направлений развития транспортных систем;
- модели и методы оптимизации транспортных систем;

- проблемы организации и управления транспортными системами;
- научные основы информатизации и организации транспортных систем;
- научные основы построения интеллектуальных транспортных систем;
- проблемы безопасности транспортных систем;
- проблемы энергетики транспортных систем, в том числе на базе альтернативных энергоносителей;
- проблемы взаимодействия транспортных систем с окружающей средой;
- научные основы управления экологически устойчивым развитием транспорта;
- проблемы ресурсосбережения на транспорте, в том числе с использованием нанотехнологий.

01 июля 2015 г. решением общего собрания трудового коллектива директором Института избран И.Г. Малыгин, ранее исполнявший обязанности заместителя директора по научной работе (рис. 3).



Рис. 3. Малыгин Игорь Геннадьевич – руководитель ИПТ РАН с 2015 г. по настоящее время

Игорь Геннадьевич Малыгин (1962) доктор технических наук (2004), профессор (2005), почетный работник науки и техники РФ (2008), работает в ИПТ РАН с 2009 г., в том числе с 2011 г. заместителем директора по научной работе. Автор 270 научных работ, в том числе 12 монографий, 7 авторских свидетельств и патентов. Эксперт РАН, федеральный эксперт ФГБНУ РИНКЦЭ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в области транспорта, член Научно-консультативного совета при Общественной палате Российской Федерации, член редколлегии 3-х журналов из перечня ВАК РФ, а также журнала, входящего в базу данных Web of Science – «Marine Intelligent Technologies», член научно-технического совета ОАО «РЖД», рабочей группы по проблемам транспорта президиума Государственного совета РФ, Координационного совета при Министерстве транспорта РФ, Транспортного совета при Правительстве Санкт-Петербурга, 3-х

диссертационных советов и т.д. Малыгин И.Г. – академик и член президиума Российской академии транспорта (РАТ). Под его научным руководством подготовлено 13 кандидатов наук и 1 доктор наук. Он является руководителем выдвинутой Институтом на соискание премии Правительства Российской Федерации 2021 года в области науки и техники работы «Разработка научно обоснованного комплекса моделей для управления стратегическим развитием транспортной инфраструктуры Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики в условиях изменения климата». Имеет правительственные и ведомственные награды, в том числе грамоты Министерства обороны, МВД и МЧС России, а также ОАО «РЖД» и президиума РАН.

Под его научным руководством получили дальнейшее развитие фундаментальные исследования в области информатизации и интеллектуализации транспортной отрасли, комплексной безопасности транспортных систем и пространственного развития страны [3, 4].

По инициативе И.Г. Малыгина в 2018 г. внесена в планы мероприятий РАН и Минобрнауки России и ежегодно проводится Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Технологии построения когнитивных транспортных систем», объединяющая специалистов транспортных учреждений и вузов по созданию интеллектуальных транспортных средств, технологий и систем. В работах Института большое внимание уделяется проблемам транспортной обеспеченности и доступности районов Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, круглогодичного функционирования Северного морского пути, как альтернативы международных транспортных коридоров, связывающих страны Юго-Восточной Азии с Западной Европой [5].

Значительная часть научных сотрудников Института (38%) преподают в ведущих университетах Санкт-Петербурга и Москвы. В Институте функционирует базовая кафедра СПбГЭТУ (ЛЭТИ), регулярно проходят практику студенты, а также участвуют в исследованиях магистранты этого и других вузов:

- ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»;
- ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургская государственная художественно-промышленная академия имени А.Л. Штиглица»;
- ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»;
- ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет».

Большое внимание уделяется установлению и укреплению международных связей. Успешно развивается взаимодействие с научными и транспортными организациями Белоруссии, Индии, Китая, Сербии, Йемена, Финляндии, Болгарии и других стран. Подписан меморандум о взаимопонимании и планируются совместные

исследования современных интеллектуальных транспортных технологий с международным телекоммуникационным холдингом «HUAWEI» (КНР) и Indian Institute of Science (Bangalore, India). В течение ряда лет проводятся совместные исследования с университетом «Черноризец Храбър» (г. Варна, Болгария). Большой вклад в укрепление международных связей вносят проводимые Институтом конференции, которые с каждым годом привлекают все больше специалистов транспортных учреждений и вузов не только России, но и других стран. Сотрудники Института являются членами 6 международных технических комитетов (IFAC-TC5.4, IFAC-TC9.5, IFAC/IFIP/IFORS/IMACS, IFAC-ISTC, IEEE, ISDG).

Институт обладает высоким научным потенциалом: из 39 штатных научных сотрудников – 15 докторов наук (38%) и 16 кандидаты наук (41%). Сотрудниками Института опубликовано более 1 400 научных работ, в том числе 56 монографий, более 150 статей в журналах, входящих в базы данных WoS, Scopus и CAS, за последние 5 лет получено 7 патентов и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Находясь под научно-методическим руководством ОНИТ РАН, Институтом исследованы особенности интеллектуализации транспортной отрасли: вопросы построения беспилотных транспортных средств; сбора, обработки, передачи и использования данных для обеспечения процессов цифровизации транспорта; разработки детализированной информационно-телекоммуникационной модели интеллектуальной мультимодальной транспортной системы (ИМТС) и т.п.

В ноябре 2020 г. Институт постановлением Президиума РАН был переведен под научно-методическое руководство ОЭММПУ РАН с целью дальнейшей реализации перспективных исследований по разработке методологии управления составными частями ИМТС и транспортной системой России в целом, гармонизации развития видов транспорта и оптимизации их взаимодействия, инновационного энергетического обеспечения транспорта. Переход в ОЭММПУ РАН позволил ускорить и повысить качество научных исследований и, по мнению Президиума РАН, является своевременным и целесообразным. В настоящий момент в структуре Института функционируют следующие научно-исследовательские подразделения:

- лаборатория проблем безопасности транспортных систем;
- лаборатория интеллектуальных транспортных систем;
- лаборатория проблем ресурсосбережения на транспорте;
- лаборатория проблем экологии транспортных систем;
- лаборатория проблем организации транспортных систем;
- отдел прогнозирования развития транспортных систем (Москва).

На 2019–2021 гг. Президиум РАН согласовал, а Минобрнауки России утвердило План исследований Института, содержащий две фундаментальных НИР:

– «Разработка теоретических основ организации сложных когнитивных транспортных систем»;

– «Разработка теоретических основ построения интеллектуальных сетей мониторинга и управления экологической безопасностью мультимодальных транспортных систем».

Выполнение этих работ должно стать основой серьезного реформирования транспортной отрасли России и предполагает последовательную интеллектуализацию и информатизацию всех транспортных мод, оптимизацию их взаимодействия и объединение в единую транспортную систему нового типа [6, 7]. В качестве первой реформируемой моды выбран железнодорожный транспорт, как наиболее важный для экономики страны. В связи с этим в рамках ранее заключенного между холдингом «РЖД» и РАН договора о сотрудничестве от 18.06.2018 № 73, продленного дополнительным соглашением от 01.04.2021, активизируется проведение прикладных НИР по интеллектуализации инфраструктуры и транспортных средств, организационному совершенствованию управления и повышению безопасности транспортных технологий ОАО «РЖД». В Институте также проводятся научные исследования в области построения ИМТС регионального уровня, в частности, ИМТС крупных агломераций, призванных стать важнейшей составляющей проекта «Умный город».

На начало 2021 года общее количество выполненных Институтом фундаментальных НИР превысило 75, а 25 результатов, полученных в ходе этих работ, вошли в перечень важнейших результатов РАН («Белая книга РАН»). Количество НИОКР прикладного характера только за последние 10 лет достигло 20, причем большая их часть выполнена в интересах ОАО «РЖД».

Следует отметить чрезвычайную сложность выполнения взятых на себя обязательств Института как из-за комплексности проблем и разноплановости технических и организационных задач, так и вследствие ограниченности научных и финансовых ресурсов. В то же время успешное выполнение этих научных исследований и внедрение полученных результатов в транспортную отрасль страны и позволит осуществить ее интеграцию в международную транспортную систему в соответствии с требованиями IV индустриальной революции [8].

Литература

1. Соломенко Н.С., Абрамян К.Г., Сорокин В.В. Прочность и устойчивость пластин и оболочек судового корпуса: учебное пособие. Л.: Судостроение, 1967. 245 с.
2. Белый О.В., Малыгин И.Г. и др. Фундаментальные проблемы единого транспортного пространства Российской Федерации. СПб.: ИПТ РАН, 2012. 111 с.
3. Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Иванов А.Ю. Мобильные распределённые базы данных Интеллектуальной мультимодальной транспортной системы. СПб.: ИПТ РАН, 2017. 166 с.
4. Malygin I.G., Komashinskiy V.I., Asaul A.N. The project of Intellectual Multimodal Transport System // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20. P. 25-30.
5. Макоско А.А., Цыганов В.В., Малыгин И.Г. и др. Инфраструктура Сибири, Дальнего Востока и Арктики. Состояние и три этапа развития до 2050 года / Под ред. члена-корреспондента РАН А.А. Макоско. СПб.: ИПТ РАН, 2019. 468 с.
6. Цыганов В.В., Малыгин И.Г., Еналеев А.К., Савушкин С.А. Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза. СПб.: ИПТ РАН, 2016. 216 с.
7. Krylatov A.Yu., Zakharov V.V., Tuovinen T.T. Optimization models and methods for equilibrium traffic assignment. Series: Springer tracts on transportation and traffic. Springer, Cham, 2020. 228 p. DOI: 10.1007/978-3-030-34102-2.
8. Комплексное освоение территории Российской Федерации на основе транспортных пространственно-логистических коридоров. Актуальные проблемы реализации Мегaproекта «Единая Евразия: ТЕПР – ИЕТС» / отв. ред. академик РАН В.В. Козлов, член-корреспондент РАН А.А. Макоско; Российская академия наук. М.: Наука, 2019. – 463 с.

2.3. ОТДЕЛЕНИЕ ХИМИИ И НАУК О МАТЕРИАЛАХ

**Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова: тридцать лет вместе с
Российской академией наук**

*Т.В. Антропова, И.Б. Баньковская, Р.С. Бубнова, О.Ю. Голубева,
В.В. Гусаров, А.Г. Иванова, М.В. Калинова, Т.А. Кочина, Л.П. Мезенцева,
С.И. Свиридов, В.Л. Столярова, Г.А. Сычёва, О.А. Шилова, И.Ю. Кручинина*

В обзоре представлены основные направления и результаты научных исследований, проводившихся в ИХС РАН с 1991 по 2021 год. Показана связь работ этого периода с работами классиков, работавших ранее в ИХС АН СССР. Краткость изложения информации не позволила раскрыть всю глубину исследований, однако позволила показать объем и масштаб исследований в области стеклообразного состояния вещества, синтеза и свойств кварцевого стекла, физикохимии пористых стекол и высокотемпературной химии оксидов, структурной химии нанобиомира и структурной химии оксидов, химии и технологии органосиликатных покрытий, золь-гель технологии, физикохимии и технологии керамики различного назначения, цеолитов, слоистых силикатов и композиционных, в т.ч. гибридных материалов для альтернативной энергетики и экологии.

Институт химии силикатов вырос из Лаборатории химии силикатов, которую в 1936 году организовал академик Илья Васильевич Гребенщиков на базе Института общей и неорганической химии АН СССР (ИОНХ АН СССР), созданного двумя годами ранее в Ленинграде. Илья Васильевич мечтал, что эта лаборатория даст начало новому Институту, который он хотел назвать Институт химии кремния. В рамках развития химии кремния он планировал разрабатывать и исследовать материалы, востребованные народным хозяйством, получаемые на основе кремнийорганических соединений, силикатов, боросиликатов, алюмосиликатов и бескислородных соединений кремния. Мечта И.В. Гребенщикова осуществилась в 1948 году – в апреле этого года был официально создан Институт химии силикатов АН СССР, хотя он и не был назван, как задумывал академик. Тематика исследований изначально охватывала широкий спектр работ не только по синтезу соединений кремния и изысканию новых методов их исследования, но также была связана с изучением их взаимодействия с другими веществами и исследованием веществ, близких к кремнию и его соединениям по своей природе. Заслуги ИХС АН СССР перед страной были отмечены Орденом Трудового Красного знамени. В 1962 году ИХС АН СССР было присвоено имя организатора и первого директора – Ильи Васильевича Гребенщикова.

С того времени Институт химии силикатов стал ведущим центром неорганического материаловедения на Северо-Западе СССР, а после его распада – Российской Федерации. Со времени организации Института основные направления научной деятельности сохранились, но расширились и трансформировались в соответствии с изменениями, происшедшими за эти годы в науке и технике. Трудный период 90-х годов, связанный с годами перестройки в стране в целом, особенно застой и развал многих отраслей промышленности, наложил отпечаток на тематику научных исследований. Практически исчезли исследования по огнеупорным и цементным материалам, которые обслуживали нужды тяжелой промышленности и промышленности строительных материалов. Однако в тяжелые для науки 90-ые годы директор академик Михаил Михайлович Шульц сумел сохранить коллектив института и его доброе имя [1]. С появлением нанотехнологий получили развитие новые направления, связанные с синтезом и исследованием структуры и свойств наночастиц, наноматериалов и нанокомпозитов, в том числе такие, как синтез и физико-химические и структурные исследования пористых стекол, работы в области химии и технологии золь-гель синтеза. Эта направленность исследований выделилась в отдельное направление с приходом в 1998 году нового директора Института д.х.н., чл.-корр. РАН (впоследствии академика РАН) Владимира Ярославовича Шевченко [2-4]. Озабоченность мировой общественности ухудшением экологии и поиском альтернативных источников энергии способствовали тому, что в 00-ых годах в ИХС РАН появилось новое направление исследований – химическая энергетика и экология. Это направление возглавил академик Януш Брониславович Данилевич, а после его кончины – его ученица, с 2018 года – ВРИО директора, с 2019 года директор ИХС РАН д.т.н. Ирина Юрьевна Кручинина [5]. В 2002 году с возвращением в Институт известного химика-кремнийорганика академика Михаила Григорьевича Воронкова получили новое развитие работы по изучению кремнийорганических соединений и материалов [6]. Развивались фундаментальные и прикладные исследования в области стеклообразного состояния, возглавляемые докторами наук Евгением Александровичем Порай-Кошицем, Олегом Всеволодовичем Мазуриным, Николаем Сергеевичем Андреевым, Валерием Викторовичем Голубковым и другими известными учеными Института, прославившими его имя [7-10]. Продолжались и получили новые практические применения исследования по химии силикатов редкоземельных элементов и их аналогов [11]. В ответ на веяния времени, стали востребованы керамические материалы для медицины и биотехнологий, для топливных элементов и захоронения радиоактивных отходов. Продолжились исследования по разработке новых, более совершенных температуростойчивых и радиационностойких, атмосферостойких и антиобледенительных органосиликатных и жаростойких стеклокерамических защитных покрытий, научные основы получения которых, были заложены в середине

XX века докторами наук Александром Алексеевичем Аппеном [12], Николаем Павловичем Харитоновым [13] и Анатолием Исидоровичем Борисенко [14].

С 2006 года выделены следующие направления фундаментальных исследований института [15]:

- синтез новых неорганических веществ, исследование структуры и свойств высокотемпературных оксидных соединений, фазовые равновесия в оксидных системах;
- природа химической связи в неорганических соединениях;
- наночастицы, наноматериалы и нанокомпозиты на основе оксидных и гидроксидных соединений;
- стеклообразное состояние вещества;
- разработка принципов и методов создания новых материалов и химических продуктов с улучшенными свойствами (стекло и стекломатериалы, керамика, защитные и функциональные покрытия);
- химическая энергетика и экология.

Ряд основных направлений научных исследований ИХС РАН за тридцатилетний период с 1991 по 2021 год более подробно рассмотрен ниже в изложении руководителей научных направлений.

Стеклообразное состояние вещества

Со дня основания и до настоящего времени одно из ведущих научных направлений ИХС РАН связано с физико-химическими и структурными исследованиями стекол и стеклообразующих расплавов.

В XX веке в ИХС РАН велись жаркие споры специалистов по теории строения стекла. Е.А. Порай-Кошиц совместно с Н.Н. Валенковым подтвердил право на существование кристаллитной теории стекла [16], автором которой был его учитель А.А. Лебедев, определив, что вероятные размеры кристаллитов должны быть очень малыми и не превышать 10 \AA . Однако возможности рентгеновских методов исследования на тот момент оказались исчерпанными [17]. Встала задача развития экспериментальных методов исследования структуры стекол. Эта задача по сей день последовательно решается сотрудниками лаборатории строения и свойств стекла (ЛССС). За прошедшие 30 лет в ЛССС получили развитие следующие экспериментальные методы исследования структуры стекол: малоугловое рентгеновское рассеяние [18, 19]; рассеяние видимого света [20, 21]; метод проявления, – позволившие оценить размеры критического зародыша и величину потенциального барьера, который зародышу нужно преодолеть, чтобы зарождение кристалла реализовалось [22]; методы молекулярной динамики [23], химической термодинамики [24-26] и дифференциально-термического анализа [27, 28].

Впервые построены тройные фазовые диаграммы в областях стеклообразования систем $K_2O-B_2O_3-SiO_2$ и $Rb_2O-B_2O_3-SiO_2$. Доказано, что в системе $Na_2O-B_2O_3-SiO_2$ область жидкостного фазового разделения замыкается не только со стороны высоких, но и со стороны низких температур [27]. Продолжены работы, начатые в 1990-ых годах под руководством академика М.М. Шульца, по развитию термодинамической модели для описания стеклообразующих систем. Модель позволяет рассчитывать, без использования подгоночных параметров, свойства стекол, их структуру ближнего и среднего порядка, и устанавливать количественную связь структуры со свойствами [25, 26]. Экспериментальные исследования скорости зарождения кристаллов в стеклах на основе доменных шлаков позволили получить стекла и стеклокристаллические материалы на их основе [29]. Впервые получены данные по скорости гетерогенного зарождения кристаллов на активных местах поверхности стекла [30-32].

Совместно с лабораторией кремнийорганических соединений и материалов продолжают исследования по изучению процессов кристаллизации и свойств стекол в системах $Na_2O-BaO-SiO_2$, $SrO-SiO_2$, $SrO-B_2O_3-SiO_2$, интересных как для понимания природы стеклообразного состояния, обнаружения новых кристаллических соединений, так и получения на их основе материалов с нелинейно-оптическими и люминесцентными свойствами. Ведутся прикладные исследования по разработке высокотемпературных стеклокристаллических герметиков для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), низкотемпературных стеклоприпоечных материалов для электроники. Совместно с Радиевым институтом им. В.Г. Хлопина ведутся работы по изучению боросиликатных матриц для остекловывания РАО (радиоактивных отходов).

Синтез и физико-химические свойства пористых стекол

Центральное место в научной школе основателя Института академика И.В. Гребенщикова занимало изучение химической устойчивости стекол и установление зависимости их свойств от состава. В дальнейшем эти исследования обеспечили формирование нового перспективного направления, посвященного изучению ликвационных явлений в оксидных стеклообразующих щелочноборосиликатных (ЩБС) системах [33, 34], что является фундаментальной основой химической технологии пористых стекол (ПС) с регулируемыми параметрами структуры и создания на их основе новых неорганических функциональных нанокompозитных материалов, перспективных для решения прикладных задач фотоники, микроэлектроники, медицины, экологии, альтернативной энергетики и др., которые были защищены авторскими свидетельствами и патентами РФ на изобретение (см. обзоры в [1, 33-36]). В этом

научном направлении ИХС РАН занимает лидирующее положение не только в России, но и в мире.

В XXI веке в Лаборатории физической химии стекла, возглавляемой д.х.н. Т.В. Антроповой, были разработаны научные основы технологии и получены магнитооптические кварцоидные стекла; переходные стекла с КТЛР, близким к кварцевому стеклу; фотохромные кварцоидные материалы; твердотельно-жидкостные лазерные элементы, светочувствительные гетерогенные среды для высокоэффективных стабильных объемных голограмм; пористые стекла с повышенным оптическим пропусканием в видимом диапазоне длин волн, а также с особой структурной неоднородностью с целью создания лазерных элементов с некогерентным излучением.

В период 1991-2021гг. главными научными достижениями Института в указанном направлении явились детализация физико-химической модели взаимодействия ЦБС стекол с водными растворами; разработка принципов химического синтеза и создание твердотельно-полимерных лазерных элементов; узкополосных светофильтров; стеклополимерных композитов для элементов облегченной оптики; функциональных элементов микрофлюидных аналитических систем с оптическим детектированием (совместно с ИАП РАН); серебро-содержащих стекломатериалов с плазмонными структурами; люминесцентных висмут-содержащих кварцоидных стекол; ферромагнитных железо-содержащих ПС; новых композитных материалов со свойствами сегнетоэлектриков и гетерогенных мультиферроиков; полностью диэлектрических волоконно-оптических датчиков температуры, а также новых микрооптических элементов (волноводы, растры), в том числе, на основе ПС, импрегнированных галогенидами серебра (совместно с НИУ ИТМО); биологически активных мембранных материалов на основе ПС, модифицированных гетерополисоединениями (совместно с СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Высокотемпературная химия оксидов

Сохранение научно-технических приоритетов и конкурентоспособности Российской Федерации в мире в области освоения космоса, ракетно- и авиастроения, атомной энергетики, металлургии, фотоники и ряда других областей современной техники требуют разработки высокотемпературных материалов нового поколения для эксплуатации при температурах более 3000 К.

В период с 1991 г. по 2021 г. в лаборатории Высокотемпературной химии гетерогенных процессов под руководством члена-корреспондента РАН, профессора В.Л. Столяровой для успешной реализации этой задачи в рамках термодинамического подхода с использованием методом высокотемпературной масс-спектрометрии, получены следующие результаты:

- впервые создана единая концепция прогнозирования термодинамических свойств и процессов испарения оксидных расплавов – основы оксидных материалов: стекол, керамики, покрытий [37-40];
- впервые установлены закономерности испарения и найдены термодинамические свойства силикатных, боратных, фосфатных, германатных, цирконатных, гафнатных систем и материалов при высоких температурах [37-40];
- разработаны оптимальные условия синтеза и эксплуатации материалов при высоких температурах для захоронения радиоактивных отходов, для предотвращения аварий на атомных станциях, для космической и авиационной техники, для микроэлектроники, фотоники и специальных областей отечественной промышленности [37-41];
- разработаны подходы для прогнозирования поведения оксидных материалов в экстремальных условиях с участием процессов, протекающих в газовой фазе в ядерной энергетике, в металлургии и при решении экологических задач с привлечением статистико-термодинамических и полуэмпирических моделей [37-41];
- впервые в Скандинавии сотрудниками ИХС РАН Столяровой В.Л. и Шиловым А.Л., используя накопленный опыт модификации масс-спектрометров для высокотемпературных исследований на примере отечественного масс-спектрометра МИ-1201 разработан и введен в эксплуатацию автоматизированный высокотемпературный масс-спектрометр с четырехкамерным испарителем на базе квадрупольного прибора фирмы Бальцерс в Королевском институте технологии (Стокгольм), и затем в Аолта Университете (Хельсинки).

Структурная химия наномира

Структурная химия наномира – это принципиально новое направление, развиваемое в Лаборатории исследования наноструктур (зав. лабораторией академик В.Я. Шевченко). В основе идей, развиваемых В.Я. Шевченко, лежит фундаментальная проблема образования химического вещества в наноразмерном состоянии [3, 4, 42, 43]. В рамках создания теории строения вещества разработаны новые принципы конвергенции неорганических, органических и биологических материалов; предложены теоретические модели, учитывающие размер как физико-химический фактор и представления о «пятом» состоянии вещества; определено структурное разнообразие наномира как следствие его особых свойств: неравновесности, когерентности, иерархии, фрагментарности, обобщенной симметрии; впервые развит локальный подход к принципам формирования наночастиц из фрагментов (строительных блоков); впервые сформулированы геометрические принципы самоорганизации наночастиц; введено понятие «неорганического гена»; разработана методология поиска первичных группировок (нанокластеров) определенного химического состава и топологии в кристаллических структурах любой

сложности [2, 3, 42, 43]. В последние годы в Лаборатории исследования наноструктур разрабатываются методы и подходы для реализации процессов 3D печати керамических композитов для конструкций, работающих в условиях экстремальных нагрузений. В рамках этой тематики впервые обнаружены и исследованы карбидные материалы с микроструктурой трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ), сформированные в керамических материалах путем реакционно-диффузионных превращений [44, 45]. Проведены работы по расчету условий формирования упорядоченных микроструктур в твердофазных системах. Впервые было обнаружено, что микроструктура изученных карбидных материалов соответствует упорядоченной структуре ТППМЭ, описанной А. Тьюрингом, что является предпосылкой повышенной прочности таких материалов. На сегодняшний день изучено множество примеров таких упорядоченных структур, но в основном, они обнаружены в органических системах, а в неорганических, твердофазных реакционно-диффузионные взаимодействия изучены мало.

Структурная химия оксидов

Рентгеноструктурное направление исследований, в том числе и при повышенных температурах, было заложено в ИХС РАН профессорами Ю.И. Смолиным и Ю.Ф. Шепелевым. В 1970-90-е годы под их руководством это направление развивали сотрудники Лаборатории рентгеноструктурных исследований А.Е. Лапшин, позже защитивший докторскую диссертацию и возглавивший направление, к.ф.-м.н. А.А. Левин, к.х.н. А.А. Андерсон, к.х.н. И.К. Бутикова и др., в частности они выполняли уникальные исследования цеолитов мирового уровня – локализовали распределение молекул и катионов на атомном уровне в процессе ионного обмена с повышением температуры, используя методы дифракции.

В последние 30 лет направление термических структурных исследований развивается и поддерживается по-прежнему на мировом уровне сотрудниками Лаборатории структурной химии оксидов во главе с д.х.н. Р.С. Бубновой (ЛСХО). В ЛСХО решают также структурные проблемы материаловедения:

- разрабатываются фундаментальные основы кристаллохимического конструирования новых перспективных оптических, магнитных, электропроводящих материалов;

- выявляются кристаллохимические предпосылки изучаемых свойств, осуществляется поиск, синтез, структурная характеристика новых кислородных соединений, преимущественно методами рентгеновской дифракции поли- и монокристаллов в широком интервале температур рамановской и ИК-спектроскопией в сопоставлении с изучением их свойств и интерпретацией этих данных.

Для этих исследований характерна междисциплинарность – интеграция химии, физики, материаловедения, наук о Земле, а также академической и университетской школ (ИХС РАН, СПбГУ). [46-60].

Основные достижения структурной химии в ИХС РАН связаны с поиском ответа на вопрос – как образуются кристаллы с управляемыми свойствами. На основании экспериментальных данных о кристаллическом строении и термическом поведении боратов выдвинуты принципы высокотемпературной кристаллохимии, выявлены общие закономерности термического поведения и формирования кристаллических структур. В перспективе, применяя разработанные для боратов подходы, термоструктурные исследования соединений разных классов приводят к разработке принципов и закономерностей термокристаллохимии нитратов, карбонатов, силикатов, сульфатов и т. п.

В последние несколько десятилетий бораты нашли новые области применения, благодаря обнаружению нелинейно-оптических, люминесцентных, пьезоэлектрических и других полезных функциональных свойств у ряда боратов. Они обладают высоким порогом лазерного возбуждения, оптической однородностью, широкой областью прозрачности, высокой химической устойчивостью, термо- и радиационной стойкостью и т. д. Сейчас актуальной проблемой материаловедения, востребованной практикой, является разработка фундаментальных основ конструирования новых оптических кристаллических, стеклокерамических и стеклообразных материалов с управляемыми свойствами на основе боратов и боросиликатов. Структурно-чувствительные свойства фаз – не только термическое расширение, но и линейные и нелинейно-оптические, пьезоэлектрические, люминесцентные и др. обусловлены кристаллическим строением вещества, размерностью, формой и расположением их катионных и анионных комплексов, дефектностью структуры.

Термоструктурные исследования за последние 30 лет в Лаборатории структурной химии оксидов привели к созданию нового направления – термической структурной химии боратов и боросиликатов: На основании полученного экспериментального материала о строении и термическом поведении боратов выдвинуты принципы термокристаллохимии, выявлены общие закономерности термического поведения и самоорганизации их кристаллических структур (жестких борокислородных групп) [46-50].

В рамках этого направления разработан новый подход к исследованию термических преобразований кристаллического вещества, включающий уникальные авторские разработанные методики терморентгенографии, заложенные в основу ряда обновляемых программных комплексов.

Основные положения термокристаллохимии боратов используются для понимания процессов формирования боратов. Идеологией является развиваемый

авторами подход, учитывающий вклад термических вибраций атомов и жестких анионных комплексов в формирование строения и свойств боратов. Параллельное расположение эллипсоидов термических колебаний (смещений) атомов В и О в кристаллических структурах боратов свидетельствует о кооперативном характере теплового движения атомов и жестких В–О-групп. Результатом является проявляющаяся во многих боратах предпочтительная ориентировка жестких борокислородных групп. Этот подход к проблеме формирования кристаллического вещества с точки зрения теплового движения атомов впервые выдвинул Р.С. Бубновой и С.К. Филатовым [49, 52].

В перспективе, применяя разработанные для боратов подходы, исследование разных классов химических соединений должно привести к разработке новых фундаментальных направлений – термосталлохимии других классов кислородных соединений: нитратов, карбонатов, силикатов, ванадатов и т. п.

В настоящее время в области создания новых оптических боратных и боросиликатных материалов создана основа для разработки новых перспективных люминесцентных боратных и боросиликатных материалов с эмиссией в ИК диапазоне. Предложены кристаллохимические предпосылки создания на их основе нелинейно-оптических материалов [54]; также люминесцентных материалов [57-60]. Исследование структуры и люминесцентных свойств в рядах твердых растворов позволит оптимизировать содержание не только редкоземельных активаторов, но и содержание замещающихся катионов/анионов с целью получения материалов с максимальной эмиссией. Особый интерес представляет выявление роли несоразмерной модуляции на люминесцентные свойства.

Поскольку бораты занимают особое положение среди кислородных соединений – в наличии треугольников проявляется сходство с нитратами и карбонатами, а наличие тетраэдров объединяет их по строению с силикатами, ванадатами, фосфатами, то сформулированные для них принципы могут служить основой для развития кристаллохимии некоторых классов неорганических и органических соединений.

Органосиликатные покрытия

Органосиликатные покрытия (ОСП) были разработаны в ИХС РАН в середине XX века и потребность в органосиликатных материалах, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, сохранилась до сих пор [61]. Органосиликатные композиции, которые являются прекурсорами ОСП, представляют собой суспензии тонко диспергированных слоистых гидросиликатов (слюды-мусковита, хризотилового асбеста, талька и др.) и оксидов металлов в среде растворов полиорганосилоксанов. Благодаря слоистому строению силикатов и наличию в них

силанольных групп в сочетании с полисилоксанами после отверждения такая композиция образует единую пространственно сшитую структуру.

Уникальные свойства ОСП сделали их незаменимыми в решении многих научно-технических задач. Особенности состава и структуры органосиликатных материалов обуславливают возможность их использования в экстремальных условиях: при действии солнечной радиации, ионизирующего излучения, повышенной влажности, промышленных и радиационных загрязнений, столь характерных для климата Арктики. Они сохраняют работоспособность от -60° до $+600^{\circ}\text{C}$ [62, 63]. Их применяют во всех климатических условиях в качестве атмосферостойких материалов, антикоррозионных, антиобледенительных, радиационностойких, термостойких покрытий, клеев, герметиков [64, 65].

Необходимо отметить высокую химическую стойкость органосиликатных материалов, нанесенных на металлические и неметаллические поверхности, что позволяет им обеспечивать защиту металлов и их сплавов, дерева, бетона и железобетона в агрессивных атмосферных условиях. ОСП можно рассматривать как перспективные защитные покрытия для надводных частей плавсредств.

Кроме того, уникальность ОСП состоит в их способности при высокотемпературной термообработке ($300-500^{\circ}\text{C}$) переходить из органополимерного в неорганический материал без нарушения целостности и адгезии к подложке. Температура эксплуатации этих покрытий может достигать 700°C , что превосходит термическую устойчивость всех известных лакокрасочных покрытий [61].

За последние тридцать лет в ИХС РАН разработаны органосиликатные композиции для создания атмосферостойких, противокоррозионных термостойких, морозостойких, радиационностойких, антиобледенительных и электроизоляционных покрытий [61-65]. Органосиликатные покрытия нашли широкое применение для защиты от атмосферной коррозии строительных стальных конструкций, технологического оборудования, трубопроводов различного назначения, пролетных строений мостов, стальных и железобетонных конструкций транспортных тоннелей и др.

Особо следует отметить ОСП специального назначения. Большое внимание было уделено органосиликатным композициям, применяемым для формирования противокоррозионных тепло- и радиационностойких покрытий в атомной энергетике. Объекты атомной энергетики предъявляют повышенные требования к конструкционным материалам и покрытиям. В результате целенаправленной разработки были получены радиационностойкие защитные и электроизоляционные ОСП, стойкие в условиях нейтронного облучения в паровоздушной среде действующего реактора при потоке нейтронов от $1\ 021$ (150°C) до $1\ 014$ (280°C) в течение 10-20 тысяч часов.

Проведена работа по усовершенствованию состава защитного ОСП для атомных электростанций. Применяемое в настоящее время покрытие с маркировкой ОС-51-03 имеет недостаточную гидрофобность. Заводы-поставщики оборудования с этим покрытием для повышения гидрофобности добавляли к композиции ОС-51-03 значительное количество связующего, что приводило к недопустимому снижению теплостойкости покрытия. Разработанный нами состав за счет уменьшения содержания пигмента (оксида) имеет повышенное содержание связующего, но его соотношение к силикатам не превышает 2,24:1. Это позволяет придать покрытию необходимую гидрофобность и сохранить теплостойкость до 300°С.

Защитные покрытия на металлические, металлокерамические и неметаллические материалы для службы в экстремальных условиях

В 1955 г. А.А. Аппен возглавил в Институте химии силикатов (ИХС РАН) работы по созданию защитных покрытий на металлические, металлокерамические и неметаллические материалы, предназначенные для службы в экстремальных условиях (высокие температуры и давление, агрессивная среда) в новых областях техники [66]. С 1957 г. он заведовал организованной им лабораторией физикохимии высокотемпературных поверхностных процессов (а затем физикохимии высокотемпературных покрытий).

Направление, созданное А.А. Аппеном, успешно развивались и развиваются в ИХС РАН. Большой вклад в развитие физико-химических основ создания высокотемпературных покрытий и их разработки внесли чл.-корр. РАН В.А. Жабрев, Б.З. Певзнер, к.х.н. М.В. Сазонова, д.х.н. И.Б. Баньковская, д.х.н. С.И. Свиридов.

В настоящее время в институте учреждена премия имени А.А. Аппена, которой ежегодно награждаются молодые учёные института за успешную работу в области высокотемпературных защитных покрытий.

Коллектив лаборатории состоял из четырёх групп, которые занимались синтезом и изучением покрытий на стали, титан, боридные сплавы, углеродные материалы, а также на оксидные и нитридные теплоизоляционные материалы для космических применений.

Разработки физико-химических основ синтеза и изучения свойств высокотемпературных покрытий, предназначенных для защиты графита, углерод-углеродных материалов, боридных сплавов и др. от разрушения в экстремальных условиях службы увенчались их практическим применением.

На основе соединений разных классов – оксидов, боридов, силицидов, карбидов, нитридов и некоторых элементов с помощью модификаторов были получены плотные гетерогенные покрытия, в которых стеклорасплав образуется при нагревании на воздухе. Это открывает возможность осуществить формирование покрытия непосредственно в процессе эксплуатации изделия.

Была разработана серия новых покрытий, эффективно защищающих разные неметаллические материалы от разрушения при высоких температурах и придающих поверхности заданные свойства. Некоторые покрытия нашли применение на практике. Покрытие М-46 использовано на ОК «Буран» для защиты наиболее напряжённых зон теплоизоляции от высокотемпературного разрушения. Покрытие Б-53 было использовано в уникальной ядерной установке «Ромашка». Установка «Ромашка» позволила впервые осуществить прямое преобразование тепловой энергии ядерного реактора в электрическую. Применение покрытия «ИХС» в авиационной промышленности позволило поднять температуру эксплуатации авиационных свечей до 600°C вместо 400°C.

Институт химии силикатов РАН разработал и успешно внедрил стеклокерамическое покрытие для деталей электроизолирующих фланцевых соединений (ЭИФС) из спецсплава на заводе ОАО «ПО Севмаш» в Северодвинске.

На предприятии «Северсталь» в г. Череповец были испытаны защитные покрытия на графитовые электроды с положительным результатом.

В последние 20 лет сотрудники группы защиты неметаллических материалов создали физико-химические основы получения нового поколения защитных высокотемпературных покрытий на разные материалы – углеродные, карбид титана, оксиды магния, кремния и алюминия.

По энергосберегающей технологии получены новые жаростойкие и термостойкие, эрозионностойкие стеклокерамические покрытия на графит и высокоглинозёмную керамику. Изучено влияние наноразмерных модификаторов из волокон диоксида циркония и наноразмерного углерода на электросопротивление и структурные характеристики стеклокерамических покрытий [67].

Разработаны антиокислительные покрытия барьерного типа для защиты углеродных материалов от разрушения при высоких температурах (больше 1 400°C) в окислительных условиях. Покрытие состоит из двух слоёв разного состава: барьерный (внутренний) слой Si-B₄C толщиной 150 мкм наносится на поверхность субстрата, наружный слой Si-B₄C-ZrB₂ наносится поверх барьерного слоя толщиной 100-150 мкм. Благодаря близости их коэффициентов термического расширения барьерный слой имеет прочное сцепление, как с субстратом, так и с подслоем. Покрытия имеют высокую жаростойкость при высоких температурах и обладают способностью к залечиванию случайных дефектов.

Разработана технология новых высокотемпературных (1 400°C) композитов с использованием запатентованных составов матриц, модифицированных реакционно-активными дисперсиями из смесей оксидов алюминия и циркония. Получены в воздушной среде новые композиты и покрытия с низкой температурой формирования (1 000°C) и повышенной стойкостью к окислению при температурах выше 1 400°C,

обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками (термостойкость и прочность).

Синтезированы и изучены новые стеклокерамические материалы и покрытия на основе композиции $B_4C - ZrB_2 - Al_2O_3$. Установлено, что введение наноразмерных частиц оксида алюминия обеспечивает улучшение механических свойств материалов – твёрдости, модуля Юнга, прочности на изгиб и вязкости разрушения [68].

Диффузионное формирование новых стеклообразных материалов и покрытий

Диффузионные процессы лежат в основе многих физико-химических свойств стекол и стеклообразующих расплавов. Кинетика гетерофазных реакций, процессов фазовой дифференциации, ионообменные свойства, удельная электропроводность и числа переноса, вязкость и ряд других свойств определяются в конечном итоге подвижностью катионов или анионных группировок.

Кинетические, термодинамические и энергетические характеристики миграционных процессов тесно связаны со структурой стекла, т.е. ближним и дальним порядком в расположении структурных единиц, с особенностями химической связи. Изучение влияния состава стекол, температуры, размера и заряда диффундирующих частиц на диффузионные процессы и свойства, с ними связанные, ведет к расширению знаний о природе стеклообразного состояния.

Практическое использование диффузионных процессов в стеклообразных системах позволяет создавать новые неорганические материалы с заданными или улучшенными свойствами. Без понимания закономерностей диффузии в многокомпонентных оксидных системах, находящихся в твердом, высоковязком или расплавленном состоянии невозможно решение задач, связанных с модификацией поверхности стекла, интенсификацией процессов ионообменного упрочнения и окрашивания стекла. Особо важно значение процессов диффузии при создании оптических сред с закономерным распределением показателя преломления – самофокусирующих волокон, планарных волноводов, переключателей, микролинз, дифракционных решеток, а также других элементов интегральной оптики, на базе которых возможно создание качественно новых устройств передачи, приема, обработки и хранения информации.

Диффузионные процессы в оксидных стеклах и расплавах имеют существенное значение для технологии металлургических производств, при формировании стеклокерамических покрытий для защиты металлов от воздействия агрессивных сред. В ряду других задач, требующих изучения диффузии в оксидных стеклах следует упомянуть проблему утилизации радиоактивных отходов, путем их стеклования. Проблемы геохимии и геохронологии послужили стимулом для

изучения диффузии различных элементов в вулканических стеклах, базальте, других природных оксидных минералах.

Исследование процессов диффузии в ИХС РАН проводятся на протяжении более полувека. Значительный вклад внесли академик М.М. Шульц, к.х.н. В.В. Моисеев, чл.-корр. РАН В.А. Жабрев, д.х.н. С.И. Свиридов [69].

Под руководством чл.-корр. РАН, д.х.н. В.А. Жабрева – крупного специалиста в области физикохимии и технологии температуроустойчивых функциональных покрытий, были впервые разработаны кинетические принципы формирования температуроустойчивых функциональных покрытий, основанные на исследовании химизма межфазных взаимодействий. Полученные результаты позволили создать новое поколение защитных покрытий для судостроения, авиакосмической промышленности, реакционно связанные интерметаллические покрытия на титан, железо и их сплавы [70].

В.А. Жабрев разработал теоретические основы диффузионной кинетики межфазных взаимодействий. На основании термодинамики неравновесных процессов разработана модель описания многокомпонентной диффузии с учетом сопряжения и переключения потоков, которая позволяет прогнозировать температурно-временные параметры формирования покрытий с учетом координационных и химических взаимодействий.

Значительные результаты в области изучения диффузионных процессов в стеклах и стеклообразующих расплавах, диффузионного формирования новых стеклообразных материалов и покрытий получены научной группой под руководством д.х.н. С.И. Свиридова.

Изучена кинетика ионообменного взаимодействия стекол с расплавами неорганических солей ионообменных процессов для большого числа обменивающихся катионов, составов стекол и солевых расплавов, определены константы равновесия, коэффициенты селективности, рассчитаны энтальпии смешения, коэффициенты активности, другие термодинамические характеристики. Впервые изучен процесс равновесного обмена трех щелочных катионов между стеклом и смесью расплавленных солей.

В результате систематического изучения диффузионных процессов в стеклах, основанного на применении радиоактивных изотопов, установлены факторы, определяющие диффузионную подвижность катионов, отличающихся размером и зарядом, в натриевосиликатных стеклах, содержащих добавки оксидов элементов I-IV групп Периодической системы Д.И. Менделеева.

Обоснована применимость ионообменных представлений для описания взаимной диффузии стеклообразующих расплавов с большими градиентами концентрации различных оксидов щелочных и щелочноземельных элементов.

Исследованы процессы взаимодиффузии расплавов с градиентом концентрации элементов, образующих анионную матрицу стекол. Обнаружено, что механизм взаимодействия расплавов с различной анионной матрицей не всегда определяется потоками компонентов с исходными градиентами.

Установлено, что характер взаимодействия силикатных расплавов с тремя подвижными катионами зависит от сочетания направления потоков диффундирующих катионов. Разработан метод описания многокомпонентной диффузии.

С целью диффузионного формирования стеклообразных материалов с закономерным распределением показателя преломления исследована кинетика взаимодействия натриевосиликатных стекол с расплавами нитратов серебра, калия, рубидия, цезия и таллия в отсутствие и при наложении постоянного электрического поля. Проведение ионного обмена в постоянном электрическом поле не только увеличивает скорость процесса, но и позволяет получить распределение показателя преломления, которое невозможно получить обычным ионным обменом.

Получены систематические данные по влиянию напряженности электрического поля, температуры и времени взаимодействия, влияния состава стекла и солевого расплава на закономерности формирования диффузионной зоны. Определены коэффициенты взаимной диффузии, значения электрической подвижности одновалентных катионов, параметры температурной зависимости.

Установлено, что в отличие от коэффициентов диффузии электрическая подвижность не зависит от размера и химической природы катиона и определяется подвижностью ионов, входящих в состав исходного стекла. Модели, основанные на уравнение Нернста-Эйнштейна, не пригодны для описания кинетики формирования диффузионной зоны при электродиффузии, приводящей к существенному изменению химического состава.

Вопросы кинетики и механизма диффузионных процессов на границе раздела фаз, сопровождаемых одновременным протеканием гетерогенных химических реакций, до сих пор остаются наименее изученными как по наличию экспериментального материала, так и по уровню теоретического осмысления.

Изучен процесс формирования боридных и силицидных фаз на поверхности железа и титана в системе «оксидный расплав» – неорганический восстановитель-металл с целью развития теории реакционной диффузии и создания физико-химических основ получения нового поколения защитных стеклокерамических покрытий с промежуточным барьерным слоем. Установлено влияние температуры, состава оксидного расплава, химической природы восстановителя, типа кристаллической решетки металла на закономерности кинетики роста и структуру образующихся боридных и силицидных фаз.

Разработан метод ионнообменного формирования пористых стекол в расплаве солей, позволяющий получить пористые стеклообразные материалы с заданными свойствами, в том числе магнитными, в зависимости от температуры и времени взаимодействия, влияющих на распределение пор по размеру и строению образующейся структуры.

В ИХС РАН совместно с ЛЭТИ проводятся исследования по разработке физико-химических основ технологии новых стеклокерамических материалов с управляемыми диэлектрическими и магнитными свойствами и принципов создания сверхвысокочастотных устройств на их основе [71]. В частности, была разработана технология получения стеклокompозиционного материала, сочетающего в себе как свойства сегнетоэлектрика, так и ферромагнетика.

Под руководством д.х.н. И.А. Соколова проводятся исследования электро- и термостимулированных диффузионных процессов в щелочных фосфатных и силикатных ниобий-содержащих стеклах для описания воздействия фемтосекундного лазерного излучения на стеклообразные материалы при создании элементов градиентной оптики и лазерной записи.

Золь-гель технология

Исследования в области золь-гель технологии были начаты в середине XX века в Лаборатории тонкопленочных покрытий (ЛТПП), которую возглавлял д.т.н., проф. А.И. Борисенко, а затем д.х.н. С.В. Хашковский [72]. Предложенная И.В. Гребенщиковым еще в 30-ые годы прошлого века идея использования гидролизующихся соединений для получения пленкообразующих зольей и тонких прозрачных пленок в 60-70-х годах была развита сотрудниками лаборатории и впервые применена для получения тонких прозрачных силикатных пленок для целей планарной микроэлектроники. Впоследствии, в 90-х и 00-х годах золь-гель технология стала использоваться для получения каталитических слоев для химических адсорбционных сенсоров, что позволило в 1,5-3 раза повысить их чувствительность к CO и на 20-40% – к CO₂ [73]. Исследования, проведенные в начале 00-х годов и продолжающиеся в настоящее время уже в Лаборатории неорганического синтеза (ЛНС), ставшей преемницей ЛТПП, которую с 2006 по 2019 год возглавляла д.х.н. О.А. Шилова, позволили выявить основные закономерности формирования микро-, мезо- и макроструктуры и морфологии поверхности тонких наноразмерных стекловидных пленок ('spin-on glass' пленок), получаемых из кремнезольей, легированных неорганическими и органическими соединениями [74-76]. Оптимизированные золь-гель технологии получения силикофосфатных и боросиликатных пленок, в том числе легированных РЗЭ, были внедрены в производство кремниевых модулей солнечных элементов

(ООО «СОЛЭКС», Рязань), и металлооксидных газовых сенсоров (ЗАО «Авангард-Микросенсор», Санкт-Петербург).

Целое научное направление сформировалось в ЛНС в 00-ые годы и успешно развивается до настоящего времени в содружестве с сотрудниками СПбГУ. Используя методы золь-гель технологии, разработаны новые биологические активные тонкослойные эпокисилоксановые и эпоксититанатные покрытия, содержащие малотоксичные «мягкие» биоциды, которые оказывают минимальную нагрузку на окружающую среду, но успешно ингибируют развитие плесневых грибов на поверхности каменных памятников культуры, дерева [77, 78]. Охарактеризована надмолекулярная структура этих покрытий и определен механизм взаимодействия кремнезоль с эпоксидной составляющей.

В ЛТПП были разработаны, а в ЛНС усовершенствованы стеклокерамические покрытия, получаемые на основе легированных кремнезоль и высокодисперсных оксидных наполнителей, которые явились альтернативой стеклоэмалевым покрытиям. Получение новых фундаментальных данных о физико-химических процессах, происходящих при гомогенизации золь и суспензий и их нанесении на подложки, позволило оптимизировать и внедрить золь-гель технологию получения электроизоляционных стеклокерамических покрытий в производство стеклянных баллонов рентгеновских трубок в ЗАО «Светлана-Рентген».

Первые в ЛНС проведен цикл исследований агрегативной и седиментационной устойчивости кремнезоль и золь-гель систем «кремнезоль-высокодисперсный оксидный наполнитель» с привлечением классической и обобщенной теорий устойчивости дисперсных систем Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека, проведены расчеты энергии парного взаимодействия частиц в кремнезолях, а также теории гетерокоагуляции, с помощью которой проведены расчеты энергии парного взаимодействия частиц в суспензиях на основе легированного кремнезоля и дисперсного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [79]. Проведенные исследования позволили научно обосновать возможность получения структур ядро-оболочка обработкой высокодисперсных порошков в легированных кремнезолях. Таким образом, в содружестве с СПбГТИ (ТУ) были получены порошки – мультиферроики и совместно с ФГБУН АФИ разработана технология создания функциональных оболочек на поверхности семян ряда важных сельскохозяйственных растений, что позволило улучшить их ростовые показатели, биохимические характеристики и продуктивность.

Физико-химическое конструирование новых материалов

Основным научным направлением лаборатории фазовых равновесий оксидных систем (заведующий лабораторией - д. х. н. проф. Роман Георгиевич Гребенщиков) являлось изучение фазовых равновесий и метастабильных состояний в оксидных системах и установление связи между кристаллохимическими особенностями

строения фаз и видом диаграммы состояния. Было экспериментально исследовано более сотни оксидных систем, открыты и изучены структуры и свойства нескольких десятков новых химических соединений. В итоге на основании систематизированной литературной информации и оригинальных данных, полученных сотрудниками лаборатории, был выпущен многотомный (6 выпусков) — «Справочник по диаграммам состояния тугоплавких оксидов» под редакцией чл-корр. АН СССР Н.А. Торопова, д.х.н. В.П. Барзаковского, д.х.н. Ф.Я. Галахова и д.х.н. Р.Г. Гребенщикова.

В течение нескольких десятилетий в лаборатории решались проблемы химии и кристаллохимии целых классов оксидных соединений. Рассмотрен широкий круг вопросов: изучение фазовых диаграмм состояния различной сложности с разделением их на стабильные и метастабильные, получение новых типов соединений и их твердых растворов в виде поли- и монокристаллов, установление зависимости между строением и свойствами [80-82]. Отметим несколько направлений, ставших визитной карточкой лаборатории фазовых равновесий оксидных систем.

В 80-е гг. XX в. в науке, и в частности в химии и науке о материалах, все больший интерес привлекает изучение влияния размера частиц (размерного фактора) на особенности синтеза, структуры и свойств веществ и материалов. Большое внимание уделяется разработке методов получения наноразмерных частиц и наноструктур различной морфологии — нанослоев, нанотрубок, нанонитей, нанолент, наночастиц изометрической формы, а также наноматериалов (нанокompозитов и керамики) на их основе. Изучаются особенности строения и свойств вещества в наноразмерном состоянии, кинетики и механизма химических и фазовых превращений в конденсированных средах. Разрабатываются теоретические основы процессов образования, строения и свойств наночастиц, химического взаимодействия в наноразмерных системах, структурного и химического превращения в наночастицах и наноструктурах. Преобладание данного направления в тематике лаборатории послужило в двухтысячных годах смене ее названия на Лабораторию физикохимии наноразмерных систем (ЛФХНС).

Одной из наиболее ярких работ, выполненных в начале XXI века, сотрудниками лаборатории уже под руководством член. корр. РАН В.В. Гусарова совместно со специалистами ФГУП «НИТИ имени А.П. Александрова» является разработка на основании знаний о фазовых равновесиях в оксидных системах, моделирования и комплексных физико-химических исследований нового функционального материала для систем безопасности атомных электростанций. Керамическая композиция на основе системы $Fe - Fe_2O_3(Fe_3O_4) - Al_2O_3$ в случае тяжелой аварии на АЭС, сопровождающейся разгерметизацией корпуса реактора должна вступать в химическую реакцию с расплавом активной зоны, охлаждая и разбавляя его, а также окисляя сильные восстановители для снижения возможного

уровня генерации водорода. Данная разработка прошла все этапы проектирования от выбора химического и фазового состава, метода синтеза, определяющего микро- и макроструктуру, до формы изделий и характера их закладки в устройство улавливания расплава активной зоны. После всесторонних испытаний и прохождения российской и международной экспертизы функциональный материал, получивший название «жертвенный» был использован при строительстве в Китае (Тяньвань) атомной электростанции по российскому проекту [83-85].

В 2019 году было принято решение выделить направления, начатые еще в восьмидесятых годах, изучение которых продолжается в настоящее время в рамках Лаборатории физико-химического конструирования и синтеза функциональных материалов.

Ключевыми направлениями исследования во вновь организованной лаборатории стали: синтез и исследование наноматериалов на основе гидросиликатных материалов, работы по нанотрубчатым соединениям со структурой хризотила $(\text{Mg}, \text{Ni}, \text{Fe}, \text{Co})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, изучение электропроводящих и каталитических материалов, сформированных на основе титанатов щелочных металлов и сложных висмутатов, а также работы по разработке новых материалов на основе фосфатов редкоземельных элементов.

Сотрудниками лаборатории проведено исследование механизма и кинетики образования нанотубулярных структур в гидротермальных условиях из различных исходных компонентов. Показано, что варьированием химического состава можно получать нанотрубчатые гидросиликаты с заданными свойствами и морфологией и таким образом решать вопросы, связанные с причинами образования и стабилизации наноструктур, а также вопросы создания практически важных наноматериалов, например для аккумуляирования, иммобилизации или разделения веществ нанокompозитов, сочетающих полимерную матрицу с неорганическими нанотрубками и обладающих ценными механическими и электрофизическими свойствами, изучены процессы заполнения трубок на основе хризотила растворами хлоридов и щелочей, для определения их возможности использования в качестве наноконтейнеров [86-91].

В рамках исследования твердых электролитов и каталитических материалов были изучены физико-химические свойства целого ряда сложных титанатов со структурами рамделлита, голландита, а также $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$, а также слоистых полититанатов типа лепидокрокита и $\text{K}_2\text{Ti}_n\text{O}_{2n+1}$. Было определено влияние состава и метода синтеза на микроструктуру и физико-химические свойства данных материалов, определены оптимальные условия синтеза новых функциональных материалов на их основе, в том числе с использованием методов растворной химии. На основании проведенных исследований показана также возможность применения указанных титанатов в качестве матриц для иммобилизации радиоактивных отходов,

катализаторов окисления СО и водорода, а также хеморезистивных сенсорных материалов. Показано, что при синтезе в гидротермальных условиях калиевые титанаты формируются в форме нанотрубок, обладающих высокой сорбционной и фотокаталитической активностью [92-95]. В системах $MO - Bi_2O_3 - Me'_2O_3$ ($M = Pb, Ca, Sr, Ba; Me' = Fe, Cr, Co$) синтезированы новые композиционные проводники, обладающие смешанной проводимостью по электронам и ионам кислорода. Данные материалы перспективны в качестве электродов топливных элементов [96-98].

Еще одним важнейшим направлением исследования лаборатории являются материалы на основе фосфатов редкоземельных элементов (РЗЭ), перспективные в качестве защитных покрытий, катализаторов при окислительном дегидрировании бутана и изобутана, лазерных сред, люминофоров, скинтилляторов, термоизоляторов и др. Кроме того, керамика на основе наноразмерных ортофосфатов РЗЭ, в том числе композитная, интересна как материал для иммобилизации радиоактивных отходов и как перспективный конструкционный материал. Высокий уровень надежности иммобилизации радионуклидов актинид-редкоземельной фракции в ортофосфатах РЗЭ связан с их химической стойкостью по отношению к водным растворам $HCl, H_2SO_4, HNO_3, NaOH, NH_4OH$, а также к агрессивным расплавам металлов, в том числе урана. Тугоплавкость ($T_{пл} \sim 2000^\circ C$), механические и теплопроводящие свойства этих фаз делают их пригодными для формирования конструктивных деталей микротурбогенераторов [99-107].

Полученные сотрудниками лаборатории результаты являются научной базой для практического применения целого ряда оксидов и гидроксидов в качестве функциональных материалов и одновременно обширным материалом для изучения общих проблем фазообразования, кристаллохимии и теории строения неорганических соединений.

Керамические материалы для альтернативной энергетики и сенсорики

В Лаборатории неорганического синтеза в группе, возглавляемой к.х.н. М.В. Калининой, разработан ряд энергоэффективных методик жидкофазного синтеза оксидных нанодисперсных материалов сложного химического состава, основываясь на методах совместного осаждения гидроксидов металлов (с использованием низкотемпературной обработки), совместной кристаллизации солей, цитрат-нитратного синтеза и золь-гель технологии [108-111]. Все эти методы позволяют снизить энергозатраты за счет снижения температуры синтеза. С использованием этих методов синтезированы ксерогели, высокодисперсные порошки, которые являлись прекурсорами для получения объемных и тонкопленочных керамических наноструктурированных материалов на основе оксидов ZrO_2, CeO_2 , редкоземельных и переходных металлов, востребованных при создании компонентов альтернативных источников энергии – твердых электролитов и

электродов высоко- и среднетемпературных твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), суперконденсаторов, рецепторных слоев резистивных газовых сенсоров и др. [110, 111]. Полученные керамические электролиты и электроды, обладают требуемым конструкционным и функциональным характеристикам: относительная плотность 97%, открытая пористость 2-30%, высокие значения ($\sigma_{800^\circ\text{C}} = 8,2 \cdot 10^{-1}$ См/см) кислородно-ионной, протонной и электронной проводимости. Тонкопленочные твердые электролиты, например, в системе $\text{CeO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$, могут использоваться в среднетемпературных ТОТЭ планарного типа, а также в качестве рецепторных слоёв резистивных газовых сенсоров на кислород – с высокой скоростью отклика (8-14 с) при достаточно низких рабочих температурах (300-450°C).

Биокерамика

Проблема импортозамещения в настоящее время чрезвычайно актуальна. В ЛНС в группе керамических материалов под руководством к.х.н. М.В. Калининой и к.х.н. Н.Ю. Федоренко разработана инновационная технология синтеза (на базе метода химического осаждения) химически чистых белоснежных нанокристаллических порошков $t\text{-ZrO}_2$, отличающаяся от зарубежных технологий простотой и меньшими энергетическими затратами. Подобраны оптимальные составы керамических композиций, которые позволяют создавать новые биоматериалы с высокими физико-химическими и механическими характеристиками, в т.ч. с регулируемой открытой пористостью – от практически беспористой керамики до высокопористой ~48 – 53%. [112, 113] Полученная керамика отвечает требованиям, предъявляемым к материалам для эндопротезирования, и перспективна для применения в медицине.

Цеолиты и слоистые силикаты

В Лаборатории исследования наноструктур под руководством д.х.н. О.Ю. Голубевой проведен цикл работ по изучению возможностей и перспектив направленной гидротермальной кристаллизации алюмосиликатов заданной структуры и морфологии. Исследованы процессы гидротермальной кристаллизации ряда алюмосиликатов различных структур - цеолитов (Rho, мерлиноита, морденита, филлипсита), в том числе одного из самых сложных неорганических соединений – паулингита, ранее не синтезированного отечественными учеными, а также слоистых силикатов со структурами монтмориллонита и каолинита. Разработана методика направленного синтеза алюмосиликатов с заданными характеристиками, такими как размер частиц, определенный фазовый и химический состав, высокие значения ёмкости катионного обмена и пористости. В гидротермальных условиях (350°C, 700 атм.) синтезированы наноразмерные слоистые силикаты со структурой монтмориллонита систематически меняющегося состава – наноглины [114].

Исследовано влияние морфологии частиц алюмосиликатов на их сорбционную способность и биологическую активность.

Проведены комплексные исследования сорбционной способности синтетических алюмосиликатов различной морфологии по отношению к неорганическим катионам, органическим красителям и лекарственным препаратам. Установлено, что синтетические слоистые силикаты со структурой монтмориллонита и цеолиты ряда структур являются эффективными сорбентами ионов тяжелых металлов, органических катионов и биологических молекул, работающие в широком диапазоне концентраций сорбируемых ионов и при различных значениях pH (например, [115]). Показано, что по сорбционной способности синтетические монтмориллониты превосходят природные аналоги и цеолиты, при этом сорбционная емкость монтмориллонита определяется степенью изоморфного замещения в октаэдрических слоях, что позволяет выбирать оптимальный состав, наиболее подходящий для решения поставленных задач. Полученные результаты позволили получить патент на получение нового высокоэффективного сорбента для очистки сточных вод [116]. Исследования показали, что синтетический галлуазит со сферической и наногубчатой морфологиями обладает значительной сорбционной емкостью, частицы с такой морфологией могут быть потенциально использованы в качестве эффективных сорбентов как положительно-, так и отрицательно-заряженных ионов из растворов.

Проведены работы по иммобилизации наночастиц и кластеров серебра внутри и на поверхности синтетических каркасных алюмосиликатов, изучены каталитические свойства полученных образцов. Показано влияния пористо-текстурных характеристик матриц на стабилизацию серебра в различном состоянии (наночастицы, кластеры). Разработаны комбинированные материалы на основе монтмориллонита и цеолитов, модифицированных наночастицами серебра, обладающие высокой адсорбционной способностью по отношению к маркеру эндогенной интоксикации (метиленовому синему), характеризующиеся наличием антимикробной активности и отсутствием токсичности. Кроме того, такие материалы обладают каталитической активностью в ряде неорганических реакций. Показано, что комбинирование цеолитов, монтмориллонита и наночастиц серебра может рассматриваться как один из возможных путей получения новых материалов для решения задач медицины, в частности для получения антибиотических сорбентов, а также новых катализаторов.

Материалы для альтернативной энергетики

В 2006 году в ИХС РАН появилось новое направление фундаментальных исследований «Химическая энергетика и экология», возглавляемое академиком

Я.Б. Данилевичем, а в настоящее время – директором ИХС РАН д.т.н. Кручининой И.Ю.

Основой разработки новых конструкций электромеханического оборудования для малой энергетики было использование возобновляемых экологически чистых источников энергии – гидро-и геотермальных источников, ветра, биомассы, подземного тепла и водорода. Ключевой задачей энергетики является организация трансформации энергии, обеспечивающая минимальные потери при её оптимальном использовании. Возможности реализации новых конструктивных решений для энергетики связаны с применением новых, наноструктурированных материалов с требуемыми электрофизическими, магнитными, механическими и теплофизическими свойствами, способствующими повышению эффективности оборудования. В 2006-2016 годах в ИХС РАН сотрудниками лаборатории химических проблем энергетики изданы монографии по криотурбогенераторам, сверхпроводниковым топологическим электрическим машинам, турбогенераторам малой мощности для децентрализованной энергетики с применением наноматериалов в покрытиях и сердечнике ротора. Разработана комплексная автономная интегрированная ветроэнергоустановка для производства, хранения и преобразования электрической энергии с использованием водорода. Этот проект помимо оригинальных конструкций ветротурбины и ветрогенератора с постоянными магнитами ставил крупные материаловедческие задачи – создания и применения новых материалов для хранения и преобразования электрической энергии, тепла и водорода.

Исследования по реализации идеи применения антифрикционных покрытий на вращающиеся части энергетического оборудования для снижения механических потерь от трения о воздух проводились в кооперации с лабораториями покрытий, лабораторией неорганического синтеза. Синтезированы и испытаны варианты наноструктурированных органосиликатных покрытий на основе кремнийорганических полимеров, эпоксисиликатных и эпоксититанатных и фторсодержащих покрытия, как с высокими показателями гладкости, так и различными степенями гидрофобности.

В настоящее время для экологически чистой энергетики с применением методов численного анализа предложены новые конструктивные решения электрогенерирующего оборудования различных типов, в том числе, патентно-защищенная конструкция дисковой низкоскоростной магнитоэлектрической трехфазной синхронной машины с аксиальным потоком, которая приводит как к снижению общей стоимости материалов при изготовлении, так и повышению КПД на 2%. Расчёты выполняются по разработанной оригинальной методике рационального выбора основных размеров конструкции и параметров ее обмотки, реализованной в программе для ЭВМ. Для бесперебойного снабжения потребителей малых

ветроэлектростанций рассчитан кинетический накопитель энергии (КНЭ) с моментом инерции 100 кгм^2 с учётом вариативности применяемых материалов [117].

Активное участие в постановке работ по химической энергетике принимает Лаборатория неорганического синтеза (ЛНС) под руководством д.х.н. О.А. Шиловой и к.х.н. А.Г. Ивановой (с 2019 г. заведующая лабораторией ЛНС). Ведутся разработки и исследования функциональных материалов для электрохимических устройств – альтернативных источников энергии, к которым относятся топливные элементы (гальванические элементы с внешней подачей топлива – водорода, метана, метанола, органического субстрата и т.д.) и энергонакопителей: водородно-воздушных твердополимерных топливных элементов (ТПТЭ), микробиологических топливных элементов (МТЭ) и суперконденсаторов (СК) с псевдоемкостным эффектом – псевдоконденсаторов (ПК). Усовершенствование экспериментальных или единично выпускаемых электрохимических устройств связано с использованием современных технологий синтеза новых функциональных материалов – электроактивных и каталитических материалов электродов и ионопроводящего материала мембраны.

Разработанные гибридные ионопроводящие мембраны со значением ионной проводимости до 10^{-2} См/см способны функционировать в расширенном температурном диапазоне ($20 - 150^\circ\text{C}$) и имеют более низкую себестоимость по сравнению с мембраной Нафион [118, 119]. В настоящее время, продолжается усовершенствование полученных гибридных мембран для устранения их высокой степени набухания в воде. Разработанный композитный каталитический материал для электродов ТПТЭ содержит меньшее или равное количество платины по сравнению с коммерческим катализатором «E-tek» и, при этом, не уступает ему (если содержится меньшее количество Pt) или превосходит его (если содержится равное количество Pt) по значению электрохимической и каталитической активности [69, 120]. Ведутся разработки би-, триметаллических каталитических материалов, в том числе не содержащих наночастицы металлов платиновой группы.

Интересным и новым направлением исследований, проводимых в ИХС РАН, является разработка функциональных материалов и для МТЭ, который является аналогом ТПТЭ, за исключением используемых в основном на аноде катализаторов – бактериальных клеток. Это электрогенные бактерии, с помощью которых химическая энергия топлива (органического субстрата) превращается в электрическую. Преимущество МТЭ перед водородно-воздушными ТЭ заключается в возможности их применения вдали от цивилизации, т.к. для получения электричества возможно использовать имеющийся «под рукой» субстрат, содержащий микроорганизмы (ил, сточные воды, почва, слюна и т.д.). В настоящее время, известно, что электродный материал МТЭ влияет на эффективность переноса электронов от бактериальной клетки к поверхности электрода. Сотрудниками лаборатории разработаны аноды с композитным покрытием на основе переходных металлов, которое увеличивает

эффективность передачи электронов от бактериальных клеток (электрогенные бактерии, например, родов *Geobacter*, *Shewanella*) к поверхности анода в 2-10 раз [121]. Помимо этого, ведется разработка ионопроводящей мембраны и каталитического материала для катода МТЭ, а также топливной ячейки для проточного МТЭ.

В последнее десятилетие мировым научным сообществом активно ведутся разработки СК, по показателям емкости приближающегося к аккумулятору, но при этом сохраняющего высокую скорость заряда-разряда. Теоретическая емкость ПК может составлять более 1000 Ф/г. В лаборатории получены тонко- и толсто пленочные композитные покрытия электродов на основе оксидов переходных металлов и диоксида кремния с удельной емкостью электроактивного слоя (покрытия) электрода до 350 Ф/г. Экспериментальные симметричные и ассиметричные ПК с композитными электродами имеют высокую электрохимическую стабильность, циклируемость до 900 циклов, равную скорость заряда/разряда [122, 123]. Ведется разработка композитных электродных материалов на основе сульфидов переходных металлов.

Дальнейшее усовершенствование разработанных функциональных материалов позволит их использовать в энергоустановках на основе ТЭ и СК для генерации питания транспортных средств, а также в качестве источника питания для различных электронных устройств.

Кварцевое стекло

ИХС РАН является основоположником отечественной технологии особо чистого кварцевого стекла марки КС-4В – нового материала для волоконной оптики, разработанного в лаборатории особо чистого кварцевого стекла, которая выросла из группы высоких давлений, руководимой Александром Георгиевичем Богановым (1930-1989).

В ИХС РАН работы по изучению перехода кварца в кристобалит и тридимит были начаты в середине 50-х годов прошлого века Н.Н.Синельниковым. В 1959 г. работы были продолжены молодым сотрудником А.Г. Богановым, создавшим сначала группу высоких давлений, а впоследствии лабораторию особо чистого кварцевого стекла (ЛОЧКС), целью которой была разработка технологий синтеза особо чистого кварцевого стекла с предельно малым содержанием гидроксильных групп и с предельно низкими оптическими потерями. После А.Г. Боганова в 1989 г., лабораторию возглавил И.И. Черемисин (1945-2008), специалист в области материаловедения и высококвалифицированный инженер-изобретатель.

И.И. Черемисин - один из основных разработчиков оригинальной отечественной технологии синтеза особо чистого кварцевого стекла КС-4В в крупногабаритных блоках массой до 50 кг. Разработал технологические регламенты процесса синтеза стекла КС-4В и дал пооперационные описания этапов технологии.

Инициатор ряда мероприятий по повышению устойчивости производства стекла в блоках за счет резервирования ключевых систем, узлов и элементов оборудования. Разработал и внедрил установки горячего переформирования блоков стекла в изделия с заданной формой поперечного сечения без уменьшения чистоты стекла и ухудшения его спектрально-оптических и физико-химических свойств.

Под его руководством проводились исследования по изучению влияния окислительно-восстановительных условий синтеза и содержания примесей на спектрально-оптические характеристики, а также на кристаллизацию и радиационно-оптическую устойчивость чистого и особо чистого кварцевого стекла различных типов. В частности, осуществляли перспективные работы по легированию стекла типа КС-4В редкоземельными оксидами, фтором, что позволяет производить наплав стекла в любой, в том числе химически агрессивной среде при температурах до 2000°C и давлениях газовой среды до 25 атм., что в перспективе расширяет возможности использования особо чистого стекла в наукоемких производствах.

Черемисин И.И. с коллегами являются авторами 2 изобретений и 3 патентов, ими опубликовано 34 научных труда по разработке технологий особо чистого кварцевого стекла [124,125].

За цикл работ «Синтез материалов для волоконной оптики плазмохимическим осаждением в СВЧ разрядах» сотрудники ЛОЧКС С.А. Попов и И.И. Черемисин удостоены звания лауреатов Государственной премии за 2001 год в области науки и техники

Во исполнение рекомендаций Совета по технической химии и новым материалам коллегии ВПК от 12.12.2018 г. по проблемным вопросам обеспечения потребностей оборонной отрасли изделиями из кварцевого стекла решением совещания руководителей и учреждений – членов Ассоциации СтеклоСоюза России от 18 июня 2019 г., на ИХС РАН возложена координация работ в России по вопросам возрождения отечественного опыта в области технологий особо чистого кварцевого стекла и по разработке новых технологий его промышленного производства.

Совместно ИХС РАН, ИГХ СО РАН, ИХВВ РАН, НПФ «Кварцевое стекло» и Ассоциацией СтеклоСоюз России разработан Перечень мероприятий по организации и восстановлению опытно-промышленного производства оптического кварцевого стекла марок КИ, КС-4В, КУ-1, КУВИ из отечественного минерального и синтетического кварца для нужд специальной техники и изделий из него, в том числе крупногабаритных.

В настоящее время в ИХС РАН создана лаборатория кварцевого стекла (под руководством к.т.н. А.К. Лесникова) и ведутся научно-исследовательские работы по изучению влияния природы примесей на свойства кварцевого стекла и кристаллических фаз кремнезема.

Заключение

В обзоре в краткой форме представлены результаты научно-исследовательских работ, выполненных коллективом ИХС РАН в период становления и развития Российской Федерации после распада СССР с 1991 по 2021 год. Несмотря на сложности переходного периода в институте сохранились основные направления исследований – по стеклообразному состоянию вещества, в т.ч. пористым стеклам, оксидным керамическим материалам, золь-гель технологии, органосиликатным композициям, высокотемпературной и структурной химии оксидов, химии цеолитов. Появились новые направления, связанные с изучением структурной химии наномира, аддитивными технологиями, моделированием процессов и ряд других. В кратком обзоре невозможно изложить всю полноту научных достижений института. Поэтому приводится обширный список цитируемой литературы, изучение которой позволит желающим более полно познакомиться с теми или иными направлениями исследований ИХС РАН.

Литература

1. Физикохимия силикатов и оксидов / Под ред. М. М. Шульца. – СПб: Наука, 1998. 305 с.
2. Шевченко В.Я. Исследования, разработки и инновации в области керамических и стеклокерамических материалов // Вестник РАН. 2000. Т. 70. № 1. С. 30-56.
3. *Shevchenko V.Ya., Mackay A.I.* Geometrical principals of the self-assembly of nanoparticles // Glass Physics and Chemistry. 2008. V. 34. No 1. P. 1-8.
4. Шевченко В.Я. Структурная химия наномира – новая страница неорганической химии // Физ. и хим. стекла. 2011. Т. 37 № 5. С. 1-16.
5. Данилевич Я.Б., Жабрев В.А., Гончаров В.Д., Кручинина И.Ю., Миронов Б.Н., Цветкова И.Н., Хамова Т.В., Шилова О.А. Разработка технологии получения и хранения водорода с использованием наноструктурированных материалов // Физ. и хим. стекла. 2009. Т. 35. №5. С. 650-664.
6. Воронков М.Г., Вржнев Д.В., Гарабаджису А.В., Кочина Т.А., Няникова Г.Г., Самохин Г.С. Влияние силатранов, герматранов, протатранов и триэтанолamina на жизнедеятельность микроорганизмов. // Докл. Академ. наук. 2011. Т. 439. № 6. С. 838-840.
7. Андреев Н.С., Мазурин О.В., Порай-Кошиц Е.А., Роскова Г.П., Филипович В.Н., Шульц М.М. Явления ликвидации в стеклах / Под ред. М. Шульца. – Л.: Наука [Ленингр. отд-ние], 1974. 219 с.
8. Мазурин О.В., Роскова Г.П., Аверьянов В.И., Антропова Т.В. Двухфазные стекла структура, свойства, применение. Л.: Наука [Ленингр. отд-ние], 1991. 276 с.
9. Порай-Кошиц Е.А. Вступительное слово /Материалы IX Совещания по стеклообразному состоянию //Физика и химия стекла. 1996. Т. 22. № 3. С. 201-204.

10. *Голубков В.В.* Проблема неоднородного строения стекол // Физ. и хим. стекла. 1998. Т. 24. № 3. С. 289-304.
11. *Бешта С.В., Крушинов Е.В., Альмяшев В.И., Вишоль С.А., Мезенцева Л.П., Петров Ю.Б., Лопух Д.Б., Ломанова Н.А., Хабенский В.Б., Баррачин М., Хельман З., Фроме К., Фишер М., Гром В., Боттомли Д., Гусаров В.В.* Фазовые превращения в бинарном разрезе системы $UO_2-FeO-Fe$ // Радиохимия. 2007. Т. 49. № 1. С. 20-24.
12. *Аппен А.А.* Температуроустойчивые неорганические покрытия. Изд. второе, переработ. и доп. Л.: Химия [Ленингр. отд-ние], 1976 г. 296 с.
13. *Харитонов Н.П., Кротиков В.А., Островский В.В.* Органосиликатные композиции: Каталог-справочник. – Л.: Наука [Ленингр. отд-ние], 1980. 90 с.
14. *Николаева Л.В., Борисенко А.И.* Тонкослойные стеклоэмалевые и стеклокерамические покрытия. – Л.: Наука [Ленингр. отд-ние], 1980. 87 с.
15. *Бубнова Р.С. И.В. Гребенщиков* – основатель и первый директор Института химии силикатов РАН. СПб: Арт-Экспресс, 2016. 136. с.
16. *Walakov N.N., Poray-Koshitz E.A.* X-ray investigation of the glassy state // Nature. 1936. V. 137. P. 2370303.
17. *Porai-Koshits E.A., Andreyev N.S.* Low-angle x-ray scattering by glasses // Nature. 1958. T. 182. C. 335.
18. *Голубков В.В.* Структура однофазных и ликвирующих стекол и стеклообразующих расплавов. Дис. докт. хим. наук. 02.00.04. СПб, 1993. 336 с.
19. *Голубков В.В., Онущенко П.А.* О структуре среднего порядка в стеклообразном SiO_2 // Физика и химия стекла. 2012. Т. 38. № S6. с. 797-801.
20. *Vokov N.A., Andreev N.S.* Specific features of light scattering in oxide glasses in the glass transition range // Glass Phys. Chem. 2004. V. 30. No 1. P. 6-13.
21. *Боков Н.А.* Динамика неравновесных структур в интервале стеклования оксидных стекол по данным метода рассеяния света. Дис. докт. физ-мат. наук, 01.04.07. СПб, 2008. 260 с.
22. *Сычева Г.А.* Определение размера критического зародыша кристаллов в литиево- и натриевосиликатных стеклах // Физ. и хим. стекла. 2015. Т. 41. № 3. С. 201-204.
23. *Бойко Г.Г., Бережной Г.В.* Пути миграции гелия в а-кварце и стеклообразном кремнеземе по данным метода молекулярной динамики // Физ. и хим. стекла. 2003. Т.29. № 1. С.65-75.
24. *Shakhmatkin B.A., Vedishcheva N.M., Shultz M.M., Wright A.C.* The thermodynamic properties of oxide glasses and glass-forming liquids and their chemical structure // J. Non-Crystalline Solids. 1994. T. 177. C. 249.
25. *Ведищева Н.М.* Свойства стекол и концепция химического строения стекла. Физ. и хим. стекла. 2012. Т. 38. № S6. с. 797-801.

26. *Vedishcheva N.M., Polyakova I.G., Wright A.C.* Short and intermediate range order in sodium borosilicate glasses: a quantitative thermodynamic approach // *European Journal of Glass Sci. Technol. Part B: Phys. Chem. Glass.* 2014. T. 55. № 6. С. 225-236.
27. *Polyakova I.G.* Alkali borosilicate systems: phase diagrams and properties of glasses // *Phys. Chem. Glass.* 2000. V. 41. No 5. P. 247-258.
28. *Polyakova I.G., Hübert T.* Thermal stability of tin thin films investigated by DTG/DTA // *Surf. Coat. Technol.* 2001. V. 141. No 1. P. 55-61.
29. *Сычѐва Г.А., Полякова И.Г.* Объемное зарождение кристаллов в стеклах на основе доменных шлаков // *Физ. и хим. стекла.* 2013. Т. 39. № 3. С. 370-386.
30. *Fokin V.M., Zanotto E.D., Yuritsyn N.S., Schmelzer J.W.P.* Homogeneous crystal nucleation in silicate glasses: a 40 years perspective // *J. Non-Crystall. Solids.* 2006. V. 352. No 26-27. P. 2681-2714.
31. *Abyzov A.S., Fokin V.M., Rodrigues A.M., Yuritsyn N.S., Schmelzer J.W.P.* The effect of heterogeneous structure of glass-forming liquids on crystal nucleation // *J. Non-Crystall Solids.* 2017. V. 462. P. 32-40.
32. *Юрицын Н.С.* Зарождение кристаллов в натриевокальциевосиликатном стекле при температурах ниже температуры стеклования // *Физ. и хим. стекла.* 2020. Т. 46. № 2. С. 135-147.
33. *Антропова Т.В.* Развитие стекольного направления в Институте химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук // *История науки и техники.* 2008. № 12. С. 10-30.
34. *Мазурин О.В., Роскова Г.П., Аверьянов В.И., Антропова Т.В.* Двухфазные стекла структура, свойства, применение. Л.: Наука. 1991. 276 с.
35. *Антропова Т.В.* Технология пористых стекол и перспективы их применения для биохимического анализа / В кн.: *Исследование, технология и использование нанопористых носителей лекарств в медицине.* Под ред. В.Я. Шевченко. СПб: Химиздат, 2015. С. 285–313.
36. *Антропова Т.В.* Неорганические функциональные стеклообразующие материалы на основе ликвирующих щелочноборосиликатных систем // В кн. «ИХС РАН-80 лет. Современные проблемы неорганической химии» / Под общей ред. акад. В.Я. Шевченко. – СПб: Арт-Экспресс, 2016. 340 с. (С.117-137).
37. *Stolyarova V.L.* High temperature mass spectrometric study of oxide systems and materials. // *Rapid Communications in Mass Spectrometry.* 1993. V. 7. N 11. P. 1022-1032.
38. *Stolyarova V.L., Semenov G.A.* Mass spectrometric study of vaporization processes of oxide systems. Ed. *J.H. Beynon, F.R.S.* Wiley & Sons, Ltd, Chichester. 1994. 434 p.
39. *Stolyarova V.L.* Mass spectrometric thermodynamic studies of oxide systems and materials. *Russian Chemical Reviews.* 2016. V. 85. N 1. P. 60-80. <https://doi.org/10.1070/RCR4549>

40. *Stolyarova V.L.* Review KEMS 2012 till 2017. // *Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry.* 2019. V. 64. P. 258-266. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2018.12.013>
41. *Stolyarova V.L., Vorozhtcov V.A., Masaki K., Costa D.* High-temperature mass spectrometric study of thermodynamic properties in the UO₂-ZrO₂ system. // *Rapid Communications in Mass Spectrometry.* 2020. V. 34. N 19. P. e8862. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi:10.1002/rcm.8862>
42. *Shevchenko V.Ya., Krivovichev S.V.* Where are genes in paulingite? Mathematical principles of formation of inorganic materials on the atomic level // *Struct. Chem.* 2008. V. 19. No 4. P. 571-577.
43. *Shevchenko V.Ya.* What is a chemical substance and how is it formed? // *Struct. Chem.* 2010. V. 36, No 1. P. 1-9.
44. *Shevchenko V.Y., Sychev M.M., Lapshin A.E., Lebedev L.A.* Ceramic materials with the triply periodic minimal surface for constructions functioning under conditions of extreme loads // *Glass Phys. Chem.* 2017. V. 43. No 6. P. 605-607.
45. *Шевченко В.Я., Ковальчук М.В., Орыщенко А.С., Перевислов С.Н.* Новые химические технологии на основе реакционно-диффузионных процессов Тьюринга // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2021. Т. 496. № 1. С. 25-29.
46. *Бубнова Р.С., Филатов С.К.* Высокотемпературная кристаллохимия боратов и боросиликатов. СПб.: Наука. 2008. 760 с.
47. *Филатов С.К., Кривовичев С.В., Бубнова Р.С.* Систематическая кристаллохимия. — СПб: Изд-во СПбГУ, 2019.
48. *Bubnova R.S., Filatov S.K.* Strong anisotropic thermal expansion in borates // *Phys. Stat. Solidi.* 2008. Vol. 245(b), No. 11. P. 2469–2476.
49. *Bubnova R.S., Filatov S.K.* High-temperature borate crystal chemistry // *Z. Kristallogr.* 2013. Vol. 228, No. 9. P. 395–429.
50. *Кржижановская М.Г., Бубнова Р.С., Филатов С.К.* Кристаллография и высокотемпературная кристаллохимия безводных боросиликатов щелочных и щелочноземельных металлов // *ЖСХ.* 2014. Т. 55. S1157–S170.
51. *Filatov S., Bubnova R.S.* Atomic nature of the high anisotropy of borate thermal expansion // *Physics and Chemistry of Glasses.* 2015. V. 56. P. 24-35.
52. *Bubnova R.S., Filatov S.* Self-assembly and high anisotropy thermal expansion of compounds consisting of TO₃ triangular radicals // *Structural Chemistry.* 2016. V. 27. P. 1647–1662.
53. *Филатов С.К., Шаблинский А.П., Волков С.Н., Бубнова Р.С.* Формы упорядочения твердых растворов при понижении температуры // *Журнал структурной химии.* 2017. Т. 58, № 1. С. 142–165.

54. *Bubnova R., Volkov S., Albert B., Filatov S.* Borates – Crystal Structures of Prospective Nonlinear Optical Materials: High Anisotropy of the Thermal Expansion Caused by Anharmonic Atomic Vibrations // *Crystals*. 2017. V. 7(3). P. 93-124.
55. *Krzhizhanovskaya Maria, Bubnova R.S., Filatov S.* Crystalline borosilicates of alkali and alkaline earth metals: hierarchy, fundamental building blocks and thermal expansion // *Phys. Chem. Glasses: Eur. J. Glass Sci. Technol. B*. 2019. V. 60 (4). P. 129–139.
56. *Filatov S.K., Bubnova R.S.* The nature of special points on unit cell parameters temperature dependences for crystal substances // *Z. Kristallogr.* 2007. Suppl. Bd 26. S. 447–452.
57. *Shablinskii A.P., Bubnova R.S., Kolesnikov I., Krzhizhanovskaya M., Povolotskiy A., Ugolkov V., Filatov S.* Novel Sr₃Bi₂(BO₃)₄:Eu³⁺ red phosphor: Synthesis, crystal structure, luminescent and thermal properties // *Solid State Sciences*. 2017. V. 70. P. 93-100.
58. *Shablinskii A.P., Kolesnikov I., Bubnova R.S., Povolotskiy A., Lähderanta E., Filatov S.* A novel thermally stable Ba₃Bi₂(BO₃)₄:Eu³⁺ red phosphor for solid state lighting application // *Journal of Luminescence*. 2019. V. 216. P. 116714.
59. *Kolesnikov I.E., Bubnova R.S., Povolotskiy A.V., Biryukov Y.P., Povolotckaia A.V., Shorets O.Yu., Filatov S.K.* Europium-activated phosphor Ba₃Lu₂B₆O₁₅: influence of isomorphic substitution on photoluminescence properties. // *Ceramics International*, 2021. 47(6). P. 8030–8034.
60. *Krzhizhanovskaya M.G., Volkov S.N., Povolotskiy A.V., Bubnova R.S., Belousova O.L., Kolesnikov I.E., Britvin S.N., Vlasenko N.S., Shilovskikh V.V., Filatov S.K.* Crystal structure, thermal expansion and fluorescence of Sr_{3–1.5x}EuxB_{2+y}Si_{1–y}O_{8–y/2} phosphors. // *Mat. Chem. Phys.* 2021. V. 260. 124151.
61. *Кочина Т.А., Буслаев Г.С., Кондратенко Ю.А.* Органосиликатные покрытия. От истории создания до инноваций. // *Физ. и хим. стекла*. 2020. Т. 46. №1. С. 27-43.
62. *Буслаев Г.С., Кочина Т.А.* Органосиликатная композиция. // Патент РФ № 2520481. Заявл.: 2012151419/05, 30.11.2012; Опубл. 27.06.2014. Бюл. № 18.
63. *Буслаев Г.С., Кочина Т.А., Проскура О.И.* Органосиликатные покрытия, содержащие двузамещенный алюмофосфат, для теплостойкой электроизоляции. // *Физ. и хим. стекла*. 2016. Т.42. №3. С. 395-399.
64. *Буслаев Г.С., Кочина Т.А., Красильникова Л.Н., Милютин П.А., Шилова О.А.* Теплостойкие защитные органосиликатные покрытия для атомной энергетики. // *Физ. и хим. стекла*. 2020. Т. 46. № 4Б.С. 444-448.
65. *Красильникова Л.Н., Цветкова И.Н., Окованцев А.Н., Шилова О.А.* Органосиликатные покрытия как современный способ противодействия обледенению. // *Физ. и хим. стекла*. 2018. Т. 44. № 6. С. 104 – 111.
66. *Баньковская И.Б. Сазонова М.В. Вклад А.А. Аппена в физическую химию высокотемпературных покрытий* // «Физика и химия стекла» 2011. Т.37. №1. С. 154-

158. *Contribution of Aleksandr Alekseevich Appen to Physical Chemistry of High-Temperature Coatings* [Glass Phys. Chem., 2011, vol. 37, no. 1, pp. 111 – 114].
67. *Баньковская И.Б., Коловертнов Д.В.* Развитие работ по созданию покрытий для защиты углеродных материалов при высоких температурах (Обзор по работам ИХС РАН) «Физика и химия стекла» 2017. Т.43. № 2. С.156 - 171. [Glass Phys. Chem., 2017, vol. 43, no. 2, pp. 125-136].
68. *Николаев А.Н., Баньковская И.Б., Рожкова Н.Н.* Композиты и покрытия на основе стеклообразующей системы Si-B4C-ZrB2, модифицированные углеродсодержащими материалами. // Новые огнеупоры 2021 №7 с.50-56.
69. *Жабрев В.А.* Диффузионные процессы в стеклах и стеклообразующих расплавах / В. А. Жабрев. - СПб: [б. и.], 1998. – 188 с.: ил.
70. *Жабрев В.А.* Кинетика гетерофазных реакций при формировании покрытий и технология неорганических порошковых материалов и покрытий функционального назначения. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2002. 422 с
71. *Tumarkin A.; Tyurnina N.; Tyurnina Z.; Mukhin N.; Sinelshchikova O.; Gagarin A.; Sviridov S.; Drozdovsky A.; Sapego E.; Mylnikov I.* Barium-Strontium Titanate/Porous Glass Structures for Microwave Applications. *Materials* 2020, 13, 5639 DOI: 10.3390/ma13245639
72. *Шилова О.А., Хашковский С.В.* Традиции золь-гель синтеза в Институте химии силикатов // История науки и техники. 2008. № 10. С. 39-44.
73. *Шилова О.А.* Силикатные наноразмерные пленки, получаемые золь-гель методом, для пленарной технологии изготовления полупроводниковых газовых сенсоров // Физ. и хим. стекла. 2005. Т. 31. № 2. С. 270-293.
74. *Shilova O.A.* Synthesis and structure features of composite silicate and hybrid TEOS-derived thin films doped by inorganic and organic additives. // *J. Sol.-Gel. Sci. Technol.* 2013. V. 68. P.387–410.
75. *Shilova O.A., Gubanova N.N., Matveev V.A., Ivanova A.G., Arsentiev M.Y., Pugachev K.E., Ivankova E.M., Kruchinina I.Yu.* Processes of film-formation and crystallization in catalytically active ‘spin-on glass’ silica films containing Pt and Pd nanoparticles // *J. Molec. Liquids.* 2019. V. 288. 110996.
76. *Shilova O.A.* Fractals, morphogenesis and triply periodic minimal surfaces in sol-gel-derived thin films. *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 2020. V. 95. P. 599-608.
77. *Khamova T.V., Shilova O.A., Vlasov D.Yu., Ryabusheva Yu.V., Mikhal'chuk V.M., Ivanov V.K., Frank-Kamenetskaya O.V., Marugin A.M., Dolmatov V.Yu.* /Bioactive coatings based on nanodiamond modified epoxy siloxane sols for stone materials // *Inorg. Mater.* 2012. V. 48. No 7. P. 702–708.
78. *Tsvetkova I.N., Krasil'nikova L.N., Khoroshavina Y.V., Galushko A. S., Frantsuzova Yu.V., Kychkin A. K., Shilova O.A.* Sol-gel preparation of protective and decorative coatings on wood. // *J. Sol.-Gel. Sci. Technol.* 2019. V. 92. P.474–483.

79. *Хамова Т.В., Шилова О.А., Голикова Е.В.* Исследование структурообразования в золь-гель системах на основе тетрозоксисилана // Физ. и хим. стекла. Т. 32. № 4. С. 615–631.
80. *Петрова М.А., Мальшиков А.Е., Микиртичева Г.А., Новикова А.С., Петров С.А., Костырева Т.Г.* Термическое поведение дифосфата олова $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{O}_5$ // ЖНХ. 2001. Т. 46. № 1. С. 14–20.
81. *Микиртичева Г.А., Шитова В.И., Петров С.А., Грабовенко Л.Ю., Кучаева С.К., Гребеничиков Р.Г.* Фазовые равновесия в системе CaSiO_3 - BaGeO_3 // ЖПХ. 2001. Т. 74. №8. С. 1235–1238.
82. *Гребеничиков Р.Г., Шитова В.И., Микиртичева Г.А., Петров С.А., Кучаева С.К., Грабовенко Л.Ю.* Фазовые соотношения в разрезе CaGeO_3 - BaSiO_3 тройной взаимной системе CaO , BaO // SiO_2 , GeO_2 // ЖОХ. 2003. Т. 73. № 1. С. 19–22.
83. *Гусаров В.В., Альмяшев В.И., Хабенский В.Б., Бешта С.В., Грановский В.С.* Новый класс функциональных материалов для устройства локализации расплава активной зоны ядерного реактора // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. Об-ва им. Д.И. Менделеева). 2005. Т. XLIX. №4. С. 42–53.
84. *Гусаров В.В., Альмяшев В.И., Хабенский В.Б., Бешта С.В., Грановский В.С.* Взаимодействие материала на основе оксидов алюминия и железа с расплавом металлов // Журн. прикл. химии. 2007. Т. 80, вып. 4. С. 541–548.
85. *S.V. Bechta, V.S. Granovsky, V.B. Khabensky, V.V. Gusarov, V.I. Almiyashev, L.P. Mezentseva, E.V. Krushinov, S.Yu. Kotova, R.A. Kosarevsky, M. Barrachin, D. Bottomley, F. Fichot, M. Fischer* Corium phase equilibria based on MASCA, METCOR and CORPHAD results // Nuclear Engineering and Design. 2008. V. 238. Is. 10. P. 2761–2771.
86. *Корыткова Э.Н., Пивоварова Л.Н.* Гидротермальный синтез нанотрубок на основе гидросиликатов $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ // Физика и химия стекла. 2010. Т. 30. № 1. С. 69–78.
87. *Гофман И.В., Светличный В.М., Юдин В.Е., Добродумов А.В., Диденко А.Л., Абалов И.В., Корыткова Э.Н., Гусаров В.В., Егоров А.И.* Модификация пленок термостойких полиимидов добавками гидросиликатных и углеродных наночастиц с различной геометрией // ЖОХ. 2007. Т. 77. № 7. С. 1075–1080.
88. *Yudin V.E., Otaigbe J.U., Svetlichnyi V.M., Korytkova E.N., Almjashaeva O.V., Gusarov V.V.* Effects of nanofiller morphology and aspect ratio on the rheo-mechanical properties of polyimide nanocomposites // eXPRESS Polymer Letters. 2008. Vol. 2 № 7. P. 485–493.
89. *Кононова С.В., Корыткова Э.Н., Масленникова Т.П., Ромашкова К.А., Кручинина Е.В., Потокин И.Л., Гусаров В.В.* Полимер-неорганические нанокомпозиты на основе ароматических полиамидоимидов, эффективные в процессах разделения жидкостей // ЖОХ. 2010. Т. 80. № 6. С. 966–972.

90. Масленникова Т. П., Корыткова Э. Н. Влияние физико-химических параметров синтеза на рост нанотрубок $\text{Ni}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ и заполнение их растворами гидроксидов и хлоридов щелочных металлов // Физика и химия стекла. 2013. Т. 39. № 1. С. 97–105.
91. Кряжева К. С., Корыткова Э. Н., Масленникова Т. П., Уголков В. Л. Взаимодействие нанотрубок хризотила с водно-спиртовыми растворами при различных температурно-временных параметрах // Физика и химия стекла. 2012. Т. 38. № 1. С. 149–160.
92. Петров С. А., Синельщикова О. Ю., Григорьева Л. Ф., Кучаева С. К., Гусаров В. В. Влияние метода синтеза на механизм образования и диэлектрические свойства $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ // Физика и химия стекла. 2004. Т. 30. № 3. С. 362–366.
93. Sinelshchikova O. Yu., Petrov S. A., Besprozvannykh N. V., Kuchaeva S. K., Vlasov E. A. Features of sol-gel synthesis of new functional materials based on complex oxides with tunnel structure // Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2013. Doi: 10.1007/s10971-013-2988-7. Vol. 68, Issue 3. P. 495–499
94. Синельщикова О. Ю., Масленникова Т. П., Беспрозванных Н. В., Гатина Э. Н. Сорбция ионов стронция на калий-титанатных наночастицах различной морфологии, полученных в гидротермальных условиях // ЖПХ. 2019. Т. 92. № 4. С. 510–515
95. Беспрозванных Н. В., Синельщикова О. Ю., Морозов Н. А., Кучаева С. К., Постнов А. Ю. Синтез и физико-химические свойства сложных оксидов $\text{K}_2\text{M}_x\text{Ti}_{8-x}\text{O}_{16}$ ($\text{M} = \text{Mg}, \text{Ni}, \text{Al}$) со структурой типа голландита // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. Вып. 8. С. 1098–1104.
96. Беспрозванных Н. В., Кучаева С. К., Уголков В. Л., Альмяшев В. И., Химич Н. Н. Синтез и ионная проводимость нового композитного твердого электролита на основе фаз, кристаллизующихся в системе $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--BaO--Fe}_2\text{O}_3$ // Физика и химия стекла. 2012. Т. 38. № 5. С. 665–675.
97. Беспрозванных Н. В., Ершов Д. С., Синельщикова О. Ю. Композиты на основе $\text{SrO--Bi}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$: синтез и электрофизические свойства // Журнал общей химии. 2019. Т. 89. № 12. С. 1955–1960.
98. Ершов Д. С., Беспрозванных Н. В., Синельщикова О. Ю. Фотокаталитические свойства композитов на основе $\text{SrO--Bi}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$, полученных различными методами // Физика и химия стекла. 2020. Том 46. № 4. С. 416–426.
99. Осипов А. В., Мезенцева Л. П., Дроздова И. А., Кучаева С. К., Уголков В. Л., Гусаров В. В. Кристаллизация и термические превращения в нанокристаллах системы $\text{YPO}_4\text{--LuPO}_4\text{--H}_2\text{O}$ // Физика и химия стекла. 2007. Т. 33. № 2. С. 235–240.
100. Осипов А. В., Мезенцева Л. П., Дроздова И. А., Кучаева С. К., Уголков В. Л., Гусаров В. В. Получение и термические превращения нанокристаллов в системе $\text{LaPO}_4\text{--LuPO}_4\text{--H}_2\text{O}$ // Физика и химия стекла. 2009. Т. 35. № 4. С. 568–574.
101. Масленникова Т. П., Осипов А. В., Мезенцева Л. П., Дроздова И. А., Кучаева С. К., Уголков В. Л., Гусаров В. В. Синтез, взаимная растворимость и термическое поведение

- нанокристаллов в системе $\text{LaPO}_4\text{-YPO}_4\text{-H}_2\text{O}$ // Физика и химия стекла. 2010. Т. 36. № 3. С. 435–440.
102. Мезенцева Л.П., Кручинина И.Ю., Осипов А.В., Кучаева С.К., Уголков В.Л., Пугачев К.Э. Керамика из наноразмерных порошков ортофосфатов системы $\text{LaPO}_4\text{-YPO}_4\text{-H}_2\text{O}$ // Физика и химия стекла. 2012. Т. 38. № 5. С. 675–686.
103. Mezentseva L., Osipov A., Ugolkov V., Kruchinina I., Popova V., Yakovlev A., Maslennikova T. Solid solutions and thermal transformations in the nanosized $\text{LaPO}_4\text{-YPO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{LaPO}_4\text{-LuPO}_4\text{-H}_2\text{O}$ systems // J. Ceram. Sci. Tech. 2014. Vol. 5. № 3. P. 237–244.
104. Мезенцева Л.П., Кручинина И.Ю., Осипов А.В., Уголков В.Л., Попова В.Ф., Лапенков А.Ю. Влияние особенностей синтеза на физико-химические свойства нанопорошков и керамических образцов ортофосфатов РЗЭ // Физика и химия стекла. 2015. Т. 41. № 6. С. 905–909.
105. Мезенцева Л.П., Осипов А.В., Акатов А.А., Доильницын В.А., Уголков В.Л., Попова В.Ф., Масленникова Т.П., Дроздова И.А. Химическая и термическая устойчивость фосфатных керамических матриц. // Физ. и хим. стекла. 2017. Т. 43. № 1. С. 126–135.
106. Mezentseva L., Osipov A., Ugolkov V., Kruchinina I., Maslennikova T., Koptelova L. Sol-gel synthesis of precursors and preparation of ceramic composites based on LaPO_4 with Y_2O_3 and ZrO_2 additions. // J. Sol-Gel Sci. Technol. 2019. V. 92. N 2. P. 427–441.
107. Mezentseva L.P., Osipov A.V., Akatov A.A., Doil'nitsyn V.A., Pugachev K.E., Koptelova L.A. Ceramic matrix composites based on lanthanum orthophosphate for disposal of high-level radioactive waste. // Glass Phys. Chem. 2019. V. 45. No6. P. 565–572.
108. Тихонов П.А., Попов В.П., Арсентьев, М.Ю., Подзорова Л.И., Ильичева, Чернышева КВ., Андреева Н.С. Керамика и тонкие слои на основе трехкомпонентной системы $\text{ZrO}_2\text{-CeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ как перспективные твердые электролиты // Огнеупоры и технич. керам. 2009. № 6. С. 7–11.
109. Егорова Т.Л., Калинина М.В., Симоненко Е.П., Симоненко Н.П., Шилова О.А., Севастьянов В.Г., Кузнецов Н.Т. Жидкофазный синтез и физико-химические свойства ксерогелей, нанодисперсных порошков и тонких пленок на основе системы $\text{CeO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ / Т.Л. Егорова // Ж. неорг. химии. 2016. Т.61. №9. С. 1115–1124.
110. Калинина М.В., Симоненко Т.Л., Арсентьев М.Ю., Федоренко Н.Ю., Тихонов П.А., Шилова О.А. Протонопроводящая керамика на основе гафната и церата бария, легированных оксидами циркония, иттрия и иттербия для электролитов топливных элементов // Перспективн. матер. 2021. № 2. С. 41–51.
111. Арсентьев М.Ю., Калинина М.В., Тихонов П.А., Морозова Л.В., Егорова Т.Л., Шилова О.А. Формирование и исследование сенсорных тонких слоев на основе оксидов циркония, редкоземельных элементов (Ce, Y, Tb) и получение МОП структур на их основе / М. Ю. Арсентьев, // Физ. и хим. стекла. 2014. Т. 40. № 6. С. 820–826.

112. *Kalinina M.V., Kovalko N.Yu., Suslov D.N., Andozhskaia Yu.S., Galibin O.V., Shilova O.A.* Effect of highly porous bioceramics based on ZrO_2 – Y_2O_3 – CeO_2 system on the biological tissues of experimental animals // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2021. Vol. 12. No. 2. P. 370–376.
113. Патент №2741918 RU. Федоренко Н.Ю., Калинина М.В., Шилова О.А., Пономарева М.А. Способ получения биосовместимой пористой керамики на основе диоксида циркония для эндопротезирования. МПК С04В 35/488, С04В 35/626, С04В 38/06, В82У 40/00. Зарег. 29.01.2021 г. (Заявка № 2020122043, приоритет от 29.06.2020г.); Бюл. № 4, 29.01.2021.
114. Голубева О.Ю., Ульянова Н.Ю., Костырева Т.Г., Дроздова И.А., Мокеев М.В. Синтетические наноглины со структурой монтмориллонита: получение, структура и физико-химические свойства. // *Физ. и хим. стекла*. 2013. Т.39. № 5. С. 753-763.
115. *Golubeva O.Yu., Pavlova S.V., Yakovlev A.V.* Adsorption and in vitro release of vitamin B1 by synthetic nanoclays with montmorillonite structure // *Applied Clay Science*. 2015. V. 112-113. P. 10-16.
116. Патент RU. Способ получения сорбента для очистки растворов от ионов тяжелых металлов /Голубева О.Ю., Ульянова Н.Ю., Яковлев А.В., Дякина М.П. / №2014113882 от 08.05.2014. опублик.20.08.2015. Бюл. 23.
117. *ИХС РАН – 80 лет.* Современные проблемы неорганической химии. Под общей редакцией академика В.Я. Шевченко. Санкт-Петербург, 2016. С. 340с., с илл.
118. Патент №2505481 РФ. Способ получения силикофосфатного протонпроводящего материала, преимущественно для мембран топливных элементов (варианты) / Шилова О.А., Цветкова И.Н. / заявл. 28.04.2011; опубликовано 27.01.2014, Бюл. № 3.
119. Лёзова О.С., Загребельный О.А., Краснопева Е.Л., Баранчиков А.Е., Шилова О.А., Иванова А.Г. Разработка и исследование ионопроводящих мембран на основе сшитого поливинилового спирта // *Физика и химия стекла*. 2021. Т. 47. № 2. С. 190-200.
120. Иванова А.Г., Губанова Н.Н., Загребельный О.А., Краснопева Е.Л., Кручинина И.Ю., Шилова О.А. Разработка функционального композитного каталитического материала на основе Pt@C для электродов твердополимерного топливного элемента // *Журнал неорганической химии*. 2021. Т. 66. № 5. С. 678-681.
121. *Masalovich M., Ivanova A., Zagrebelnyy O., Nikolaev A., Loginov V., Galushko A., Baranchikov A., Shilova O., Kruchinina I.* Fabrication of composite electrodes based on cobalt (II) hydroxide for microbiological fuel cells // *Sol-gel Sci. Technol*. 2019. V. 92. P. 506–514.
122. Иванова А.Г., Загребельный О.А., Цигас А.А., Шилова О.А. Синтез и электрофизические свойства наноксидного слоя псевдоконденсатора // *Физ. и хим. стекла*. 2012. Т. 38. № S6. С. 934-939.

123. *Иванова А.Г., Карасев Л.В., Масалович М.С., Загребельный О.А., Мякин С.В., Сапрыкина Н.Н., Баранчиков А.Е., Кручинина И.Ю., Шилова О.А.* Разработка и исследование электроактивной пасты электрода псевдоконденсатора на основе MnO_2 // Физ. и хим. стекла. 2020. Т. 46. № 1. С. 99-107.
124. *Боганов А.Г., Попов С.А., Руденко В.С., Черемисин И.И., Карасик А.А., Елисеев Н.П., Вальцен Е.Г.* Установка для наплава и компрессии блоков особо чистого кварцевого стекла. Описание к авторскому свидетельству SU 1655917 A1. Опубликовано 15.06.91.
125. *Боганов А.Г., Вильцен Е.Г., Черемисин И.И., Руденко В.С., Елисеев Н.П.* Способ получения порошкообразного синтетического диоксида кремния. Описание к авторскому свидетельству SU 1 376 488 A1. Опубликовано 30. 11. 1994.

2.4. ОТДЕЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК

Зоологический институт Российской академии наук в постсоветский период

С.Ю. Синёв, И.Г. Данилов, Н.С. Чернецов

Зоологический институт РАН является ведущим и системообразующим научным учреждением России в области зоологии и экологии, осуществляющим фундаментальные исследования разнообразия животного мира. Основные направления научной деятельности ЗИН соответствуют приоритетам Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации и Национального проекта «Наука» и базируются на изучении материалов Уникальной фондовой коллекции института – самой крупной зоологической коллекции в России и одной из крупнейших в мире.

Последние 30 лет принесли существенные изменения как в плане содержания и методологии проводимых исследований, так и в научно-организационном плане. Наиболее ответственной задачей администрации и коллектива института было бережное сохранение в непростых условиях лучших традиций отечественной зоологической школы, всех основных направлений научной деятельности и обеспечивающего их развитие кадрового потенциала. Вместе с тем, необходимо было в полной мере соответствовать современному уровню исследований, применяя весь арсенал новейших методических и методологических подходов.

Одной из важных особенностей постсоветского периода стало значительное расширение научных связей института, что позволило расширить и диверсифицировать международное сотрудничество, экспедиционную деятельность и, как результат, распространить сферу исследований, ранее зачастую ограниченную Палеарктикой, на весь мир. В последние годы сотрудники Зоологического института все в большей мере вовлекаются в выполнение крупных интернациональных программ и проектов, что позволяет решать актуальные научные проблемы, связанные с динамикой биологического разнообразия, глобальным потеплением, охраной окружающей среды, рациональным использованием природных ресурсов, освоением Арктики и пр.

Другой ключевой особенностью постсоветского периода стали разработка и внедрение в практику зоологических исследований комплекса молекулярно-генетических методов (ДНК-баркодинг, полногеномное секвенирование) и разнообразных компьютерных технологий (хранение, первичная обработка и анализ данных, информационно-поисковые системы, ГИС-технологии и пр.). Это потребовало проведения исследований по новым для института направлениям, таким как молекулярная систематика, палеогеномика, филогеография, а также создания

новых научных лабораторий. При морфологических исследованиях, наряду с традиционными гистологическими и гистохимическими методами с привлечением световой и электронной микроскопии, широкое применение получили новейшие методы иммуноцитохимии, конфокальная лазерная и мультифотонная микроскопия, компьютерная томография.

Все последние годы исследования велись по целому ряду крупных тем государственного задания (ранее – по темам Отделения биологических наук РАН). Кроме того, сотрудники института принимали непосредственное участие в реализации многочисленных федеральных и региональных научных программ и проектов, получивших финансовую поддержку государственных научных фондов Российской Федерации и фондов иностранных и международных организаций, в разработке научных прогнозов и проведении научно-технических экспертиз, в проведении научных экспедиций по сбору зоологических объектов в различных регионах нашей планеты (практически во всех регионах России, странах бывшего Советского Союза, Ближнего Востока, Юго-Восточной Азии, Центральной и Южной Америки, Африки и др.).

Наиболее крупные научные достижения ЗИН РАН постсоветского периода группируются по следующим направлениям: систематизация биологического разнообразия в самых разных его аспектах; эволюция и филогения основных групп животных; эпизоотология и паразитология; эволюционная морфология; физиология и экология животных; гидробиология и экология водных экосистем; исследование Арктики и Антарктики; разработка специализированных компьютерных информационно-поисковых систем.

Центральное место в исследованиях, проводимых в Зоологическом институте РАН, продолжало занимать изучение таксономического разнообразия отечественной и мировой фауны на основе глубокого сравнительно-морфологического и морфофункционального анализа представителей различных групп из всех классов животного мира, выявление их биологических и этологических особенностей и закономерностей географического распространения, разработка вопросов классификации, эволюции и филогении. Приоритетом традиционно служит подготовка фундаментальных комплексных таксономических ревизий отдельных систематических групп в объеме Палеарктики и мировой биоты в целом, а также изучение генезиса региональных и глобальных фаун и их инвентаризация. За последние 30 лет опубликованы 7 томов по насекомым, иксодовым клещам и млекопитающим в серии «Фауна России и сопредельных стран», 8 томов по различным группам насекомых и млекопитающих в серии «Определители по фауне России, издаваемые Зоологическим институтом РАН» и ряд других крупных монографий. Особое место занимает издание, не имеющее аналогов в мировой

литературе, фундаментального труда «Протисты. Руководство по зоологии», вышедшее в 3-х частях в 2000–2011 гг.

Важнейшим результатом таких исследований стало определение статуса и состава многочисленных семейств, подсемейств и родов животных, выявление многих сотен новых для науки таксонов видового, а также родового и более высокого ранга. Ежегодно сотрудниками института описывается от 200 до 250 новых для науки видов животных (причём не только беспозвоночных, но и рыб, пресмыкающихся и даже млекопитающих), что вносит существенный вклад в общие представления о биологическом разнообразии.

Особенностью последних лет стал переход к так называемой интегративной таксономии, в рамках которой осуществляется широкий синтез данных, полученных с использованием как классических методов сравнительной и эволюционной морфологии, включая изучение структуры клеток с помощью современных методов микроскопии, так и инновационных методов молекулярной систематики. Для обоснования филогении и построения системы привлекаются не только рецентные, но и ископаемые формы, используются новейшие цитогенетические и молекулярно-генетические методы, которые открывают новые возможности в плане реконструкции филогений и описания так называемого «криптического» разнообразия, в некоторых группах животных весьма значительного. В частности, все чаще применяются методы молекулярной диагностики, основанные на анализе коротких видоспецифичных фрагментов нуклеиновых кислот (ДНК-штрихкодирование), пионерские работы, которые проведены в Зоологическом институте РАН. Разработан и успешно апробирован на практике подход к выявлению криптических видов, основанный на совместном использовании молекулярных и хромосомных маркеров, который позволяет идентифицировать морфологически неразличимые виды-двойники, определять видовую принадлежность личиночных стадий и диагностировать любые, даже мельчайшие остатки животных. Предложены методология и конкретный алгоритм объединения традиционных, основанных на морфологии гипотез о видах с таксономическими гипотезами, которые возникают в ходе видовой делимитации, основанной на анализе молекулярных маркеров. Показано, что молекулярно-генетические методы поставляют новые признаки и являются мощным инструментом таксономии, а цитогенетические методы, с помощью которых выявляются хромосомные и геномные перестройки, могут быть использованы также для мониторинга состояния природных популяций в условиях усиливающегося антропогенного воздействия.

В тесной связи с проводимыми таксономическими ревизиями рассматривались проблемы общей и частной зоогеографии, описания и генезиса региональных фаун, в первую очередь Евразии. Разработан ряд научных гипотез по общим вопросам биогеографии, эволюционной биологии и экологии рыб, в частности, гипотеза

происхождения шельфовой и литоральной ихтиофауны Магеллано-Фолклендского региона от глубоководных бореально-тихоокеанских мигрантов и гипотеза трансокеанского (неарктического) расселения вторично глубоководных бореально-тихоокеанских видов до глубин северной Атлантики и Арктики. Впервые установлен таксономический состав многих локальных и региональных фаун, в том числе до сих пор недостаточно изученных территорий Арктики, Субарктики и некоторых тропических стран. Особое внимание уделялось фауне Евразии, в первую очередь России, а также районов Мирового океана, включая Арктику и Антарктику, однако существенный вклад внесен и в изучение фаун ряда тропических областей, особенно Юго-Восточной Азии. Многолетние исследования тропических лесов Вьетнама, по существу, открыли новую фауну амфибий и рептилий, втрое увеличив количество известных для страны видов, и выявили существенное криптическое разнообразие в этих группах животных. Важным открытием стало обнаружение и описание новой фауны липаровых рыб Австрало-Новозеландского региона. Были созданы первые отечественные каталоги насекомых из отрядов чешуекрылых и перепончатокрылых, четырехтомный каталог паразитов пресноводных рыб Северной Азии, каталоги нескольких семейств беспозвоночных и протистов в объеме мировой фауны, атлас пресмыкающихся Северной Евразии и др.

В ходе исследований разнообразия животного мира были не только осуществлены исключительные по своим масштабам описание и критический анализ накопленного фактического материала, но и сделан существенный вклад в решение некоторых важных теоретических проблем. Так, обнаружен и исследован новый, ранее неизвестный механизм эволюции геномов у животных, основанный на межвидовой гибридизации и последующей сортировке хромосом, полученных от родительских форм. Показано, что выявленный механизм обуславливает появление нового кариотипа и может приводить к возникновению новых видов в природе, участвуя, таким образом, в формировании биологического разнообразия. В результате сравнительного анализа транскриптомов одноклеточных и многоклеточных опистоконт выдвинута гипотеза о независимом происхождении жизненных циклов грибов и паразитических простейших водорослей от общего полиморфного предка. Проанализирована роль формообразовательных механизмов (морфогенезов) в эволюции и сделан вывод о том, что теория естественного отбора, основанная на случайных процессах, может быть совместима с концепцией номогенеза, согласно которой эволюция определяется внутренними факторами организмов.

В процессе изучения различных типов систем «паразит-хозяин» проанализированы закономерности формирования морфологического и таксономического разнообразия, географического распространения паразитических и кровососущих клещей и насекомых. В результате получен большой объем новых сведений об особенностях эволюции и экологии различных эктопаразитов птиц и

млекопитающих, включая иксодовых клещей, блох и комаров – переносчиков опасных для человека заболеваний. Показаны особенности дифференциации экологических ниш в сообществах эктопаразитов лесных грызунов и насекомых, изучена паразитарная система «мелкие млекопитающие – иксодовые клещи – возбудители инфекций» в природных очагах болезни Лайма и клещевого энцефалита. Публикацией двух итоговых монографий успешно завершены многолетние исследования в области экологии и физиологии кровососущих комаров.

Проведены пионерные исследования по биоразнообразию паразитических беспозвоночных в прибрежье арктических морей, впервые определена специфика трансмиссии паразитов в Арктике и дан прогноз по возможному влиянию на этот процесс происходящих климатических изменений и растущего антропогенного пресса. Выполнены основополагающие работы по систематике, жизненным циклам, происхождению и эволюции фитопатогенных нематод, а также впервые исследованы нематоды почв вечной мерзлоты Сибири и Антарктиды, что сделало возможным биоиндикацию и прослеживание истории формирования полярных почв. Осуществлено фундаментальное исследование происхождения и эволюции жизненных циклов у трематод. Обнаружено уникальное явление прямого контакта паразитических корнеголовых раков с нервной системой ракообразного «хозяина», при помощи которого паразит управляет его поведением. Опубликована коллективная монография «Козволюция паразитов и хозяев», в которой прослежены пути коэволюции с хозяевами ряда крупных таксонов паразитических протистов, червей и членистоногих в контексте экологических событий прошлых эпох и современных трендов трансформации экосистем.

Исследования в области эволюционной морфологии были направлены на выявление фундаментальных закономерностей и особенностей эволюции многоклеточных животных на примере представителей беспозвоночных, что является принципиально важным для понимания возникновения и развития биоразнообразия и установления филогенетических связей различных групп животных, а также построения на этой основе современной системы животного царства. Наряду с традиционными гистологическими и гистохимическими методами с привлечением световой и электронной микроскопии, в этих исследованиях использовались новейшие методы иммуноцитохимии и молекулярной генетики, конфокальная лазерная и мультифотонная микроскопия, что позволило проводить более глубокие комплексные и широкомасштабные исследования. В последнее время особое внимание уделяется изучению эволюционных и онтогенетических особенностей становления и развития нервной системы, рецепторных органов и опорно-двигательного аппарата в изучаемых группах животных.

В результате детального исследования регуляции состояния зимнего покоя у перепончатокрылых паразитоидов-яйцеедов впервые для насекомых выявлено

трансгенерационное, стабильное на протяжении 3–4 поколений, влияние температуры и длины дня на индукцию диапаузы. Кроме того, впервые для насекомых с полным превращением было обнаружено ингибирование индукции диапаузы на протяжении нескольких поколений после диапаузирующего. Оба эффекта, судя по имеющимся данным, основаны на эпигенетическом наследовании, т.е. на передаче от одного поколения к другому постепенно затухающих изменений экспрессии генов.

На Биологической станции «Рыбачий», являющейся филиалом Зоологического института РАН активно развивались исследования миграций животных, включая физиологическую и поведенческую основу этой важнейшей адаптации. За последние годы получены новые данные о навигационных способностях перелетных птиц, в частности, доказано использование ими магнитной «карты» при поиске цели. Открытие нового явления в жизни мигрирующих птиц – ночных полетов вне сезонов миграции, а позже и описание механизма, лежащего в основе такой внесезонной перестройки суточного ритма локомоторной активности, создало целое направление в изучении этих, до сих пор не известных, годовых сезонных явлений жизни птиц. Наличие самого современного оборудования, симулирующего магнитное поле любого района Земли, а также значительная протяженность нашей страны, позволяющая сравнивать данные ориентационных экспериментов при реальном смещении птиц с симулированными, позволило Зоологическому институту занять лидирующие позиции в исследованиях ориентации и навигации.

К числу основных направлений работы Зоологического института относится исследование организации водных экосистем разных типов, инвентаризация фауны морских и континентальных водоемов, систематика и филогения отдельных групп водных беспозвоночных. При этом большое значение имели разработка структурно-функционального подхода к изучению функционирования экологических систем водоемов и водотоков, позволившего количественно оценить изменения в экосистемах водоемов, подвергающихся различным видам экологического стресса, создание методологических основ сохранения биологического разнообразия и биологических ресурсов водных экосистем, методика описания и анализа динамики экологических систем континентальных водоемов под воздействием естественных и антропогенных факторов среды: климатических изменений, загрязнения водоемов, вселения чужеродных видов животных. Сформулировано понятие функциональной экологии животных и выяснены механизмы, определяющие число видов в водных экосистемах в зависимости от морфометрии водоемов, их трофического статуса, географического положения и степени минерализации воды. В монографии «Продукционная гидробиология» подведены итоги исследований потоков энергии, вещества и информации в водных экосистемах, закономерностей роста и размножения водных животных, динамики численности и биомассы их популяций, предложены меры устойчивости и выносливости популяций, сообществ и экосистем,

которые позволили количественно нормировать степень влияния факторов на сообщества гидробионтов и экосистемы в целом. Опубликовано более 28 монографий, определителей и атласов беспозвоночных животных континентальных водоемов, среди которых шеститомный «Определитель пресноводных беспозвоночных России» и двухтомный «Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России».

В начале текущего столетия была сведена воедино вся доступная информация по видовому составу свободноживущих беспозвоночных северных морей России, что позволило в полтора раза расширить существовавшие представления о видовом богатстве зообентоса в Арктике. Проанализирована пространственная конфигурация показателей биоразнообразия и местоположение границы между бореальной и арктической биогеографическими областями на фоне температурно-ледового режима. Предложены гипотезы формирования высокого продукционного потенциала зообентоса Баренцева моря и факты, их подтверждающие. Проведена оценка совместного и отдельного влияния рыбного промысла и климата на донное население водоема в целом и его отдельных районов. Получены интересные новые данные по биоразнообразию, распределению и временной динамике основных компонентов экосистем Белого моря и сопредельных водоемов, исследованы жизненные циклы и адаптации морских организмов к факторам среды в условиях Арктических и субарктических морей. Проводится мониторинг сезонной и многолетней динамики водных экосистем и влияния изменений климата на их состояние. Существенно актуализировались многолетние исследования закономерностей функционирования нестабильных водоёмов с непостоянной соленостью и современного состояния Аральского моря и его биоты, включая поиск путей спасения этого озера.

Традиционными для Зоологического института являются палеозоологические исследования, включающие как описания новых для науки видов ископаемых животных (насекомые, моллюски, позвоночные), так и проекты по комплексному изучению древних фаун позднего мезозоя и кайнозоя. Предложена оригинальная концепция происхождения отряда жесткокрылых насекомых и схема его последующей дивергенции с учетом новых палеонтологических и морфологических данных, позволивших реконструировать предполагаемый облик, образ жизни и особенности онтогенеза предка жуков; при этом показана эффективность таких новых инструментов исследования ископаемых насекомых, как электронная растровая и конфокальная микроскопия, рентгеновская микротомография, а также трехмерная реконструкция с использованием современных компьютерных программ. Уникальная находка была сделана в Арктике, откуда были впервые описаны ископаемые кости карликового мамонта с острова Врангеля, который вымер намного позже своих крупных сородичей, обитавших на материке. Изучение костных остатков древних

животных Евразии позволило сделать вывод о том, что домашние собаки жили рядом с человеком на территории европейской части России еще в ледниковую эпоху, около 15 тысяч лет назад. Выполнен большой цикл исследований по фаунам ископаемых позвоночных позднего мезозоя и кайнозоя Северной Евразии, в результате которого были описаны многочисленные новые ископаемые таксоны всех групп позвоночных от рыб до млекопитающих. Особенно резонансными являются исследования палеонтологических материалов по динозаврам России, в результате которых существенно увеличилось как их таксономическое разнообразие, так и количество известных местонахождений. Фундаментальное значение имеет недавно опубликованное справочное издание «Ископаемые позвоночные России и сопредельных стран. Ископаемые рептилии и птицы» (часть 1 – 2008, часть 4 – 2017), в котором сотрудниками института подготовлены разделы по летающим ящерам и черепахам.

Начиная с 1993 г., в Зоологическом институте ведется большая работа по компьютеризации основных процессов накопления и анализа коллекционных, экспертных и литературных данных по систематике и фаунистике различных таксонов животных, связанная с использованием инновационных информационных технологий: созданием специализированных компьютерных таксономических, фаунистических, библиографических и коллекционных баз данных и электронных определителей, получением и обработкой высококачественных цифровых изображений и пр. Ее результатом стало появление оригинальной информационно-поисковой системы по образцам фондовых коллекций ЗИН РАН, таксономической основой которой является иерархический классификатор беспозвоночных и позвоночных животных. Применяемые при этом программные алгоритмы основаны на передовых отечественных (стандарт ZOOCOD для иерархических классификаторов) и мировых разработках (стандарты геореференсирования точек находок National Science Foundation, прикладные интерфейсы он-лайн картирования Google Maps API и др.), что подразумевает возможность последующей интеграции создаваемой информационной системы в распределенные зоологические он-лайн ресурсы. За последнее время разработана основа информационно-поисковой системы по уникальным типовым (эталонным) экземплярам фондовой коллекции института, содержащей сведения о более чем 3500 образцах и около 13500 изображений животных, что многократно повышает их доступность для научной общественности. Часть информации выставлена на международной платформе GBIF.org.

Основные результаты проведенных в Зоологическом институте РАН за последние 30 лет исследований отражены в более чем 150 научных и научно-популярных книгах, а количество ежегодно публикуемых в ведущих отечественных и международных научных журналах статей превышает 350. Они органично интегрируются в систему аналогичных исследований за рубежом и полностью

соответствуют мировым стандартам, что обеспечивает повышение престижа отечественной зоологической науки и укреплению статуса Зоологического института как одного из крупнейших мировых центров изучения проблем описания, сохранения, восстановления и рационального использования биологического разнообразия.

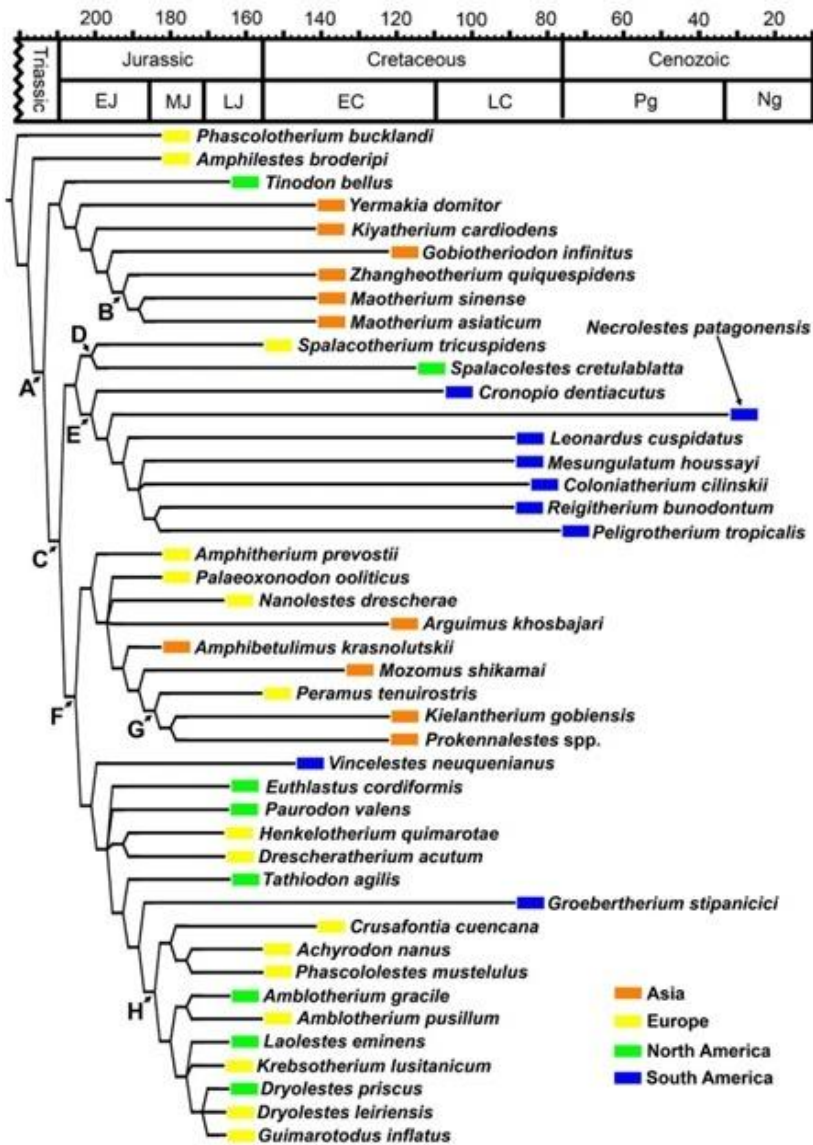


Рис. 1. Новая филогения для базальных Trechnotheria и Cladotheria и родственные связи эндемичных позднемеловых млекопитающих Южной Америки

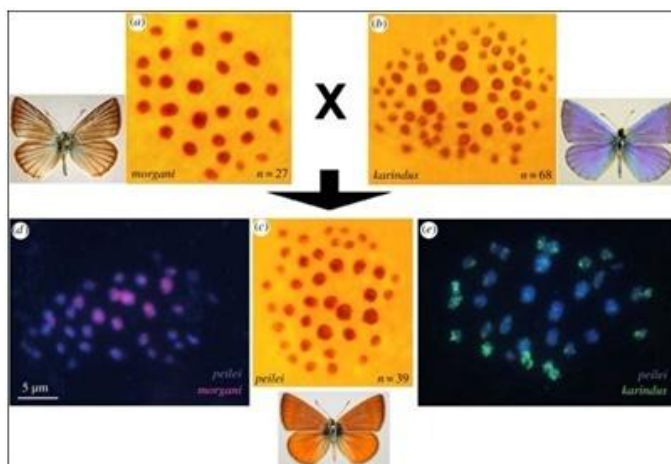


Рис. 2. Механизм эволюции эукариотического генома и новый способ видообразования, основанные на межвидовой гибридизации и последующей фиксации в гомозиготе новой комбинации хромосомных слияний и разделений

2.5. ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ

Санкт-Петербургское отделение ИГЭ РАН: научные результаты и прикладные исследования

В.Г. Румынин

Институт геоэкологии РАН был создан в 1996 г. на базе Инженерно-геологического и геоэкологического научного центра и Научно-инженерного и координационного сейсмологического центра РАН в Москве. Одновременно, согласно постановлению Президиума РАН от 21.05.1996 г. №95, Комплексная лаборатория гидрогеологии и природосберегающих технологий РАН и Госкомвуза РФ, находящаяся в Санкт-Петербурге, была преобразована в Санкт-Петербургское отделение ИГЭ РАН, которому, как организации двойного подчинения, было выделено помещение в Санкт-Петербургском Государственном университете, где оно и располагается поныне.

Основным направлением деятельности Отделения, ведущего свою историю от гидрогеологической школы Ленинградского горного института, традиционно является инженерная гидрогеология и гидрогеоэкология, а именно – разработка и внедрение наукоемких полевых и расчетных технологий изучения и прогноза воздействия на подземные воды промышленных объектов, – воздействия, связанного в первую очередь, с процессами миграции загрязняющих веществ в подземной гидросфере. Одним из основоположников этого направления был организатор и первый директор Отделения член-корр. РАН В.А. Мироненко (1935–2000 гг.). Под его руководством получили развитие теоретические основы геофильтрации и миграции подземных вод, методы полевых опытных работ и наблюдений, и одновременно выполнялся обширный комплекс прикладных исследований на участках загрязнения подземных вод в различных регионах бывшего СССР [1].

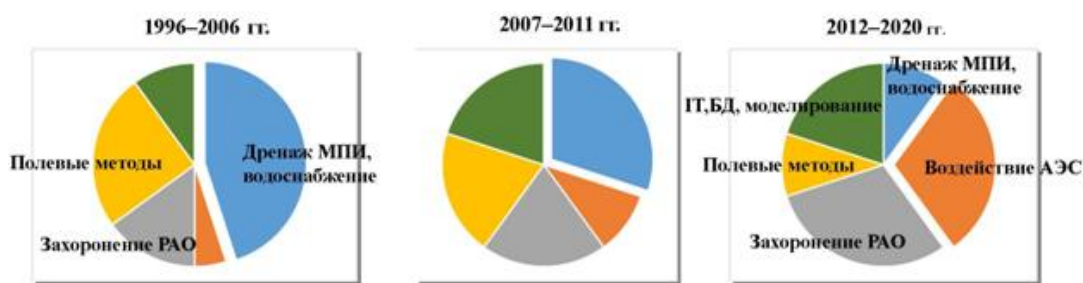
В последние десятилетия тематика исследований Отделения, возглавляемого с 2000 г. член-корр. РАН В.Г. Румыниным, существенно расширилась. Это связано с формирующимся запросом на комплексность в изучении влияния промышленных предприятий на окружающую среду и прежде всего коснулось объектов использования атомной энергии как приоритетного направления работ СПбО ИГЭ РАН. Соответственно, в проблематику исследований Отделения вошли оценка и прогноз состояния поверхностных вод, почв и атмосферы. Значительно расширился арсенал методов и инструментов исследований, которые включают специализированные гидрогеологические, изотопные, гидрологические, гидробиологические методы, при традиционно ведущей роли математического и численного моделирования природных и техногенных процессов в их современном преломлении.

В работе Отделения тесно сочетаются фундаментальные, прикладные исследования и изыскательская деятельность, причем именно последняя является базисом для научных разработок, источником опыта и фактического материала, а также основой финансового обеспечения существования коллектива.

Фундаментальные исследования выполняются преимущественно в рамках программы фундаментальных исследований РАН и нацелены на развитие теоретических представлений об условиях, процессах и параметрах фильтрации и миграции подземных вод в гетерогенных средах с упором на масштабные эффекты. Исследованы процессы, сопровождающие радионуклидный транспорт, миграцию жидких органических загрязнителей и рассолов, такие как сорбционный гистерезис, плотностная конвекция, двухфазная фильтрация. Научные разработки нашли отражение, помимо статей в периодической печати, в нескольких монографиях [2–5].

Прикладные исследования и изыскательские работы выполняются в рамках хозяйственных тем, заказчиками которых в разные годы выступали крупные предприятия ГК Росатом (НО РАО, РосРАО, Росэнергоатом, Атомпроект, Атомстройэкспорт, ВНИПИпромтехнологии, НИТИ им. А.П. Александра, ФЭО, Оргэнергострой), академические институты и НИИ (ИБРАЭ, Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, ИФХЭ РАН, ИГЕМ РАН), изыскательские, геологоразведочные и горнодобывающие предприятия (Уралкалий, Североалмаз, Алроса, Полиметалл, Красноярскгеология), а также зарубежные компании (BGR, GRS, DBE (Германия), SCK/CEN (Бельгия), Repsol YPF (Аргентина), TIGSA, INFRAECO (Испания) и др.).

Динамика приоритетов прикладных работ за историю существования Отделения схематически показана на рисунке ниже. Остановимся кратко на наиболее значимых научно-методических результатах выполненных за последние годы проектов по основным направлениям работ (Рис. 1).



Виды работ: ■ – дренаж на месторождениях полезных ископаемых и водоснабжение; ■ – оценка воздействия АЭС, гидробиологические исследования; ■ – изоляция РАО в геологических формациях; ■ – полевые методы исследований; ■ – ИТ, базы данных, математическое моделирование.

Рис. 1. Приоритетные направления прикладных и изыскательских работ СПбО ИГЭ РАН

1. Основным направлением исследований Отделения в течение последних десятилетий было *Инженерно-геологическое обеспечение строительства АЭС и*

прогноз воздействия АЭС на поверхностные и подземные воды, оценка ущерба водным биоресурсам. Объектами исследований стали около 10 строящихся и эксплуатируемых атомных станций в России и за рубежом, на которых был выполнен широкий комплекс работ (табл. 1), в результате чего была разработана и апробирована технология комплексной оценки, прогноза и мониторинга состояния водных экосистем и подземных вод в зоне влияния атомно-промышленных предприятий, которая включает: (1) выбор гидробиологических, гидрохимических и радиохимических индикаторов состояния среды в зоне влияния АЭС; (2) построение карт защищенности природных объектов с использованием дистанционных и изотопных методов; (3) моделирование теплового и химического баланса водных объектов в зоне сбросов технологических вод; (4) моделирование переноса радионуклидов поверхностным стоком и в подземных водах при нормальном режиме и запроектных авариях на АЭС [6–9].

2. Другим активно развивающимся и наиболее перспективным сейчас направлением деятельности СПбО ИГЭ РАН является *Обоснование долговременной безопасности объектов хранения и окончательной изоляции радиоактивных отходов (РАО).*

В 1990–2000-х гг. Отделением проводились исследования по изучению воздействия на подземные воды жидких радиоактивных отходов ядерно-промышленных предприятий – ПО «Маяк» и Сибирского химического комбината (СХК). Проектирование окончательной изоляции твердых РАО в геологических формациях выполнялось для двух геологических объектов в Российской Федерации: вендских глин на участке Северо-Западного атомно-промышленного комплекса (СЗАПК) в Сосновоборском районе Ленинградской области и скальных пород Нижнеканского массива в Красноярском крае (табл. 2).

На основе теоретических, экспериментальных и полевых исследований СПбО ИГЭ РАН была доказана возможность создания пункта захоронения радиоактивных отходов в глинистых формациях Северо-Запада Российской Федерации [10].

Таблица 1. Направления и объекты исследований по изучению воздействия АЭС на природные воды

АЭС	Виды исследований							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Российские АЭС								
Балтийская	•	•	•			•	•	
Белоярская	•	•	•			•	•	
Ленинградская	•	•	•	•	•	•		
Нововоронежская	•			•	•		•	
Смоленская					•			•
Зарубежные АЭС								
Бушер-2 (Иран)		•		•	•		•	
Пакш-2 (Венгрия)			•	•	•		•	
Эль-Дабаа (Египет)			•					
АЭС в Узбекистане							•	
Фукусима (Япония)								•
<p>Виды работ:</p> <p>1 – оценка состояния поверхностных вод по радиологическим, гидрохимическим и гидробиологическим показателям;</p> <p>2 – оценка состояния подземных вод по радиологическим и гидрохимическим показателям;</p> <p>3 – анализ и прогноз воздействия АЭС на водоемы-охладители;</p> <p>4 – прогноз гидродинамического воздействия АЭС на подземные воды;</p> <p>5 – прогноз радиологического и гидрохимического воздействия АЭС на подземные воды;</p> <p>6 – оценка ущерба водным биоресурсам;</p> <p>7 – анализ воздействия АЭС на природные среды при эксплуатации и авариях,</p> <p>8 – термодинамическое моделирование сорбционных процессов и устойчивости кориума</p>								

Для пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) в Красноярском крае проведены водно-балансовые и метеорологические наблюдения, опытное изучение параметров геологической среды [11]. Рассмотрены геолого-структурные и гидродинамические факторы, способные оказать влияние на процессы геомиграции радионуклидов в трещиноватых породах при выполнении и невыполнении предпосылки сплошности среды. Разработаны и внедрены частные модели миграции радионуклидов в трещиноватых гнейсах. Проведено моделирование

термодинамических процессов, возникающих в проектируемых инженерных барьерах пункта окончательной изоляции РАО в условиях интенсивной газогенерации [12].

Таблица 2. Направления и объекты исследований по изучению радиационного воздействия на подземные воды и обоснованию долговременной безопасности захоронения РАО

Объекты	Виды исследований				
	1	2	3	4	5
ПО «Маяк» (Челябинская обл.)	•		•		•
АО «СХК» (Томская обл.)			•	•	
СЗАПК (Сосновый Бор, Ленинградская обл.)	•	•	•	•	•
ПГЗРО (Красноярский Край)		•	•	•	•
Виды работ: 1 – оценка состояния подземных вод по радиологическим и гидрохимическим показателям; 2 – изыскания (полевые опытные опробования и мониторинг); 3 – лабораторное изучение физико-механических и сорбционных свойств геологической среды; 4 – термодинамическое моделирование сорбционных процессов; 5 – прогноз радиологического и гидрохимического воздействия объекта на подземные воды					

В рамках проблемы обоснования долговременной безопасности объектов хранения низко- и среднеактивных РАО была выполнена работа «Комплексный анализ территорий Приволжского и Южного федеральных округов и Мурманской области для выбора участков размещения пунктов захоронения РАО 3 и 4 классов», которая потребовала серьезных методических разработок, сбора и анализа значительного объема разнородной информации, во многом не геологического характера. В рамках разработанного подхода было выбрано несколько площадок, пригодных для изоляции РАО.

3. *Гидрогеологическое сопровождение горных работ* традиционно занимает существенное место в деятельности Отделения и направлено на обоснование систем защиты от обводнения горных выработок и решение инженерно-геологических проблем освоения месторождений полезных ископаемых на Кольском полуострове, в Архангельской области, Якутии, Дальнем Востоке. В последние годы серия договорных работ была связана с прогнозом развития гидродинамических и гидрохимических процессов при затоплении рудников на Верхнекамском

месторождении калийных солей, для чего была создана система геофильтрационных моделей и проведен комплекс полевых исследований влагопереноса в зоне аэрации.

4. *Изучение формирования ресурсов, разведка и расчет запасов пресных и минерализованных подземных вод* с использованием полевых гидрогеологических, изотопных и геофизических методов исследований выполнялось во многих районах и перспективных участках Санкт-Петербурга и Ленинградской области, Архангельской области, Карелии, республики Татарстан, провинции Альмерия (Испания). По результатам многолетних работ в Северо-Западном регионе РФ была издана монография [13].

5. Постоянное и все возрастающее внимание в деятельности Отделения уделяется развитию *методов математического моделирования и информационных технологий*. Помимо освоения современных специализированных программных средств и расчетных методик, специалистами разрабатываются собственные программные продукты, многие из которых прошли государственную сертификацию и востребованы профессиональным сообществом для решения гидрогеологических задач. Прежде всего, это семейство гидрогеологических программ ANSDIMAT для определения фильтрационных параметров водоносных пластов, оценки запасов и расчета зон санитарной охраны подземных водозаборов, расчета водопритоков подземных вод в котлованы при строительстве зданий и сооружений и др. Программа имеет свой сайт <http://ansdimat.com/> и всесторонне описана в монографиях: «Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT», «Aquifer Test Solutions. A Practitioner's Guide with Algorithms Using ANSDIMAT» (автор Синдаловский Л.Н.) [14, 15].

С 2004 г. в Отделении начал осуществляться инициативный проект по созданию электронной библиотеки гидрогеологической литературы, который, постоянно развиваясь, перерос в Базу знаний по гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии – универсальный программный продукт для специалистов, чьи интересы сопряжены с этими областями наук о Земле [16]. База знаний состоит из нескольких модулей: библиотеки (содержащей около 900 полнотекстовых копий книг, объединенных в единую поисковую систему), численно-аналитического модуля для выполнения инженерных расчетов, картографической системы, нормативно-методического блока, экспертной системы по фильтрационным и водно-физическим свойствам пород, набора словарей, реферативно-справочных обзоров. В настоящее время База знаний внедрена более чем в 500 учебных, научных и производственных организациях Российской Федерации.

Дальнейшие перспективы своего развития СПбО ИГЭ РАН видит в углублении прикладных исследований как основы для фундаментальных научных разработок в области геоэкологии крупных природно-технических систем и прогнозирования их влияния на природные среды. В этой связи, наиболее актуальным в настоящее время

представляется получение первичной полевой информации с привлечением современных инструментальных методов опытного опробования и мониторинга водоносных горизонтов и пород зоны аэрации. Реализация этих исследований связана с привлечением лабораторий, оборудованных высокоточными приборами для изучения свойств пород и состава вод (физико-механических, гидрофизических, сорбционных, изотопных и др.). Таким полигоном для комплексного изучения гидрогеологии массива гнейсовых пород является полигон, созданный на участке «Енисейский» строительства пункта глубинного захоронения высоко- и среднеактивных РАО в районе г. Красноярск.

Литература

1. *Мироненко В.А., Румынин В.Г.* Проблемы гидрогеоэкологии (три тома в 4-х книгах). М.: Изд-во МГГУ, 1998. 1870 с.
2. *Румынин В.Г.* Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб: Наука, 2011. 1160 с.
3. *Rumynin V.G.* Subsurface solute transport models and case histories. With application to radionuclide migration/ Theory and Applications of Transport in Porous Media. Vol. 25: Springer Netherlands, 2011. 860 p.
4. *Rumynin V.G.* Overland flow dynamics and solute transport/ Theory and Applications of Transport in Porous Media. Vol. 26: Springer Nature, 2015. 287 p.
5. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты (г. Сосновый Бор Ленинградской области) / Под ред. В.Г. Румынина. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2003. 208 с.
6. *Румынин В.Г.* и др. Прогноз воздействия АЭС на радиоактивность поверхностных и подземных вод// Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2020. № 3. С. 99-117.
7. *Nikulenkov A.M. a.o.* Assessment of Allowable Thermal Load for a River Reservoir Subject to Multi-Source Thermal Discharge from Operating and Designed Beloyarsk NPP Units (South Ural, Russian Federation). Environmental Modeling and Assessment. 2017.
8. *Kaplan E.M. a.o.* Transboundary aspect of assessing the impact of NPPs under construction on aquatic ecosystems: Case study of the Baltiiskaya NPP// Water Resources. 2016. V. 4. N 7. P. 911-922.
9. *Kulakov D.V. a.o.* Influence of heated waters discharge on zooplankton of various cooling ponds of nuclear power stations// Hydrobiological Journal. 2018. V.54. N 3. P. 60-74.
10. *V.G. Rumynin, A.M. Nikulenkov, V.A. Erzova.* History of the study of physical, mechanical, flow, and solute transfer properties of the vendian (Kothlin) clay as a medium

for the LLRW disposal sit. International Conference on Geological Barrier System. Hannover, 2020.

11. *Иноземцев С.А.* и др. Гидролого-гидрогеологическое обоснование безопасности создания ПГЗРО (участок «Енисейский» Красноярского края). Четвертые виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению сборник докладов международной научной конференции. Санкт-Петербургский государственный университет. СПб., 2020.

12. *Rozov K.B. a.o.* Sorption of ^{137}Cs , ^{90}Sr , Se , ^{99}Tc , $^{152(154)}\text{Eu}$, $^{239(240)}\text{Pu}$ on fractured rocks of the Yeniseysky site (Nizhne-Kansky massif, Krasnoyarsk region, Russia) // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. V. 192. P. 513-523.

13. Редкие типы минеральных вод Среднерусского артезианского бассейна / Под ред. А.И. Короткова, А.А. Потапова, В.Г. Румынина. СПб.: Наука, 2013. 303 с.

14. *Sindalovskiy L.N.* Aquifer test solutions. A practitioner's guide with algorithms using ANSDIMAT. Springer Nature, 2017. 392 p.

15. *Синдаловский Л.Н.* Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT. СПб.: Наука, 2021. 891 с.

16. *Румынин В.Г.* Информационный проект: Гидрогеология, инженерная геология и геоэкология (База знаний)// Разведка и охрана недр. 2008. № 2. С. 65-67.

**Многомасштабные процессы и явления в исследованиях
Санкт-Петербургских океанологов**
*А.А. Родионов, А.В. Зимин, А.Ю. Дворников, М.А. Родионов,
Д.А. Романенков, Т.И. Малова*

Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН берет свое начало с создания в марте 1966 г. Лаборатории математического моделирования циркуляции океана и атмосферы (Постановление Президиума АН СССР № 289 от 25.03.1966 г., подписанное М.В. Келдышем). Лаборатория первоначально располагалась в главном здании ленинградских учреждений Академии наук СССР. В июне 1973 г. на основе лаборатории был сформирован Ленинградский отдел Института, возглавляемый С.С. Зилитинкевичем, в который были включены лаборатории теории климата (д.ф.-м.н. С.С. Зилитинкевич), численных экспериментов по динамике океана (д.ф.-м.н. Б.А. Каган) и динамической метеорологии (д.ф.-м.н. Д.В. Чаликов), а также лаборатория оптики океана и атмосферы, которая была создана в 1969 г. (создатель и заведующий до 1991 г. – проф. К.С. Шифрин). В июне 1991 г. Отдел преобразован в Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, который в настоящее время включает лаборатории: численных экспериментов по динамике океана (к.г.н. Д.А. Романенков), моделирования океанских биогеохимических циклов (д.ф.-м.н. В.А. Рябченко), оптики океана и атмосферы (к.ф.-м.н. М.А. Родионов) и геофизических пограничных слоев (д.г.н. А.В. Зимин), а также группу гидрофизических исследований (д.т.н. А.А. Родионов).

В октябре 2015 г. в Институте океанологии создана по инициативе Фонда перспективных исследований лаборатория прикладных гидрофизических исследований, большая часть сотрудников которой работает в СПбФ ИО РАН.

Санкт-Петербургский филиал располагается на Васильевском острове в исторической части города. В 2020 г. была завершена реставрация здания Филиала, в результате которой помимо административно-бытовых помещений в дворовом флигеле создан лабораторный научно-исследовательский комплекс, включающий три экспериментальных бассейна.

Спецификой научной работы Филиала было и остается систематическое рассмотрение океана и атмосферы как единого целого, а планетарных пограничных слоев как связующего звена между атмосферой и океаном. В настоящее время в Филиале ведутся научно-исследовательские работы по широкому спектру направлений наук о Земле. Ниже приводится ряд результатов, полученных в последние десятилетия.

Основные научные достижения

1. Динамика океана

Лаборатория численных экспериментов по динамике океана создана в 1973 г. В настоящее время в нее входят кандидат географических наук Д.А. Романенков (руководитель), доктор физ.-мат. наук, профессор Б.А. Каган, Н.Е. Вольцингер, доктор физ.-мат. наук А.А. Андросов, кандидат физ.-мат. наук Д.В. Сеин, кандидат физ.-мат. наук Е.В. Софьина, А.А. Тимофеев и ведущий инженер И.В. Серегина.

Важнейшие научные достижения лаборатории с начала XXI столетия

– Сформулированы новые законы сопротивления для осциллирующего турбулентного пограничного слоя над подстилающей поверхностью различной шероховатости с учетом эффектов вращения и сдвига фаз между напряжением придонного трения и скоростью течения за пределами слоя.

– Предложена концепция слабого взаимодействия ветровых волн и низкочастотных движений на шельфе и метод параметризации этого взаимодействия в приливных моделях для улучшенного описания придонного трения.

– Разработана технология предвычисления приливного дрейфа льда и приливных сжатий и разряжений ледяных полей в морях Северного Ледовитого океана.

– Предложен метод учета приливных эффектов в региональных климатических моделях.

– Развита метод для расчета катастрофических явлений в прибрежной зоне моря при оползневых процессах на основе двухслойной негидростатической модели.

– Разработан общий подход к моделированию динамики в проливах Мирового океана и на крутых континентальных склонах на основе оригинальной трехмерной модели в криволинейных, согласованных с морфометрией, координатах.

В период 2016–2021 гг. основные направления исследований Лаборатории включали:

– Моделирование динамики и энергетики поверхностных и внутренних приливов в Северном Ледовитом океане и его морях.

– Изучение роли приливов в формировании гидрологического режима морских акваторий.

– Оценку приливных изменений регионального климата арктических морей.

– Разработку численных моделей процессов с выраженными нелинейными и негидростатическими эффектами в проливах Мирового океана и на крутых континентальных склонах.

1) Выполнено высокоразрешающее трехмерное моделирование внутреннего прилива в Баренцевом море; оценены составляющие бюджета бароклинной приливной энергии и вклад внутренних приливных волн (ВПВ) в диапикническую диффузию. Показано, что коэффициенты вертикальной турбулентной и диапикнической диффузии, характеризующие интенсивность соответствующего перемешивания, имеют близкие порядки величин и, что поля климатических характеристик моря подвержены поэтому весьма заметным изменениям за счет индуцируемой ВПВ диапикнической диффузии [1-3]. Для расчетов использована трехмерная гидростатическая конечно-элементная модель QUODDY-4 с горизонтальным разрешением, варьируемым от 1,5 до 19,5 км в Баренцевом и от 1,2 до 8,0 км в Карском морях, что в несколько раз меньше локального бароклинного радиуса Россби.

Модельное поле амплитуд ВПВ в Баренцевом море на горизонте 50 м, что соответствует средней глубине пикноклина, показывает, что экстремальные амплитуды ВПВ обнаруживаются к югу от арх. Шпицберген и достигают 20 м (рис. 1а). Максимальные амплитуды ВПВ предсказываются в вероятных очагах их генерации, в частности, в южной части Баренцева моря они составляют 4–10 м. В остальных частях моря их значения близки к 1 м. В очагах генерации ВПВ при уклонах дна близких к критическим значениям максимум амплитуд ВПВ детектируется ниже пикноклина и, как демонстрирует рис. 1б может достигать 35 м вдоль разреза, проходящего перпендикулярно открытой границе между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Шпицберген. Концентрация высокоамплитудных ВПВ вблизи резкой нерегулярности дна дает основание предположить, что ВПВ являются топографически захваченными. Особенности ВПВ, как низкомодовых волн, не распространяются на короткопериодные внутренние волны (КВВ), амплитуды которых могут превышать амплитуды низкомодовых внутренних волн.

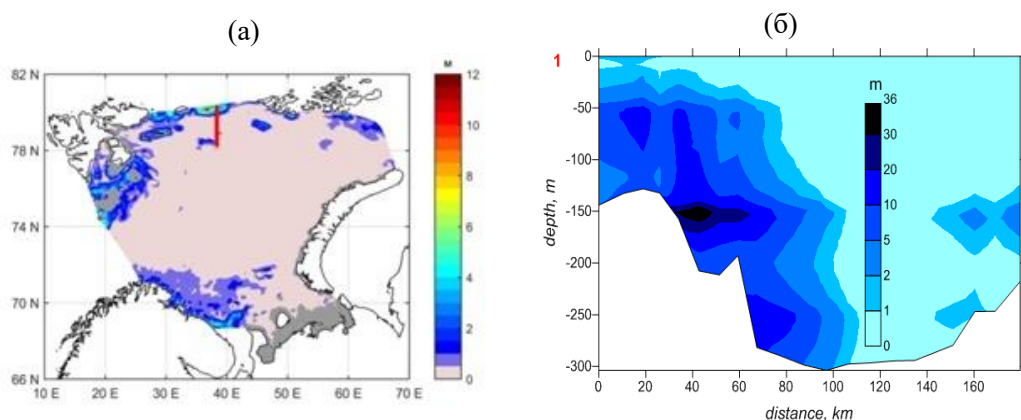


Рис. 1. Амплитуды ВПВ в Баренцевом море в метрах:
 а) – на глубине пикноклина (50 м); б) – на разрезе через очаг генерации ВПВ
 (разрез показан красной линией на рисунке 1а)

Данные спутниковых радиолокационных измерений поверхностных проявлений КВВ и наши результаты моделирования ВПВ указывают на то, что очаги генерации ВПВ располагаются вблизи арх. Земля Франца-Иосифа, особенно к северо-западу от о. Александры, а также в пределах Воронки Белого моря, Шпицбергенской банки и в районах к северу и югу от о-вов Новая Земля и к северу от м. Нордкап.

Установлено также, что индуцируемая ВПВ диапикническая диффузия либо соотносима по величине, либо меньше вертикальной турбулентной диффузии примерно на порядок величины. Поэтому ее учет может приводить к уточнению предсказываемых оценок приливных изменений состояния морской среды. На рис. 2 представлены результаты двух численных экспериментов, выполненных для оценки приливных изменений в формировании климатических характеристик Баренцева моря. Первый расчет производится при задании суммарного (ветрового + термохалинного + приливного) форсинга, второй – без учета приливной его составляющей (комбинированный форсинг). Видно, что климатические характеристики Баренцева моря испытывает весьма заметные изменения, связанные с учетом приливного форсинга. Так, максимальные отличия двух решений составляют $[-4; 2]^{\circ}\text{C}$ для температуры и $[0,4; -2,0]\%$ для солености на глубине пикноклина. Такое же заключение следует из сравнения коэффициента диапикнической диффузии, характеризующего влияние внутренних приливных волн, и т.н. «фоновой» диффузии, генерируемой суммарным (включая приливный) форсингом. Предсказанные значения коэффициента «фоновой» диффузии получаются одного порядка величины с наблюдаемыми посредством микроструктурных измерений в очагах интенсивного перемешивания в прикромочной зоне морского льда в Баренцевом море.

Дополнительные эксперименты (не показаны) были проведены с целью проверки возможности косвенного способа учета эффекта ВПВ при моделировании климатических характеристик. Этот учет выполнен путем коррекции коэффициента вертикальной турбулентной вязкости коэффициентом диапикнической диффузии при расчетах с комбинированным форсингом. Их результаты демонстрируют, что, в целом, температура и соленость морской воды на глубине пикноклина, а также уровень моря, предсказываемые при косвенном способе учета приливных эффектов, весьма близки к их значениям, соответствующим явному способу учета приливных. Следовательно косвенный способ можно считать приемлемым для воспроизведения климата ограниченных водоемов и его приливных изменений. Сравнение мер ошибок определения климатических характеристик Баренцева моря при использовании обоих способов учета приливных эффектов относительно наблюдаемых значений показывает, что они отличаются в рассматриваемых случаях максимум на сотые доли единицы. Это подтверждается сравнением коэффициентов вертикального обмена в точках с весьма различающимися глубинами. Следовательно, косвенный способ

обеспечивает в общем удовлетворительное описание приливных эффектов по сравнению с явным для всех переменных.

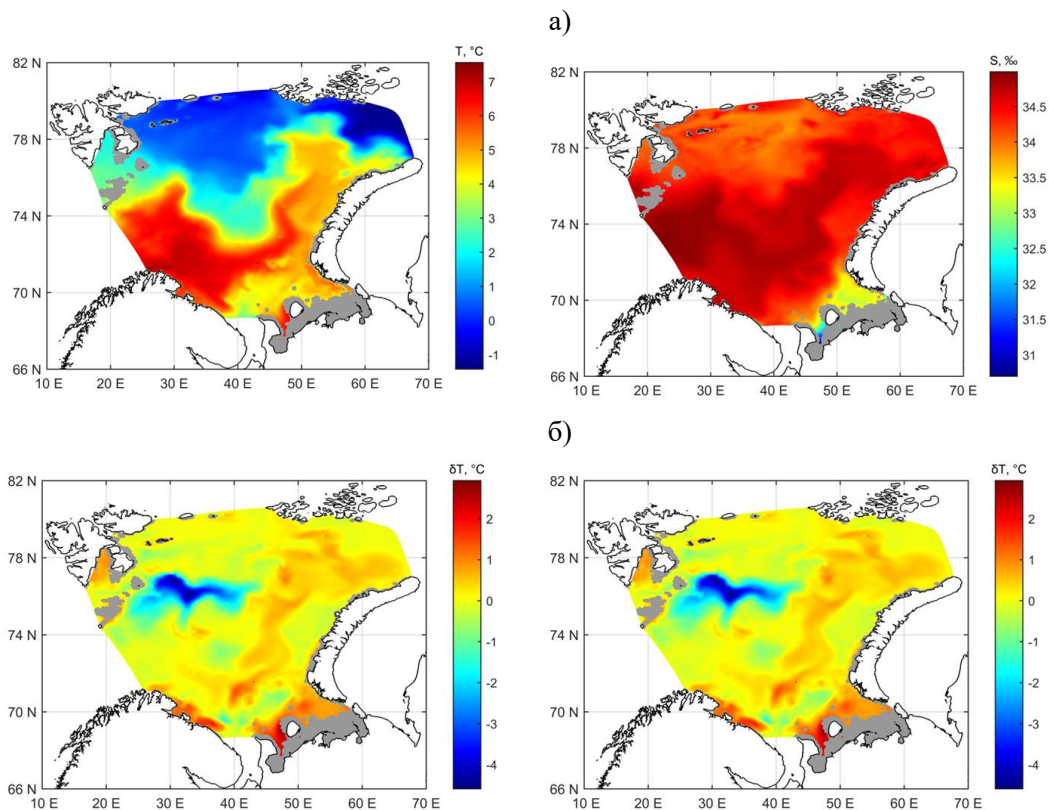


Рис. 2. Температура (слева) и соленость (справа) морской воды Баренцева моря на глубине 50 м: а) явный способ учета приливов; б) разность характеристик с учетом и без учета прилива

2) Впервые выполнено высокоразрешающее трехмерное моделирование поверхностного и внутреннего прилива в Карском море; оценены их энергетические характеристики и вклад внутренних приливных волн (ВПВ) в диапикническую диффузию. Показано, что приливные изменения климатических характеристик сравнимы с самими значениями климатических характеристик [4-7].

Сравнивая результаты моделирования внутреннего прилива с предшествующими исследованиями, отмечаем, что в Карском море он менее выражен, чем в Баренцевом море. Как следует из анализа поля амплитуд ВПВ в Карском море в основании пикноклина (40 м), максимальные амплитуды (до 5 м) обнаруживаются к юго-востоку от м. Желания (о-ва Новая Земля) и в отдельных пятнах на периферии Центрального Карского плато и Новоземельной впадины (рис. 3а). В юго- и северо-западных частях моря предсказанные амплитуды ВПВ не

превышает 2 м. Проведенная оценка амплитуд ВПВ неплохо согласуется с данными *in situ* измерений полусуточных колебаний температуры морской воды в южной части моря. При рассмотрении поля средней (за приливный цикл) интегральной по глубине вне придонного слоя диссипации бароклинной приливной энергии можно заметить (рис. 3б), что последняя диссипирует сильнее всего на Центральном Карском плато, в Байдарацкой, Обской и Гыданской губах, Енисейском заливе, в окрестности о. Белый и в дискретных пятнах, разбросанных нерегулярным образом в северо-восточной части моря и особенно в северо- и юго-западных частях моря и в ряде других районов, т.е. там, где присутствуют максимумы и минимумы баротропной приливной энергии.

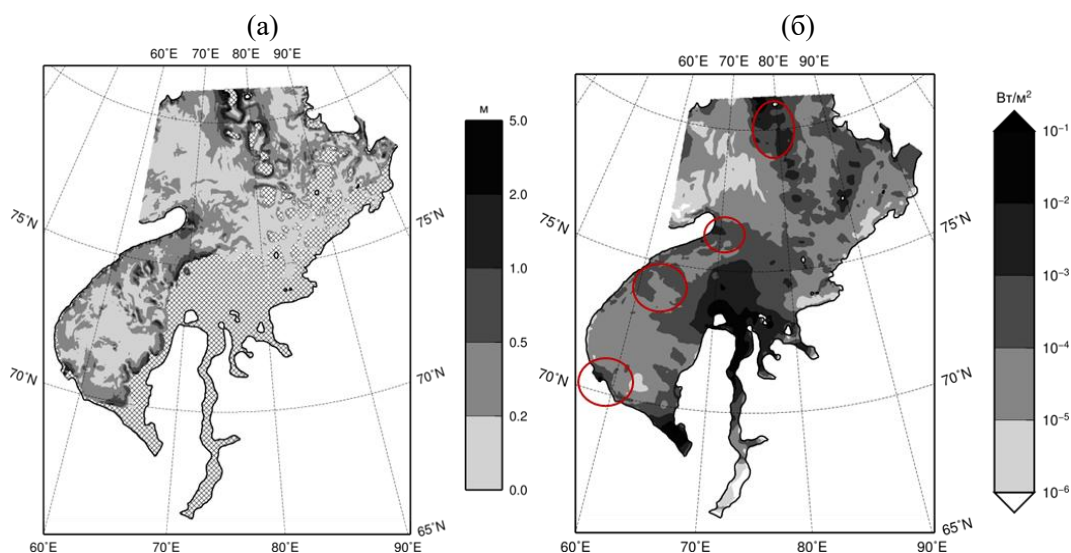


Рис. 3. Внутренний прилив в Карском море: а) амплитуды ВПВ в метрах на глубине пикноклина (40 м); б) средняя скорость диссипации интегральной бароклинной приливной энергии. Красными окружностями показаны очаги генерации ВПВ

Особенного упоминания заслуживает тот факт, что обе составляющие диссипации – и баротропная, и бароклинная – имеют одинаковые порядки величин. Зная пространственное распределение горизонтального волнового переноса баротропной приливной энергии и положение изобат, можно попытаться установить, используя условие ортогональности между горизонтальным волновым переносом баротропной энергии и изобатами, местоположения очагов генерации ВПВ. Для контроля привлекается поле средней (за приливный цикл) плотности интегральной по глубине бароклинной приливной энергии, имея в виду, что очаги генерации ВПВ должны совпадать с максимумами плотности бароклинной приливной энергии.

Сопоставление этих двух условий выявляет следующие возможные очаги генерации ВПВ (рис. 3б): северная часть Центрального Карского плато, западный и

восточный склоны Новоземельной впадины, прол. Карские Ворота (точнее, район к востоку от него) и район к юго-востоку от м. Желания. В последних двух районах действительно обнаружены районы частой встречаемости короткопериодных внутренних волн, возникающие, как известно, при разрушении ВПВ из-за невозможности их распространения как свободных волн выше критической широты. Что касается северной части Центрального Карского плато и склонов Новоземельной впадины, то результаты наземных измерений скорости и радиолокационного зондирования морской поверхности здесь таковы, что подтвердить или опровергнуть существование этих очагов генерации ВПВ не удастся.

Получена оценка, индуцируемого ВПВ диапикнического перемешивания, определяемая разностью средних (по объему моря и за приливный цикл, если приливный форсинг учитывается) коэффициентов диапикнической диффузии при суммарном и комбинированном форсингах, и она равна $1,57 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Сравнивая ее с вертикальной турбулентной диффузией, интенсивность которой характеризуется средним (в том же смысле) коэффициентом вертикальной турбулентной диффузии при комбинированном форсинге, составляющим $2,93 \times 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$, убеждаемся, что оба типа диффузии отличаются друг от друга всего лишь на один порядок величины. Это означает, что индуцируемая ВПВ диапикническая диффузия должна быть включена в число факторов, влияющих на региональный климат моря при точном его определении, и может быть исключена из него, только в том случае, когда ориентировочное его определение считается достаточным.

Для подтверждения высказанной выше гипотезы обратимся к обсуждению приливных изменений климатических характеристик в Карском море. Определим их как разности значений характеристики, соответствующих суммарному и комбинированному форсингам. Используя это определение приливных изменений, находим, что прилив в Карском море способен вызывать повышение температуры морской воды в северной половине моря и ее понижение в южной (рис. 4а). Максимальные понижения температуры обнаруживаются у входа в Байдарацкую губу, максимальные повышения температуры – в окрестности северной открытой границы моря. Первые из них достигают -4°C , вторые – $0,5^\circ\text{C}$. Судя по полю приливных изменений солёности (рисунок 4б), западная часть моря характеризуется небольшим повышением солёности, восточная – ее понижением, составляющим соответственно 3,5 и -2% . Сравнивая приливные изменения климатических характеристик с самими климатическими характеристиками, отвечающими суммарному форсингу, приходим к выводу, что они (исключая солёность) соизмеримы между собой, тогда как приливные изменения солёности – на порядок величины меньше самой солёности. Другими словами, приливные изменения температуры и уровня имеют основной порядок значимости, а приливные изменения солёности – существенны.

Подводя итог исследования, можно заключить, что пренебрежение вкладом индуцируемой ВПВ диапикнической диффузии в формирование климата Баренцева и Карского морей нельзя считать оправданным. Его необходимо учитывать в региональных моделях.

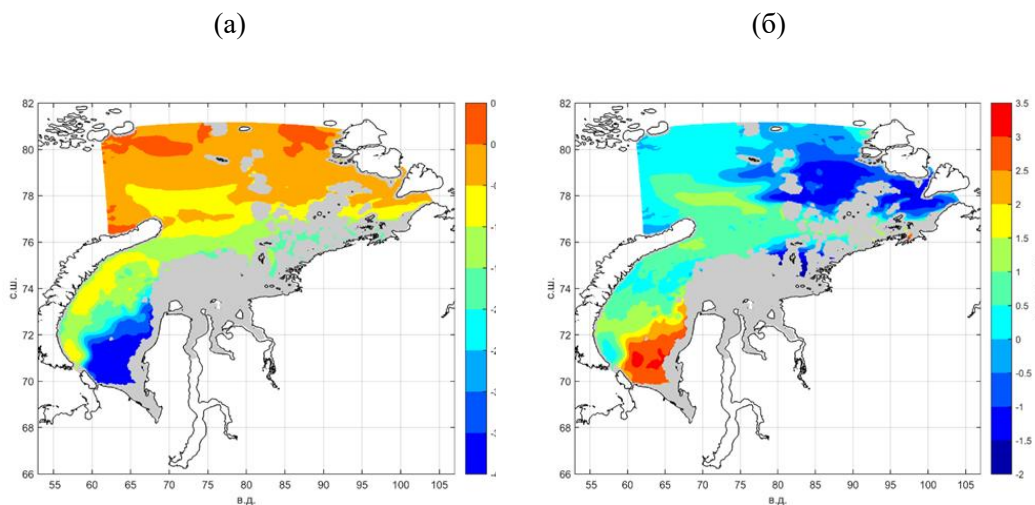


Рис. 4. Приливные изменения температуры (а) и солёности (б) морской воды на глубине основания пикноклина в Карском море летом

3) Разработан общий подход к моделированию длинноволновой динамики в проливах Мирового океана с регионами свала глубин и на крутых континентальных склонах. По результатам расчетов приливной динамики и гидрологии пролива Ломбок (Индонезийский архипелаг), а также процесса каскадинга плотных вод показана непригодность моделирования склоновой динамики в гидростатическом приближении [8-13]. Структура модели состоит из двух блоков: задачи в гидростатическом приближении для примитивных уравнений и задачи для уравнений Навье-Стокса нахождения динамической компоненты давления. Краевая задача преобразуется к криволинейным гранично-согласованным координатам и реализуется разностным методом в канонической области, на которую отображается физическая область пролива. Численная реализация использует геофизическую модификацию проекционного метода решения уравнений Навье-Стокса; при этом разностная краевая задача интегрируется расщеплением по координатным направлениям при аппроксимации адвекции схемой повышенного порядка точности. Определение негидростатической компоненты давления, требующее основных вычислительных затрат, выполняется решением уравнения Пуассона для оператора Лапласа-Бельтрами; реализация негидростатического модуля использует сочетание прогонки по вертикали с итерационным методом верхней релаксации по горизонтали.

Внутренняя сходимость сеточных решений удостоверяется гистограммами разности решений на последовательности сеток.

Разработаны численные модели проливов для оценки значимости негидростатических эффектов и классификации проливов с точки зрения рационального подхода при моделировании негидростатической динамики, облегчающего выбор между повышением точности модели и допустимыми вычислительными затратами. Согласно предложенной классификации, проливы подразделяются по типовому признаку целесообразности учета динамического давления во всей области пролива либо его подобласти, руководствуясь как общими представлениями, исходя из морфометрических, динамических и гидрологических особенностей пролива, так и простыми критериями выявления негидростатики. Проливы подразделяются на три типа. К первому относятся проливы, в которых выделение подобласти негидростатики выполняется произвольно, подчиняясь только требованию достаточной близости граничных решений двух задач и не требует специальной процедуры их срачивания, как, например, Мессинский или Ломбок. Такой тип характеризуется доминирующей подводной горой, изменение крутизны которой или наличие плеча подсказывают локализацию подобласти негидростатики. Ко второму типу относятся проливы, в которых выделение такой подобласти может оказаться невыполнимым, если не проявить осмотрительности. К ним относятся проливы с разнонаправленной структурой течений, взаимодействие которых усиливается, порождает водовороты или становится хаотичным на нерегулярных элементах прибрежной морфометрии, как, например, Гибралтарский пролив, проливы Шантарских островов на юге Охотского моря, проливы Курильской гряды и др. Наконец, к третьему типу отнесены проливы, в которых выделение подобластей негидростатики нецелесообразно, поскольку она присуща динамике всего пролива в силу его морфометрической изрезанности и изменчивости рельефа. Это – проливы архипелагов, островных дуг, фиордовых систем, коралловых регионов, а также многие отдельные проливы, как, например, Баб-эль-Мандебский. Конечно, такая классификация весьма условна, но отвечая единственному принципу, положенному в ее основу, может помочь ориентироваться на первоначальном этапе постановки задачи при построении модели пролива.

Новым приложением подхода могут служить результаты расчета приливной динамики и гидрологии пролива Ломбок, полученные с целью оценки влияния негидростатического фактора на точность моделирования в областях с резко выраженным горным рельефом. Пролив Ломбок – глубокий пролив с крутой подводной горой и стремительным течением над ее вершиной, является важнейшим звеном западной ветви Индонезийского прохода между Тихим и Индийским океанами (рис. 5а).

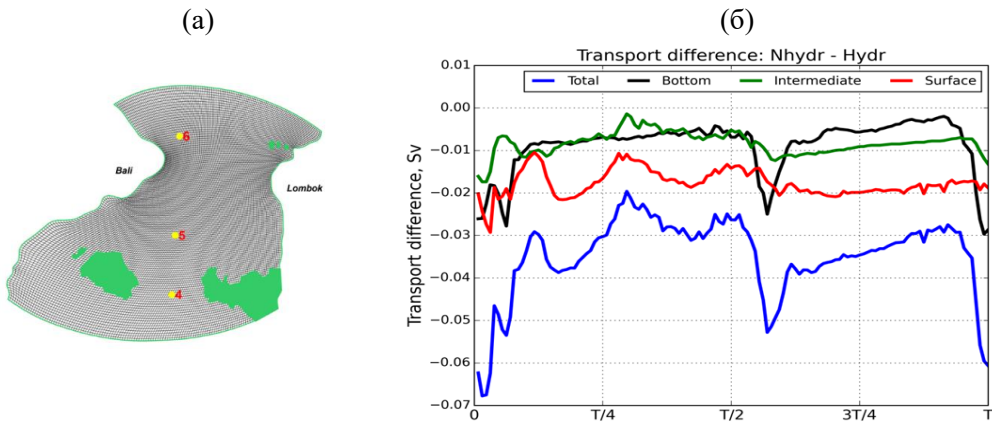


Рис. 5. Результаты моделирования в проливе Ломбок. (а) – Расчетная сетка пролива Ломбок между островами Бали и Ломбок; (б) – разница в транспорте воды пролива Ломбок между негидростатической и гидростатической постановками: полный транспорт – синяя кривая; транспорт в поверхностной части пролива – красная кривая; в промежуточной зоне – зеленая кривая; глубинная зона – черная кривая. T – период прилива

Из совокупности полученных результатов наибольший интерес представляет количественная оценка роли каждого из двух факторов водообмена через Ломбок: прилива и градиента давления между океанами, в тех обычных условиях, когда осуществляется сложный перенос. При прохождении через моря Индонезийского Прохода энергия тихоокеанских приливов ослабевает и в отсутствие перепада давления между океанами в силу непосредственного влияния приливов Индийского океана доминирует северный перенос. Модельные расчеты показывают, что при учете только волны M_2 , северный перенос составляет $+0,4$ Sv; под действием суммарного прилива северный перенос возрастает и, чтобы его обратить и получить реалистичский южный перенос 2 Sv требуется градиент давления в виде граничного условия, задающего превышение уровня 5 см с его поперечным перекосом 2 см. Оказывается, что сильные приливы Индийского океана препятствуют тихоокеанскому переносу, при этом в отдельные фазы приливного цикла учет негидростатического фактора дает существенный вклад как в суммарный транспорт воды через пролив, так и в его вертикальных слоях (рис. 5).

Другой важный результат связан с выяснением роли негидростатики (Нг) в приливной динамике пролива Ломбока. Обычно принимается, что в длинноволновых движениях влиянием динамической компоненты давления можно пренебречь. В случае пролива Ломбок это не так. На сложном крутом склоне пролива вертикальные скорости возрастают, и не только в разы и даже на порядок превышают поле вертикальных скоростей в гидростатическом приближении (G_c), но и существенно корректируют его искаженные локальные спектры. Общий вывод, следующий из

рассмотрения этих результатов, сводится к тому, что насыщенные ложные спектры Гс задачи, отвечающие извилистому ходу вертикальной скорости в контрольных точках всех станций, свидетельствует об ошибках вычисления вертикальной скорости из уравнения неразрывности; при этом значения нулевой гармоники в Гс и Нг задачах могут отличаться в несколько раз и даже на порядок, а в Гс реализации значения полусуточной волны M_2 и группы более высоких гармоник могут и превосходить значения нулевой гармоники.

Это приводит к далеко идущим последствиям, поскольку амплитуда вертикальной скорости на свале глубин в узкой части пролива достигает нескольких см/с. Решения в гидростатической и полной постановках имеют различия здесь, которые существенно возрастают при рассмотрении нелинейных эффектов (рис. 6). Поле вертикальной скорости на свале глубин в Гс приближении полностью искажено (зашумлено нелинейными гармониками, искусственная нелинейность) и нереалистично (рис. 6а).

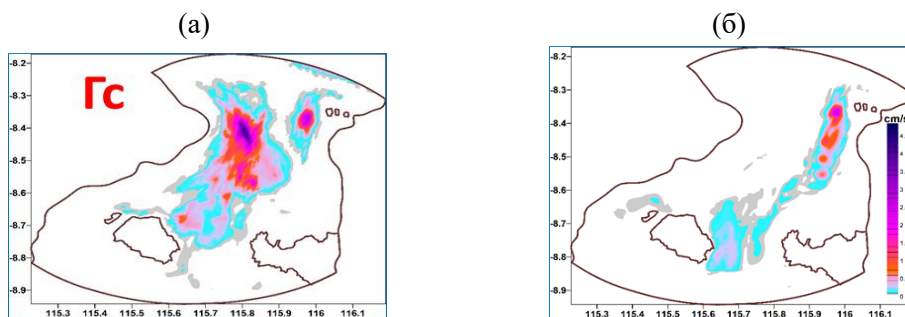


Рис. 6. Сумма амплитуд нелинейных гармоник вертикальной скорости (см/с) в приливной динамике пролива Ломбок: (а) – гидростатика, (б) – негидростатика

Другой пример влияния негидростатического фактора на реалистичность результата моделирования приводится на рис. 7. На идеализированном двумерном разрезе материкового склона моделируется гравитационный сток более плотных водных масс, поступающих с континентального шельфа, и процесс их гравитационного приспособления – типичные черты динамики на материковом склоне. Представлены вертикальные скорости и аномалия плотности на момент времени 10 часов в двух постановках, Нг и Гс. В Нг постановке вертикальное поле скоростей имеет ярко выраженную двухячейковую структуру, на гладком фронте плотностной линзы происходит подъём воды, вызванный ее движением, а за фронтом происходит опускание водных масс. Расчеты в Гс приближении приводят к сильной неустойчивости в поле вертикальных скоростей и форме плотностной линзы по всему континентальному склону. Сравнение результатов показывает непригодность моделирования склоновой динамики в гидростатическом приближении.

Неудовлетворительные результаты моделирования гравитационных течений на материковом склоне в Гс приближении обязаны бароклинной неустойчивости, как это следует из сравнения хода энергии задачи в Гс и Нг постановках. Редукция полного уравнения движения по вертикали к Гс приближению приводит к физической неполноценности получаемых результатов: ущербу описания процессов вертикального перемешивания, вовлечения, пренебрежении дисперсией на малых масштабах, исключению горизонтальной компоненты ускорения Кориолиса и др.

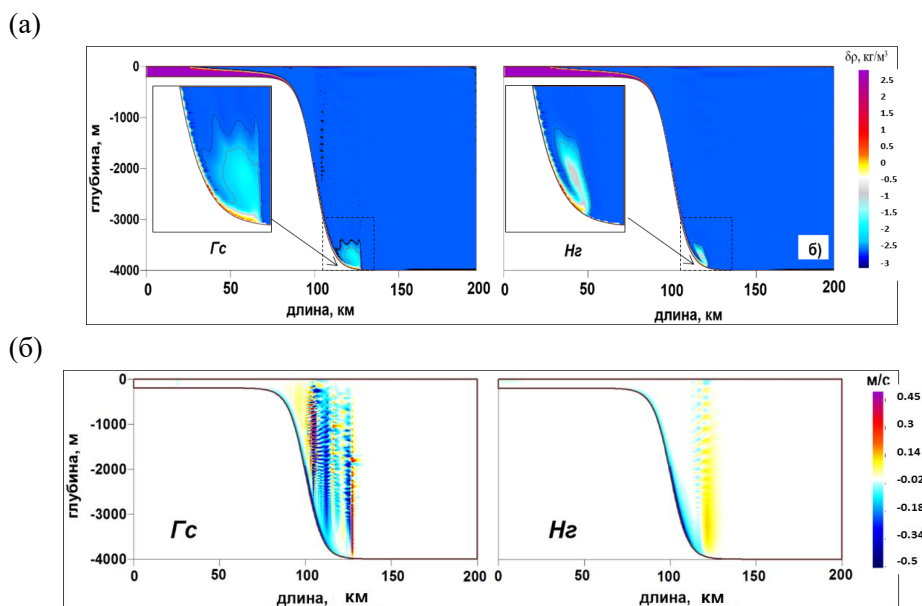


Рис. 7. Опускание плотностной линзы по склону в гидростатической (Гс) и негидростатической (Нг) постановках на момент времени 10 ч после начала расчета:
а) аномалия плотности, б) вертикальные скорости

4) Изучена роль приливного перемешивания в районе наблюдаемой отрицательной аномалии поверхностной температуры моря на границе между Баренцевым и Белым морями [14].

Согласно анализу спутниковой информации (а также данным реанализа OSTIA) в обширной зоне на границе Баренцева и Белого морей в теплый сезон наблюдается аномалия температуры поверхности моря (ТПМ), интенсивность и размер которой меняются приблизительно с 14-суточной периодичностью (рис. 8а). Серия численных экспериментов в Баренцевом и Белом морях, выполненных с помощью конечно-объемной модели FESOM-C, позволила выявить особенности суточной и внутримесячной изменчивости стратификации морей под влиянием приливной динамики. На рис. 9б как пример представлено модельное поле ТПМ, соответствующее спутниковому снимку. Результаты моделирования показали, что

сформированная к августу устойчивая стратификация в ряде районов испытывает значительную трансформацию под влиянием приливной динамики. По результатам моделирования в первую половину августа вариации среднесуточной температура поверхности моря в створе между м. Канин Нос и м. Св. Нос достигает 2,5 град. за две недели. К середине месяца между пятном перемешанных вод и окружающими стратифицированными водными массами на поверхности моря формируется горизонтальный градиент температуры около 0,05 град./км, который существенно уменьшается через неделю. К концу месяца этот эффект проявляется в модели слабее из-за ослабления пресного стока и заметного влияния атмосферного форсинга. На границе двух морей и в Воронке образуется перемешанная приливом зона (с почти однородной стратификацией и пониженной ТПМ), ограниченная фронтом приливного перемешивания.

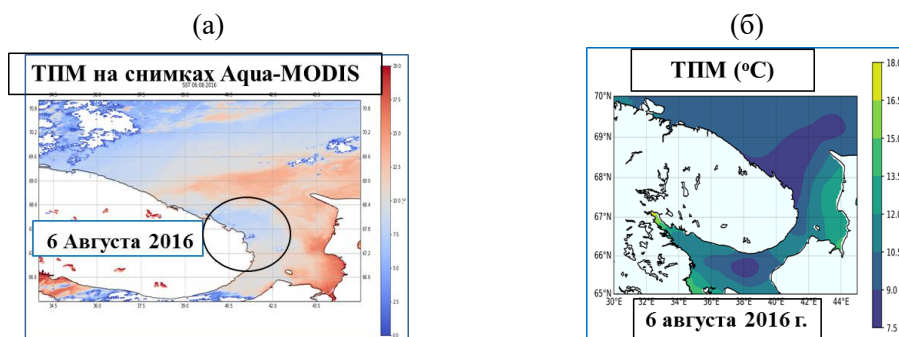


Рис. 8. Температура поверхности моря по данным спутниковых наблюдений (а) и результатам моделирования (б). Черным эллипсом показана локализация аномалии ТПМ на границе Баренцева и Белого морей

Были определены позиции фронтов приливного перемешивания по пороговому значению критерия Симпсона-Хантера. Согласно модельным оценкам, эти фронты располагаются в северной части Воронки Белого моря и в юго-западной части пролива Горла. Район в северной части Воронки Белого моря на границе с Баренцевом морем характеризуется интенсивными приливными течениями (до 2 м/с). Фронт приливного перемешивания показывает полумесячную динамику своего положения в соответствии с изменчивостью суммарных приливных течений (рис. 9).

Таким образом, получена модельная оценка роли приливного перемешивания и связанного с ним структурного гидрологического фронта в формировании наблюдаемой отрицательной аномалии поверхностной температуры воды на границе между Баренцевыми и Белыми морями. Интенсивность и размеры аномалии, а также положение фронта приливного перемешивания, меняются с двухнедельной периодичностью, что, очевидно, связано с сизигийно-квадратурным циклом полусуточного прилива.

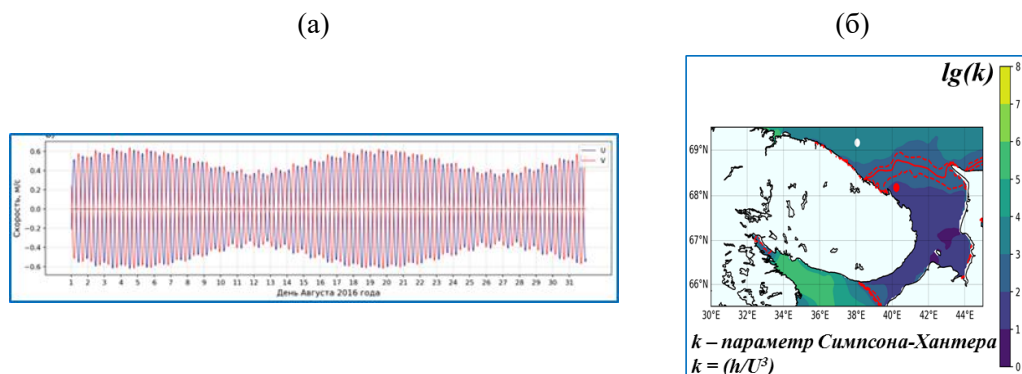


Рис. 9. Внутримесячная изменчивость интенсивности течений (а) и границ зон приливного перемешивания (б) на границе Баренцева и Белого морей. На фрагменте (б) – сплошная красная сплошная линия – среднее за август положение фронта приливного перемешивания, красная пунктирная линия показывает динамику фронта в течение августа

2. Океанические биогеохимические процессы

Лаборатория моделирования океанских биогеохимических циклов создана в СПбФ ИО РАН в 1998 г. В настоящее время в состав лаборатории входят доктор физ.-мат. наук В.А. Рябченко, кандидаты физ.-мат. наук В.А. Горчаков, А.Ю. Дворников, С.Н. Лоза, С.Д. Мартыанов, кандидат географических наук А.В. Исаев, кандидат техн. наук Р.Е. Ванкевич и инженер-программист С.С. Пугалова.

Важнейшие научные достижения лаборатории с начала XXI столетия

- Произведены оценки экологического состояния Балтийского моря при возможных изменениях климата и биогенных нагрузок в XXI в.
- Разработан и испытан метод оценки интенсивности береговой эрозии в западной части о. Котлин, и на его основе рассчитаны параметры искусственной подсыпки, обеспечивающей сохранение песчаных пляжей.
- По результатам трехмерного моделирования проведены оценки влияния ледового покрова на первичную продукцию фитопланктона в Баренцевом море. Разработана регрессионная модель зависимости суммарной за год ПП от среднегодовой площади льда.
- Разработан оригинальный метод «мягких ограничений» для усвоения данных наблюдений в экосистемных моделях.
- Получены оценки качества воды в Невской губе Финского залива, выполненные на основе трехмерной модели циркуляции воды и льда высокого разрешения.
- Разработана испытательная версия оперативной системы прогноза гидродинамических характеристик Финского залива GULFOOS (the GULf of Finland Operational Oceanographic System), основанная на гидродинамическом модуле Санкт-

Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря SPBEM (Saint Petersburg Baltic Eutrophication Model).

В период 2016–2021 гг. основными направлениями исследований Лаборатории моделирования океанских биогеохимических циклов были:

- Изменения, включая экстремальные, биогеохимических циклов в высокоширотных морях России.
- Распространение загрязняющих веществ в океане, морях, озерах и эстуариях рек.
- Влияние изменений климата на морские экосистемы и эвтрофирование внутренних морей и озёр.

В указанный период по этим направлениям продолжались работы по исследованию региональных изменений климата и биогеохимических циклов, процессов взмучивания и переноса донных осадков, экстремальных гидрологических условий и влияния ледового покрова на морские экосистемы в Балтийском море и его северных заливах (Финском и Ботническом), а также в Арктических морях (Баренцевом и Карском).

1) Модельные оценки влияния полихет *Marenzelleria spp.* (червей-вселенцев) на будущее состояние экосистемы Финского залива в условиях изменения климата [15-17]. Для оценки этого влияния использована Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря (Saint Petersburg Baltic Eutrophication Model, SPBEM). Эффекты полихет *Marenzelleria spp.*, вызванные их биоирригационной активностью, учитываются путем введения оригинальной параметризации в подмодель бентосного слоя. Выполнены два численных эксперимента для периода с 2007 по 2040 гг.: без учета биоирригационной активности бентосных организмов (сценарий С1) и с учетом (сценарий С2) при одинаковых атмосферных воздействиях, соответствующих сценарию глобального изменения климата по модели ECHAM5 Института Метеорологии им. Макса Планка, Гамбург, Германия. В этих расчетах использовался сценарий изменения будущих биогенных нагрузок, основанный на оценках современных атмосферных выпадений и концентраций в реках. Данные о распределении полихет *Marenzelleria spp.* в Балтийском море были взяты из базы данных Стокгольмского университета, в восточной части Финского залива численность вида задавалась по данным натуральных наблюдений, полученным в ходе экспедиций Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) в 2008–2013 гг. Результаты показали, что присутствие полихет *Marenzelleria spp.* в донных отложениях в будущем климате может привести к снижению всех основных биохимических показателей эвтрофикации в Финском заливе, особенно сильному для азотфиксации (на 29%) и биомассы сине-зеленых водорослей (на 28%). Другими словами, деятельность полихет *Marenzelleria spp.* может способствовать

улучшению состояния экосистемы моря, снижая интенсивность эвтрофирования Финского залива.

2) В целях совершенствования гидродинамического и биогеохимического описания Финского залива, применительно к нему были реализованы две различные гидродинамические модели высокого разрешения – NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean – платформа европейской модели океана) [18] и модель общей циркуляции Массачусетского Технологического Института MITgcm (Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model) [19, 20]. Используя первую из моделей, удалось улучшить воспроизведение весенне-летней эволюции термохалинной структуры в Финском заливе и оценить влияние горизонтального переноса на его стратификацию. Более того, используя модель NEMO, реализованную на 500-метровой сетке для периода 2007–2013 гг., было показано, что эстуарный тип циркуляции в заливе сильно модифицируется ветром и за счет геострофических эффектов [21]. Наиболее заметные субмезомасштабные движения связаны с апвеллингом и последующим формированием прибрежной струи. Обнаружены также сезонные различия в циркуляции залива, исчезающие при годовом осреднении. Вторая модель (MITgcm) послужила базой для разработки оригинальной модели цикла растворенного органического вещества в заливе [20]. Эта модель была тщательно верифицирована по имеющимся данным наблюдений (было использовано около 4000 океанографических станций), что позволило впервые получить полноценные оценки составляющих баланса азота и фосфора в Финском заливе в период 2009–2014 гг. [19].

3) Меры по смягчению последствий береговой эрозии на побережье острова Котлин в Финском заливе Балтийского моря. Интенсивная эрозия берегов в Финском заливе, наблюдаемая в последние 70 лет, может привести к полному исчезновению песчаных пляжей у о. Котлин (рис. 10) в ближайшем будущем. Разработан и испытан метод оценки интенсивности береговой эрозии в западной части о. Котлин, и на его основе рассчитаны параметры искусственной подсыпки, обеспечивающей сохранение песчаных пляжей [22]. Параметры искусственного пляжа определяются из совместной модели, объединяющей модели циркуляции воды, ветровых волн и динамики осадков. Расчеты скорости течений и ветровых волн проводились с использованием трехмерной гидродинамической модели восточной части Финского залива и волновой модели SWAN, соответственно. Деформация побережья из-за штормовых нагонов была рассчитана на основе модели CROSS-P. Исходными данными были начальный профиль глубины, характеристики донных осадков, скорость ветра, изменения уровня воды и параметров волн во время шторма, его продолжительность. По заданным внешним воздействиям (атмосферный форсинг из модели HIRLAM, граничные условия на открытой водной границе из модели HIROMB, рельеф дна и пляжа в прибрежной зоне по результатам вышеуказанных

геологических исследований) рассчитаны параметры профиля искусственного пляжа при максимальном штормовом нагоне (рис. 11), и оценен годовой объем песка, необходимый для сохранения искусственного пляжа.

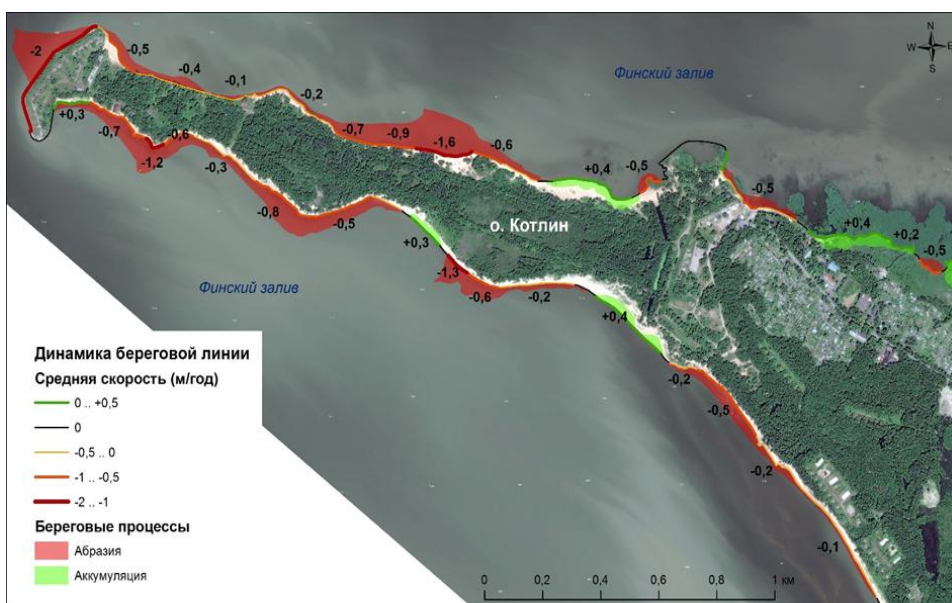


Рис. 10. Основные особенности прибрежной динамики западной части о. Котлин. Ретроспективный анализ проводился с использованием аэрофотоснимка, сделанного 15.08.1939. Это изображение с разрешением 2 м извлекается из набора данных открытого доступа <http://www.wwii-photos-maps.com>. Последняя конфигурация береговой линии берется с Яндекс.Карты с разрешением 1 м. Дата изображения: 02.07.2015

4) Модельные оценки влияния изменений климата на морские экосистемы и эвтрофикацию внутренних морей и озёр. Разработанная ранее модель эвтрофикации Балтийского моря SPBEM была использована для оценки экологического состояния Балтийского моря при возможных изменениях климата и биогенных нагрузок в XXI в. [23]. Для оценки неопределенности прогноза рассматриваются сильно отличающиеся между собой сценарии будущих изменений климата и различные сценарии биогенной нагрузки. Атмосферные метеорологические воздействия (АМВ) в использованных двух сценариях изменения климата были получены на основе расчетов по региональной климатической модели Центра Россби Шведского метеорологического и гидрологического института RCAO. В первом сценарии (АМВ-Е) на боковых границах атмосферы задавались характеристики, рассчитанные по глобальной модели климата ECHAM5/MPI-OM Института Метеорологии им. Макса Планка (Гамбург, Германия), во втором сценарии (АМВ-Н) – по модели HadCM3 Центра Хэдли в Великобритании. В обоих случаях расчеты были выполнены при задании сценария эмиссии парниковых газов A1B, предполагающего быстрый

экономический рост с использованием разнообразных источников энергии. В качестве будущих изменений нагрузки биогенными элементами рассматриваются два сценария: 1) опорный, в котором используются современные атмосферные выпадения и концентрации в реках, 2) Плана Действий по Балтийскому морю (ПДБМ), в котором используются уменьшенные концентрации биогенных элементов в реках, и задаётся пятидесятипроцентное уменьшение атмосферных выпадений. Согласно модельным оценкам, в будущем климате качество воды будет ухудшаться по сравнению с современными условиями. Это ухудшение оказалось сильнее в случае использования сценария АМВ-Н потепления климата с более сильным изменением приземной температуры воздуха. При рассмотренных сценариях изменения климата его потепление приведет к увеличению площади бескислородных и гипоксийных зон. Уменьшение биогенной нагрузки, предполагаемое в ПДБМ, сможет лишь частично компенсировать негативные последствия потепления климата.

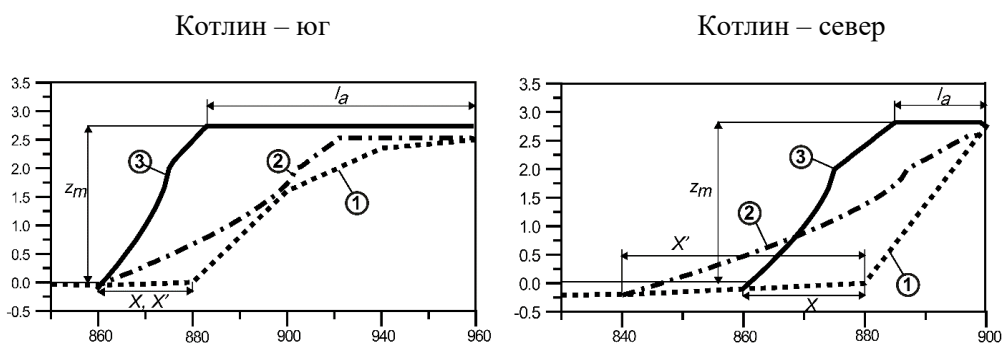


Рис.11. Расчетные профили искусственного пляжа: ось X – расстояние (м), ось Y – уровень воды (м), 1 – естественный профиль, 2 и 3 – искусственный профиль в случае песка 0.5 мм и гравия 2.0 мм, соответственно. X' – продвижение берега в случае песка 0.5 мм. На левом и правом фрагментах показаны типичные профили в точках на южном и северном побережье о. Котлин

Важным продолжением этой работы было участие В.А. Рябченко и А.В. Исаева в анализе результатов сценарных расчетов возможных изменений биогеохимических циклов в Балтийском море в будущем климате, который был выполнен большим международным коллективом ученых под руководством М. Мейера [24, 25]. Для оценки влияния реализации ПДБМ на будущее экологическое состояние Балтийского моря, был проанализирован самый большой за всю историю мультимодельный ансамбль сценарных расчетов для Балтийского моря для XXI в., состоящий из 58 расчетов, выполненных с шестью эко-гидродинамическими моделями [24]. Внешние атмосферные воздействия задавались на основе расчетов по различным региональным климатическим моделям, которые на боковых границах атмосферы использовали характеристики, рассчитанные по глобальным моделям климата с

различными будущими сценариями выбросов парниковых газов. Внешние нагрузки на экосистему (атмосферные выпадения биогенных элементов и их поступление с речными водами) задавались по имеющимся данным для исторического периода и в двух вариантах для будущего: такими же, как в современный период, и уменьшенными в соответствии с ПДБМ. Несмотря на, во-первых, различия в качестве моделирования в течение исторического периода и, во-вторых, значительные различия между моделями в задании нагрузки питательными веществами в течение настоящего и будущего периодов, среднее по ансамблю изменение биогеохимических переменных в центральной Балтике при снижении биогенной нагрузки оказалось близким для всего ансамбля модельных решений и его подмножества, состоящего только из самых надежных расчетов. Оказалось, что несмотря на большой разброс в прогнозах, реализация ПДБМ приведет к значительному улучшению экологического состояния Балтийского моря в соответствии с обоими указанными ансамблями.

Ещё один результат, полученный из анализа мультимодельного ансамбля сценарных расчетов для Балтийского моря для XXI в., – оценка неопределенностей сценарных расчетов [25]. Идентификация и знание неопределенности сценарных расчетов необходимы для принятия управленческих решений. Например, важно знать, приведет ли планируемое снижение нагрузки по питательным веществам к восстановлению статуса качества воды в будущем климате, или для его достижения потребуются дополнительные меры. Чтобы оценить эффективности этих мер, необходимо знать масштабы неопределенностей. Установлено, что наибольшие неопределенности вызваны: (1) неизвестными современными и будущими биодоступными биогенными нагрузками с суши и из атмосферы, (2) различиями в условиях проведения расчетов, включая способ получения равновесного решения, (3) различиями между проекциями глобальных и региональных моделей климата, в частности, в отношении повышения глобального среднего уровня моря и регионального круговорота воды, (4) различиями в реакции используемых моделей биогеохимических циклов на долговременные изменения внешних биогенных нагрузок и изменения климата региона Балтийского моря, (5) неизвестными выбросами парниковых газов в будущем. Для дальнейшего развития модельного подхода для корректировки ПДБМ рекомендуются регулярные оценки качества моделей (по сравнению с наблюдениями) для региона Балтийского моря и разброса в сценарных расчетах (различия между прогнозируемыми изменениями), а также совершенствование методов динамического уменьшения масштаба.

Опыт моделирования морских экосистем Балтийского моря был распространен на оценку состояния и прогнозирование изменений гидрологического режима и экосистем крупных озер [26]. Изменения гидрологического режима и экосистем Ладожского и Онежского озер исследовались по данным натурных наблюдений и моделирования биогеохимических потоков вещества. Экспериментальные

исследования показали, что за период 1951–2016 гг. при потеплении климата на водосборе озер с конца 80-х годов XX в. наблюдается устойчивое превышение нормы средней годовой температуры воздуха, а наиболее значимые ее изменения характерны для зимних месяцев. При потеплении климата и значительной межгодовой изменчивости суммарного речного притока и стока из озер за период 1955–2016 гг. тренды за 60 лет отсутствуют, рост годовых сумм осадков компенсируется ростом суммарного испарения. Процесс трансформации гидрологического и химико-биологического режимов Ладожского и Онежского озер представляет собой последовательность этапов, в течение которых менялся вклад внешних антропогенных и климатических факторов, а также роль процессов внутри водоёмов.

Для Ладожского озера создана модель, которая использована для исследования термогидродинамики, экосистемных процессов и биогеохимических круговоротов, протекающих в озере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий. По результатам расчетов современного и будущего состояния экосистемы Ладожского озера при изменении климата по сценарию A1B показано, что в будущем климате (до 2040 г.) прогнозируется увеличение температуры воды в целом по озеру на $0,4^{\circ}\text{C}$, а в поверхностном слое – на $0,7^{\circ}\text{C}$. При этом увеличение средней температуры в вегетативный период (апрель – октябрь) составит в целом для озера также $0,4^{\circ}\text{C}$, а для поверхностного слоя – $0,8^{\circ}\text{C}$. Реакция экосистемы на повышение температуры воды будет выражаться в увеличении первичной продукции фитопланктона за счет усиления процесса регенерации минерального фосфора, при сохранении средних значений его концентрации на стабильном уровне. Учитывая условия проведения численных экспериментов, а именно то, что в будущем климате поступление биогенных элементов с водосбора остается постоянным, выявленная реакция экосистемы Ладожского озера является реакцией исключительно на изменения климата, без учета возможных изменений антропогенных поступлений азота и фосфора в акваторию озера. Разработанная модель экосистемы Ладожского озера может быть положена в основу создания моделей экосистем других крупных стратифицированных озер, таких как Онежское, Байкал, Телецкое, а также для разработки систем поддержки принятия управленческих решений.

5) Оценки влияния ледового покрова на первичную продукцию фитопланктона в Баренцевом море (по результатам трехмерного моделирования). Для получения этих оценок привлекается трехмерная эко-гидродинамическая модель Принстонского Университета, основанная на модели океана и включающая: 1) блок морского льда с 7-ю категориями, 2) 11-компонентный блок морской пелагической экосистемы, разработанной в СПбФ ИО РАН [23]. Модель приводится в движение атмосферными воздействиями, заданными по данным реанализа NCEP/NCAR, и условиями на открытой границе моря, заданными по региональной модели системы

«атмосфера – океан – морской лед – биогеохимия океана», разработанной в Метеорологическом институте Макса Планка (Гамбург). Сравнение результатов расчета для периода 1998–2007 гг. со спутниковыми данными показало, что модель воспроизводит основные черты эволюции поверхностной температуры, границы сезонного ледового покрова, поверхностной концентрации хлорофилла «а» и первичную продукцию фитопланктона (ППФ) в Баренцевом море. Согласно данным наблюдений, весенне-летняя вспышка фитопланктона в районах Баренцева моря, покрытых льдом, происходит в период интенсивного разрушения ледового покрова в его маргинальной зоне. Это подтверждается результатами расчетов, представленными на рисунке 12, где сопоставлены пространственное распределение поверхностной концентрации хлорофилла «а» и границ распространения пакового льда $C_i = 0,8$ и маргинальной зоны льда $C_i = 0,15$ на 7 июня 1998 г. В этот момент времени, когда значительная часть моря была покрыта льдом, области максимальных значений концентрации хлорофилла «а» располагались в маргинальной зоне ледового покрова и на открытой воде в центральной части моря.

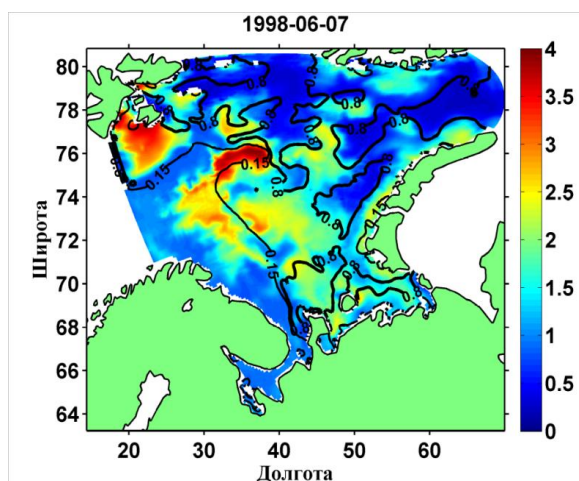


Рис. 12. Рассчитанная поверхностная концентрация хлорофилла «а» (мг м^{-3}) 7 июня 1998 г. Толстая и тонкая линии – граница паковых льдов ($C_i = 0,8$) и маргинальной ледовой зоны ($C_i = 0,15$)

Модельные оценки средней годовой ППФ всего моря APP_{mod} оказались в 1,5–2,3 раза больше аналогичных оценок APP_{data} по спутниковым данным. Основные причины расхождения оценок следующие: 1) APP_{data} относятся к открытой воде, тогда как APP_{mod} – ко всей акватории моря (под паковым льдом и в маргинальной зоне льда производилось 16–38% ППФ); 2) оценки APP_{data} занижают ее значения из-за подповерхностного максимума хлорофилла. За период 1998–2007 гг. максимальная в сезонном цикле модельная площадь льда в море уменьшилась примерно на 15%. Это уменьшение сопровождалось увеличением средней годовой ППФ моря на 54 и 63%,

соответственно, по спутниковым данным и модельным расчетам для открытой воды. Согласно модельным расчетам для всей акватории моря, это увеличение составляет только 19%. Таким образом, адекватные оценки первичной продукции в покрытых льдом морях могут быть получены только на основе эко-гидродинамических моделей, включающих морской лед.

6) Модельные оценки вклада экосистемы в обмен углекислым газом между океаном и атмосферой в Баренцевом море. С целью оценки этого обмена использованная в предыдущем пункте эко-гидродинамическая модель была модифицирована путем замены 11-компонентной экосистемной модели на 7-компонентную модель, включающую углеродный цикл [27]. Эта экосистемная модель описывает взаимодействие фитопланктона, зоопланктона, растворенного неорганического азота, суммарного неорганического углерода, щелочности, органических и неорганических частей детрита. Выполнены расчеты концентрации хлорофилла «а» и потока CO_2 между атмосферой и морем в период максимального весеннего цветения фитопланктона в Баренцевом море при различных условиях. Показано соответствие между зонами интенсивного роста фитопланктона в период цветения и положением Полярного фронта. Выполнена оценка интенсивности обмена CO_2 между океаном и атмосферой при наличии и отсутствии биологического стока CO_2 . Для случая без учета океанического биологического стока углекислого газа получено, что максимальные значения потока CO_2 из атмосферы в океан наблюдаются непосредственно в районах кромки льда. Для случая учета влияния морской экосистемы на обмен CO_2 между океаном и атмосферой показано соответствие зон максимальных значений потока углекислого газа из атмосферы в океан и зон повышенных значений первичной продукции. Сделан вывод, что пространственная изменчивость потока углекислого газа между океаном и атмосферой обусловлена пространственной изменчивостью первичной продукции гораздо в большей степени, чем изменчивостью поверхностной температуры воды.

7) Межгодовая изменчивость суммарной годовой первичной продукции в Баренцевом и Карском морях. На основе региональной совместной эко-гидродинамической модели Баренцева, Карского и Белого морей выполнены сценарные расчеты для прошлого (1975–2005 гг.) и будущего (2035–2065 гг.) климата [28]. Согласно результатам, для периода 1975–2005 гг. при уменьшении площади ледяного покрова первичная продукция фитопланктона (ПП) в регионе значительно возрастает. Однако в 1999–2000 гг. произошел «сбой» указанной взаимосвязи, и ПП начала уменьшаться вместе с продолжающимся сокращением площади льда. Возможные причины связаны с преобладанием в этот период других лимитирующих ПП факторов: 1) произошло увеличение облачности, что привело к уменьшению фотосинтетически-активной радиации (ФАР), или 2) усилилась плотностная устойчивость верхнего слоя, что затруднило поступление биогенов из нижележащих

слоев моря. Анализ изменений плотностной устойчивости показал, что вторая причина вряд ли имела место – значительного изменения плотностной устойчивости в результатах выявлено не было.

Анализ временного хода интегральной ПП, площади льда и падающей коротковолновой радиации (КВР) показал, что основной причиной уменьшения рассчитанной ПП в конце периода 1975–2005 гг. является падение ФАР в верхнем слое. Установлено, что большая площадь льда нивелирует влияние падающей КВР из атмосферы – она не проходит в воду или значительно ослабляется. В случае малой площади льда для относительно высоких значений ФАР хватает и средних уровней падающей КВР. Из внешних факторов площадь льда играет первостепенную роль в образовании ПП: в подавляющем большинстве случаев вклад площади льда преобладает, и выполняется закономерность «больше льда – меньше ПП» и наоборот. Влияние же падающей КВР существенно сказывается только при значительном уменьшении площади льда.

По результатам расчета 1975–2005 гг. получена регрессионная зависимость (модель множественной линейной регрессии – МЛР) для суммарной за год ПП от среднегодовой площади льда и среднегодовой интегральной по области падающей коротковолновой радиации. Установлено, что, если для периода 1975–2005 гг. в целом, наблюдался рост площади льда и падение ПП, то для периода 2035–2065 гг. характерна обратная картина. Противофазность во временном ходе суммарных ПП и площади льда выражена достаточно четко: годам с малой ледовитостью свойственна высокая ПП, и наоборот. Полученная для периода 1975–2005 гг. модель МЛР показала хорошие результаты на независимой выборке 2035–2065 гг. (рис. 13). Корреляция между исходным рядом интегральной ПП и ПП, вычисленной по модели МЛР, для периода 2035–2065 гг. оказалась даже выше (0,95), чем для периода 1975–2005 гг. (0,87). Это оправдывает использование полученной статистической модели для оценочных расчетов ПП по площади льда и падающей КВР.

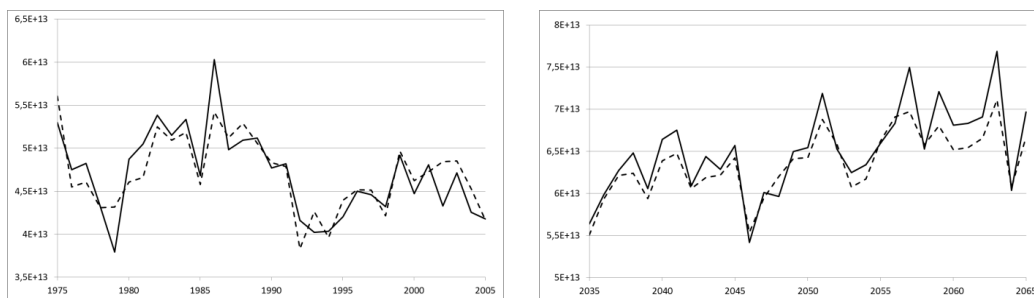


Рис. 13. Межгодовая изменчивость суммарной годовой ПП [г С] (сплошная линия) и ПП, вычисленной по модели МЛР (пунктирная линия). Слева – для периода 1975–2005 гг., справа – для периода 2035–2065 гг.

3. Оптика океана и атмосферы

Лаборатория оптики океана и атмосферы Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова, созданная в 1969 г. по инициативе профессора К.С. Шифрина, в 2016–2019 гг. продолжила работу над проблематикой совершенствования методов и средств дистанционного оптического зондирования океана. В настоящее время общее руководство лабораторией осуществляет к.ф.-м.н. М.А. Родионов. Область научных интересов – моделирование сигнала обратного рассеяния от гидрооптических неоднородностей морской среды. Сотрудники О.В. Глитко, В.А. Глухов, О.Н. Французов проводили работы по дистанционному лидарному зондированию океана. К.ф.-м.н. И.В. Золотухин занимался применением теории оптимизации оптического эксперимента к задачам дистанционного зондирования океана. К.ф.-м.н. А.Я. Гольмшток исследовал изменение термобарического режима слоя гидратсодержащих отложений в озере Байкал в эпоху голоцена.

Важнейшие научные достижения лаборатории с начала XXI столетия

– Разработана теория переноса импульсного излучения через трехслойную среду (облако + атмосфера + океан) для расчета оптической линии связи между космическим и подводным объектами.

– Создана (совместно с ИПФ РАН) универсальная теория подводного видения и видения через взволнованную поверхность моря, отраженная в двух монографиях и удостоенная премии им. Д.С. Рождественского Президиума РАН за лучшие работы в области оптики (2010 г.).

– Разработан метод коррекции искажений изображения подводного объекта, вносимых волнением. Впервые в мировой практике такая коррекция проведена в результате лабораторного эксперимента.

– Разработана статистическая теория дистанционного определения концентрации в воде фитопланктона, взвеси и растворенной органики по спектрам яркости океана с учетом шумов приемника.

– Проведено изучение гидрооптических и гидрологических характеристик Баренцева, Белого, Карского и Черного морей, на основе которых разработаны оптимальные лидарные методы обнаружения внутренних волн и других нестационарных процессов в толще воды.

В период 2016–2021 гг. основные направления исследований Лаборатории включали:

– Разработку оптимальных дистанционных лидарных методов обнаружения и регистрации внутренних волн и других процессов в толще морской среды.

– Моделирование лидарных изображений внутренних волн и турбулентности в океане.

- Экспериментальные исследования гидрооптических и гидрологических характеристик морей России и изучение их взаимосвязей.
- Экспериментальные исследования переноса излучения и изображения через взволнованную водную поверхность в лабораторном бассейне и натуральных условиях.
- Экспериментальные исследования пространственной неоднородности гидрооптических характеристик с помощью лидаров.
- Разработку и создание морских радиометрических лидаров.
- Разработку приборов для изучения гидрооптических характеристик океана.

К основным научным достижениям по направлениям исследований можно отнести следующее.

1) Современный подход к моделированию лидарного сигнала [29].

Обобщение и анализ современных работ по лидарному зондированию морской среды показывает, что наиболее чувствительным к различного рода неоднородностям в толще морской воды является метод поляризационного лидарного зондирования, когда зондирование толщи морской воды производится коротким узконаправленным линейно поляризованным лазерным импульсом, а приемная система регистрирует временную зависимость мощности двух взаимно ортогональных компонент эхо-сигнала – ко-поляризованную и кросс-поляризованную. Используя данный подход, совместно с сотрудниками ИО РАН была сформулирована модель лидарного сигнала с учетом поляризации излучения, и проведены пробные расчеты лидарного сигнала для модельного профиля распределения по глубине гидрооптических характеристик. Из результатов расчетов следует, что кросс-поляризованная компонента эхо-сигнала оказывается наиболее информативной в отношении стратификации рассеивающих свойств водной среды.

Как следует из представленных на рис. 14 данных, отношение пиковых значений амплитуд сигналов от мишени и от воды при всех дальностях до мишени существенно выше (в ~2,3 раза) для случая кросс-поляризованных компонент эхо-сигналов.

Участок спада эхо-сигнала от воды во временном интервале, соответствующем моменту прихода сигнала от мишени, для сигнала от мишени является фоном. Отношение амплитуды $P_{сис}(t)$ и уровня фона определяет возможность выделения и регистрации сигнала от мишени. Кроме того, от уровня фона в основном зависит уровень шумов, определяющих предельную дальность локации мишени.

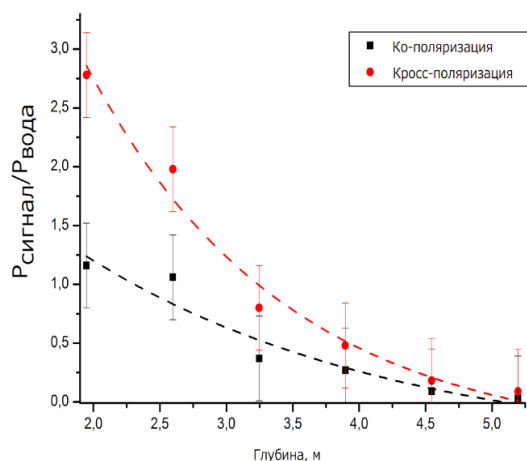


Рис. 14. Отношения пиковых значений эхо-сигналов от мишени и от толщи воды в зависимости от дальности до мишени

Зависимость отношения пиковой амплитуды $P_{сиг}(t)$ к амплитуде соответствующего участка спада $P_{\phi}(t)$ (к уровню фона) от дальности до мишени для ко- и кросс-поляризованных компонент эхо-сигнала показана на рис. 15. Как следует из приведенных на рисунке зависимостей, при всех исследованных дальностях до мишени регистрация кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала дает существенное преимущество по сравнению с регистрацией ко-поляризованной компоненты.

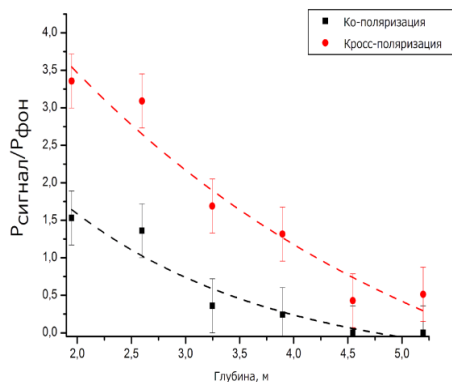


Рис. 15. Зависимость отношения пиковых значений эхо-сигналов от мишени и уровня фона от дальности до мишени

2) Оценки взаимосвязи гидрооптических и гидрофизических характеристик в районах проведения натурных.

Для оценки взаимосвязи гидрооптических и гидрофизических характеристик были использованы данные измерений показателя ослабления света морской воды и гидрологических характеристик, полученные в ходе экспедиций в Белом и Баренцевом морях в июле-августе 2016 г. Был проведен корреляционный анализ данных натурных измерений между глубинами залегания слоя скачка плотности и скачка показателя ослабления света. Результаты проведенного корреляционного анализа данных натурных измерений для данных акваторий в условиях со скачком плотности позволяют сделать вывод о наличии высокой взаимосвязи между глубинами залегания гидрооптических и гидрофизических неоднородностей (см. рис. 16 и 17). Таким образом, наличие высокой взаимосвязи между гидрооптическими и гидрофизическими неоднородностями в морской среде позволяет использовать дистанционные и контактные оптические средства для определения характеристик плотностной стратификации.

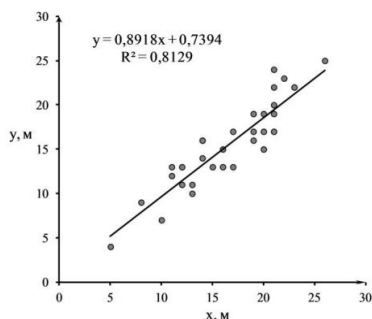


Рис. 16. График связи и линия линейной регрессии для глубины залегания слоя скачка по данным плотности воды «x» и показателя ослабления «y» (Белое море)

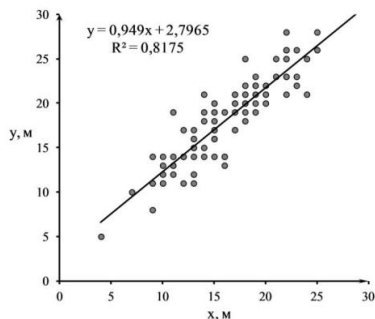


Рис. 17. График связи и линия линейной регрессии для глубины залегания слоя скачка по данным плотности воды «x» и показателя ослабления «y» (Баренцево море)

3) Разработка комплекса программ для первичной обработки данных лидарного зондирования.

В ходе выполнения работы был разработан первый вариант комплекса программ, необходимых при проведении исследований с помощью морского лидара. Комплекс программ позволяет:

- проводить записи лидарных сигналов с осциллографов Tektronix и LeCroy;
- просматривать весь массив сигналов с привязкой по времени;
- определять параметры сигнала заданием параметров аппроксимации;
- проводить автоматическую выборку необходимых сигналов.

Пример работы программ приведен на рис. 18.

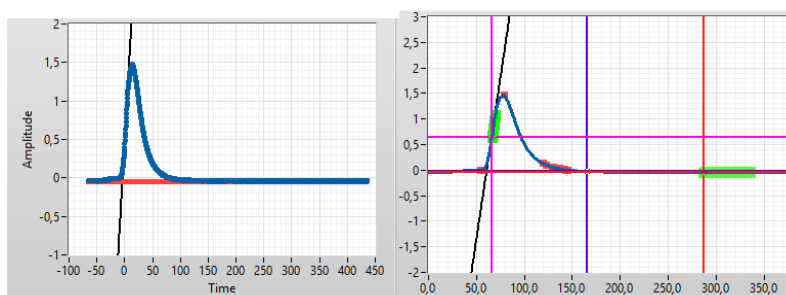


Рис. 18. Пример работы программы для определения начала сигнала по заданию параметров аппроксимации

4) Оценки влияния отдельных субмезомасштабных структур на локальные концентрации фитопланктона в Белом море [30].

Субмезомасштабные вихревые структуры являются распространенным явлением на акватории Белого моря вообще и Онежского залива в частности. Для исследования влияния их на концентрацию хлорофилла требуются данные высокого разрешения ввиду их небольших размеров. Несмотря на то, что субмезомасштабные вихри имеют свое поверхностное проявление, не во всех данных о поверхности они могут одинаково четко находить свое отражение. В частности, не все вихри, отображаемые в радиолокации, в ТПМ, либо в контактных измерениях, имеют свое отражение в полях концентрации хлорофилла в Белом море, получаемых по спутниковым данным. Субмезомасштабные вихри могут не проявляться в виде отдельных структур в данных видимого диапазона, как мы можем видеть их в РЛИ, и могут устойчиво регистрироваться только в полях ТПМ. Аналогичная картина соответствует и цепочкам вихрей. Хотя данные контактных измерений указывают, что влияние субмезомасштабных вихревых структур в Онежском заливе на распределение хлорофилла проявляется преимущественно в области скачка температуры и солености. При этом вихревые структуры с одним и тем же типом

закрутки по РЛИ могут характеризоваться как подъемом вод, который приводит к уменьшению концентрации хлорофилла, так и опусканием вод, которое, по-видимому, как обратный механизм, может приводить к «сгущению» и увеличению концентрации хлорофилла в центре вихревой структуры. Соответственно, в Онежском заливе субмезомасштабные вихри влияют на вертикальное и горизонтальное распределение хлорофилла, но не все из них находят свое отображение в данных текущих спутниковых наблюдений. На рис. 19 показано распределение температуры (а) и концентрации хлорофилла а (б) на глубине 12 м в исследуемом районе.

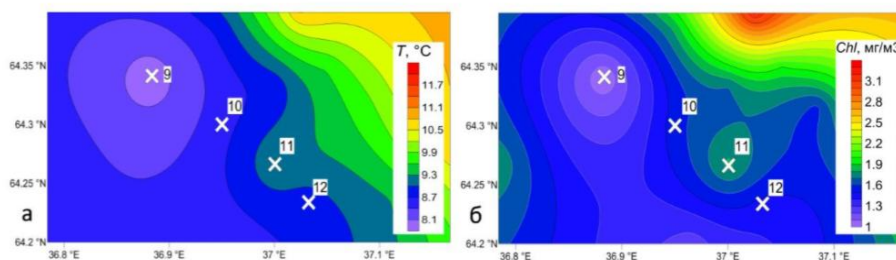


Рис. 19. Распределение температуры (а) и концентрации хлорофилла а (б) на глубине 12 м. Крестиками указаны местоположения станций с 9 по 12 на полигоне. Пунктиром выделена область вихревой структуры

5) Экспериментальная оценка возможностей лидара ПЛД-1 по регистрации гидрооптических неоднородностей в толще морской среды [29].

Морской поляризационный лидар ПЛД-1, использующий в качестве источника зондирующего излучения твердотельный импульсный лазер на АИГ:Nd с диодной накачкой, предназначен для решения задач, связанных с определением пространственной структуры полей гидрооптических характеристик, а также регистрации и определения положения объектов в толще морской воды. Проведена оценка возможностей макета лидара по поиску различных объектов, находящихся в толще морской воды. Уверенно зарегистрированы эхо-сигналы от плоской и сферической мишеней при протяженности подводного участка трассы зондирования, более чем в двое превышающем глубину видимости белого диска Зб. Продемонстрированы возможности макета лидара по обнаружению подводных объектов в толще морской воды через взволнованную поверхность. Продемонстрировано преимущество поляризационного метода локации погруженных объектов с регистрацией кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала. Получены данные, позволяющие сделать оценки разрешающей способности и точности определения положения при регистрации погруженных объектов вблизи поверхности и дна.

Проведенные эксперименты подтвердили принципиальную возможность коррекции искажений, вызываемых ветровым волнением, и возможность определять уклон водной поверхности по сигналу дополнительного источника, опознаваемому по его оптическим характеристикам. Данный метод разрабатывался для наблюдений при диффузном освещении объекта, но при этом он дает возможность определить потребности в информации о ветровых волнах (вероятностных характеристиках и мгновенных значениях уклонов) для распространения метода на лазерное облучение объекта наблюдения.

Проведена оценка возможностей макета ОГС по обнаружению и определению положения подводных объектов в толще морской воды через взволнованную поверхность. Проведена оценка точности определения расстояния от поверхности воды до поверхности объекта в реальных условиях. Для ко-поляризованного канала погрешность определения расстояния от поверхности воды до объекта составила 0,05 м, для кросс-поляризованного канала – 0,04 м. Получена оценка погрешности определения поперечных размеров объекта, по нашим измерениям она составила 0,067 м. Получены данные, позволяющие продемонстрировать возможности обнаружения и регистрации объектов, лежащих на дне.

Вид оптического блока лидара показан на рис. 20.



Рис. 20. Оптический блок лидара ПЛД-1

б) Авиационная лидарная батиметрическая съёмка прибрежных акваторий с большой высоты [31].

Выполнена уникальная авиационная лидарная батиметрическая съёмка акватории Бечевинской бухты (п-ов Камчатка), отличающейся сложными условиями полета (узкая бухта окружена высокими сопками). Схема полета приведена на

рис. 21. Высота полёта самолета при проведении съёмки менялась в диапазоне 500–1200 м. Съёмка выполнялась с использованием Авиационного Поляризационного Лидара АПЛ-3 (энергия зондирующего импульса 40 мДж, длительность зондирующего импульса 7 нс, диаметр приемной оптической системы 100 мм), разработанного в лаборатории оптики океана и атмосферы СПбФ ИО РАН совместно с сотрудниками лаборатории оптики океана ИО РАН (Москва). Максимальная глубина зондирования дна с высоты 500 м составила 21,5 м, с высоты 1200 м – 17,5 м. Изображение рельефа приведено на рис. 22. Выполнены оценки энергии зондирующего импульса, требуемой для локации дна с разных высот. Для локации дна до глубины 25 м с безопасной для полетов над всей акваторией бухты высоты 2500 м необходимо увеличить энергию зондирующего импульса более чем в 20 раз. Увеличение высоты съёмки с 200 м до 2500 м в данных условиях для регистрации эхо-сигнала от дна при глубине 25 м требует увеличения энергии зондирующего импульса почти в 150 раз.

Поляризационный метод обеспечивает при зондировании светорассеивающих слоев и локации дна ряд преимуществ. В связи с этим в данной работе при анализе экспериментов по локации морского дна рассматриваются, в основном, данные регистрации кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала.

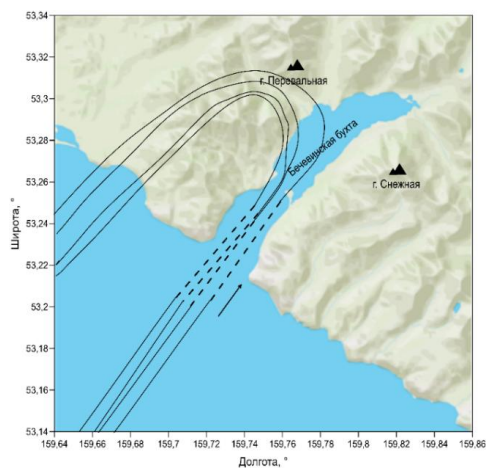


Рис. 21. Схема полетов над акваторией Бечеви́нской бухты. Пунктиром показаны участки, на которых производилось лидарное зондирование. Стрелкой показано направления полета на галсах

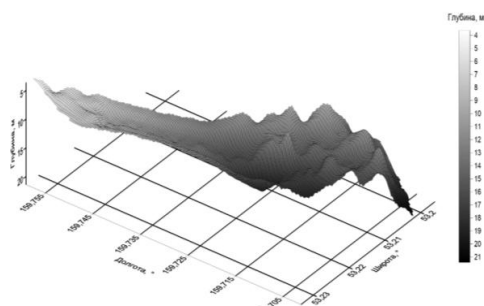


Рис. 22. Трехмерное изображение рельефа дна Бечевинской бухты, построенное по данным лидарной батиметрической съемки с самолета

7) Новый авиационный поляризационный лидар АПЛ-4 (см. рис. 23).

В 2019–2020 гг. в Лаборатории оптики океана и атмосферы СПбФ ИО РАН совместно с сотрудниками Лаборатории оптики океана ИО РАН был разработан и изготовлен авиационный поляризационный лидар АПЛ-4. К основным особенностям этого лидара относятся наличие специально разработанного цифрового блока, осуществляющего управление, оцифровку эхо-сигналов, их запись на долговременном носителе, позиционирование и оперативную обработку результатов зондирования непосредственно в ходе лидарной съёмки, а также обладающий небольшими размерами, низким энергопотреблением.

Натурные испытания лидара АПЛ-4 были проведены над акваторией Онежского озера в июле 2020 г.

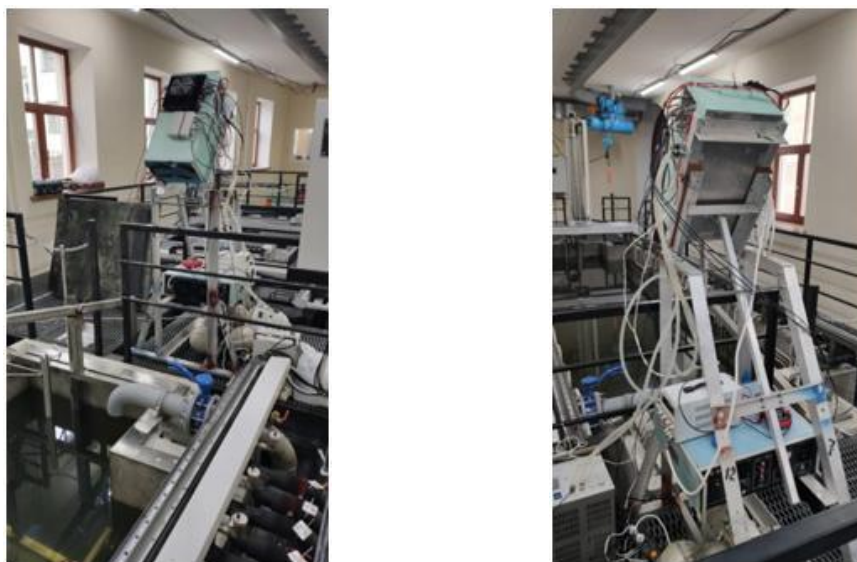


Рис. 23. Вид лидара АПЛ-4, установленного в лабораторном бассейне СПбФ ИО РАН

4. Геофизические пограничные слои

Лаборатория геофизических пограничных слоев получила свое наименование в 2013 г. в связи со значительным расширением спектра проводимых исследований. До этого подразделение называлось Лаборатория динамической метеорологии. При образовании Лаборатории в 1973 г. ее возглавлял д.ф.-м.н. Д.В. Чаликов, а последние годы ей руководит д.г.н. А.В. Зимин.

Важнейшие научные достижения лаборатории с начала XXI столетия

- Обосновано существование механизма генерации турбулентности в поле потенциальных волн.
- Создана оригинальная модель волнового пограничного слоя.
- Создана спектральная модель волнового пограничного слоя в максвелловской постановке.
- Выполнено обобщение закономерностей взаимодействия поверхностных и внутренних волн, в том числе при обтекании подводных препятствий.
- Выполнено прямое моделирование генерации внутренних волн поверхностными и их дальнейшего взаимодействия.
- Разработана методика геодинамического анализа глубоких осадочных бассейнов.
- Исследовано влияние климатических факторов и разломообразования на условия стабильности газовых гидратов в придонных осадках океана.
- Выполнен анализ эвстазии, гляцио- и литоизостазии в рамках квазиобратимых упругих деформаций повсеместно трещиноватой земной коры.

За последние пять лет в Лаборатории геофизических пограничных слоев естественным образом сложились несколько творческих коллективов, результаты работы каждого из которых представляются заслуживающими внимания. Исследованиями взаимодействия океана и атмосферы на основе объединенной модели атмосферного волнового пограничного слоя и ветровых волн занималась группа под руководством д.ф.-м.н., проф. Д.В. Чаликова (к.ф.-м.н. К.Ю. Булгаков, к.ф.-м.н. М.Ю. Белевич). Пограничные слои внутри океана изучались двумя группами, возглавляемыми д.г.н. А.В. Зиминим (к.г.н. О.А. Атаджанова, Г.В. Жегулин, А.А. Коник, Е.И. Свергун – обобщение результатов натурных наблюдений) и к.ф.-м.н. А.С. Сафраем (д.т.н. И.В. Ткаченко, к.г.н. С.М. Гордеева – математическое моделирование).

В последние годы основные направления работ Лаборатории включали:

- Совместное моделирование океана, атмосферы и морских волн.
- Оценку статистики и механики экстремальных волн (волн-убийц).
- Изучение взаимодействия внутренних и поверхностных волн.
- Комплексные исследования субмезомасштабных вихревых структур и короткопериодных внутренних волн.

Основные достижения лаборатории.

1) Даны интегральные оценки вероятности возникновения волны значительной высоты [32-34].

Рассмотрена проблема статистических свойств экстремальных волн с применением численного моделирования двумя методами. Первый основан на прямом численном моделировании двухмерного волнения с помощью трёхмерной нелинейной модели. Второй метод состоит в подсчёте вероятности высот волн для ансамбля полей, представляющих собой суперпозицию линейных волн со случайными фазами и спектром, аналогичным волновому спектру, полученному в нелинейной модели. Показано, что интегральные распределения вероятности экстремальных волн в обоих случаях очень близки друг к другу. Из этого следует, что роль нелинейности в генерации экстремальных волн, видимо, не так существенна, как предполагается в большинстве работ, посвящённых этому явлению.

Наиболее важный результат, полученный с трёхмерной моделью, показан на рис 24, где представлены интегральные вероятности для волновых гребней (кривые 1 и 3) и подошв (кривые 2 и 4). Кривые 1 и 2 получены с трёхмерной моделью, кривые 1 и 4 рассчитаны по ансамблю линейных волн. Из графиков видно, что высота гребней значительно больше, чем глубина подошв, и разница между ними увеличивается с высотой волны. Этот эффект отражает нелинейные свойства волн.

Одна из проблем, которая может решаться на основе полученных результатов, – статистическое описание волновых режимов на основе данных о повторяемости доминантной волны.

2) Сформулирована одномерная модель пограничного слоя над волнами, предназначенная для объединения атмосферных и океанических моделей с моделями поверхностных волн [35, 36].

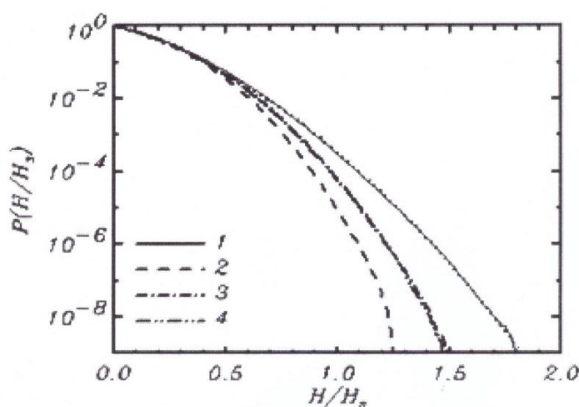


Рис. 24. Интегральная вероятность для гребней (кривые 1 и 3) и подошв (кривые 2 и 4), нормализованные высотой доминантной волны

Модель основана на результатах ранее проведённых численных экспериментов с объединённой двумерной моделью волнового пограничного слоя. Пограничный слой над волнами отличается от пограничного слоя над твёрдой поверхностью появлением дополнительного механизма вертикального волнового потока импульса, созданного непосредственно искривлённой и движущейся поверхностью. Одномерные уравнения волнового пограничного слоя могут быть выведены только в следующей поверхности системе координат. В этом случае уравнения явно содержат дополнительные члены, отражающие специфику взаимодействия ветра и волн. Обмен импульсом между ветром и волнами рассчитывается в спектральном пространстве как сумма отдельных потоков, создаваемых волновыми модами. Традиционно предполагается, что поток импульса пропорционален спектральной плотности волновой энергии с коэффициентом пропорциональности, зависящим от возраста моды. Проведены расчёты, иллюстрирующие особенности волнового пограничного слоя: профили скорости ветра, энергии турбулентности, волновых и турбулентных потоков импульса. Обсуждается соотношение внешнего (на верхней границе волнового пограничного слоя) и внутреннего (у поверхности) параметров шероховатости. Показывается, что коэффициент сопротивления зависит от скорости ветра и от параметров волнения, в частности, от формы спектра, что объясняет большой разброс данных для этой величины. Сформулированы перспективы дальнейшего развития подхода и его применения в задачах геофизической гидродинамики. Модель такого рода предназначена для объединения атмосферных и океанических моделей с моделями поверхностных волн (рис. 25).

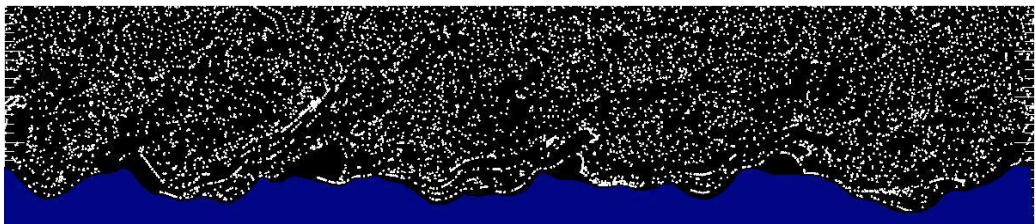


Рис. 25. Типичная картина обтекания многомодового волнового поля. Структура потока (направленного слева направо) показана трассерами. Хорошо видны затемнённые зоны отрыва потока, где формируется обратный поток импульса и энергии от волн к ветру

3) Исследовалось взаимодействие внутренних и поверхностных волн [37].

В численных экспериментах с прохождением внутренней волны в канале описана эволюция процесса, и получены количественные характеристики времени перехода от сонаправленного волнового движения до достижения условий синхронизма и нелинейного трехволнового взаимодействия. С помощью вейвлет-анализа получена картина перекачки энергии от волны форсинга и длинной волны к

результатирующей внутренней волне (рис. 26). Исследовано влияние вариаций граничных условий на эволюцию одиночной волны в канале.

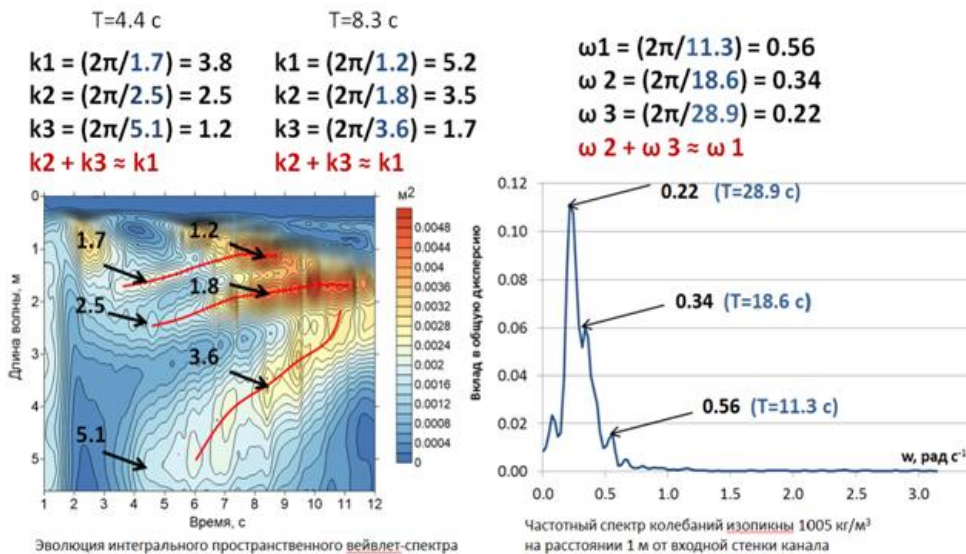


Рис. 26. Нелинейное трехволновое взаимодействие

4) Исследовались закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в приливном арктическом море [37, 39].

Разработана научная концепция, заключающаяся в том, что субмезомасштабные структуры формируются под влиянием внешнего форсинга и в совокупности на акватории моря образуют единую систему, являющуюся переходным звеном от мезомасштабных (приливных) движений к микроструктуре. Для их исследования следует применять специальную методологию, сочетающую наблюдения и совокупный анализ широкомасштабных дистанционных и учащенных контактных измерений. Предложены методы исследования и комплексного анализа мониторинга тонкоструктурных и субмезомасштабных процессов на акватории приливного моря на основе сочетания спутниковых данных и учащенных во времени и пространстве наблюдений на океанографических полигонах (рис. 27).

5) Описаны особенности субмезомасштабной вихревой динамики в арктических морях по данным спутниковых наблюдений [40].

Приведены обобщенные результаты исследования поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей в Баренцевом, Карском и Белом морях на основе анализа около 3,5 тысяч спутниковых радиолокационных изображений в безледный период с 2007 по 2012 гг. Для выявления общих черт субмезомасштабной вихревой активности на фоне процессов большего масштаба использовались данные по температуре

поверхности моря, по которым оценивалось положение фронтальных зон, и сведения о приливных процессах за тот же период.

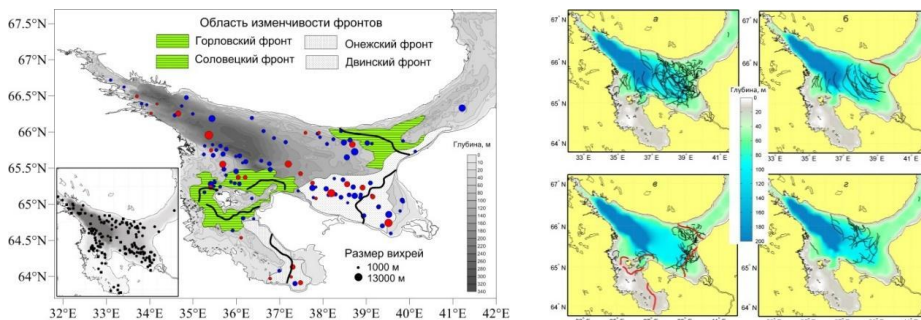


Рис. 27. Композитные карты, сочетающие положения короткопериодных внутренних волн, малых вихревых структур и фронтальных зон в Белом море

На акваториях исследуемых морей было зарегистрировано около 4,5 тысяч структур. Показано, что субмезомасштабные вихри – распространенное явление в летний сезон на акватории описываемых морей. Чаще всего встречаются вихри диаметром 2–4 км. Установлено, что во всех морях преобладает циклонический тип проявлений вихрей, при этом размер антициклонических структур в среднем всегда больше. Максимальное число вихрей наблюдается в начальный период формирования сезонного приповерхностного пикноклина. Сопоставление положений поверхностных проявлений вихревых структур с положениями фронтальных зон и топографией дна показало, что частая встречаемость проявлений преимущественно отмечается вблизи и внутри областей изменчивости фронтальных зон (рис. 28), а также в районах со значительными неровностями дна. В районах подводных возвышенностей максимальное количество вихревых структур фиксировалось в период сизигийного прилива.

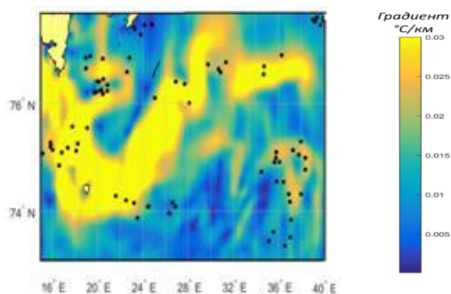


Рис. 28. Карта среднедекадных значений градиента ТПМ и положения центров проявлений субмезомасштабных вихрей за первую декаду июля 2007 г.

б) Важным направлением исследований филиала является изучение дна озера Байкал. Один из основополагающих результатов связан с нестандартной компьютерной обработкой данных многоканального сейсмического профилирования оз. Байкал. Области перехода и согласования рифтового отрезка Южного Байкала и рифтового отрезка Центрального Байкала являются важным районом для понимания процессов развития Байкальской рифтовой зоны, так как здесь в структуре поверхности фундамента, в строении осадочного чехла и в характере разломообразования зафиксирована вся история формирования этого внутриконтинентального рифта, но и окружающей обстановки во всей Евразии. В результате такой обработки во многих местах получено изображение поверхности кристаллического фундамента и глубоких частей осадочного разреза. Выявлен древний разлом фундамента с вертикальным смещением по нему до 5 км. Построена карта глубинных разломов (рис. 29).

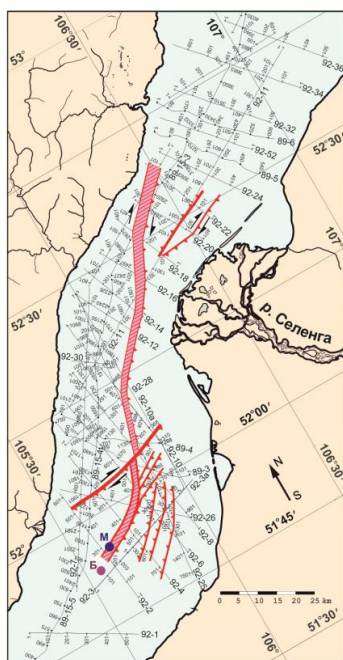


Рис. 29. Карта глубинных разломов фундамента на озере Байкал (зона аккомодации рифтовых отрезков Южной и Центральной впадин озера).
 Обозначения: Малиновая заштрихованная полоса – уступ в рельефе поверхности фундамента, образованный древним разломом (листрический сброс) фундамента.
 Ограничивающая полосу красная линия – верхнее ребро уступа, красная линия с бергштрихами – нижнее ребро уступа с указанием направления падения сброса; Черные полустрелки указывают направление смещения бортов сдвигового разлома; красные линии с бергштрихами – сбросы с указанием направления падения; синий кружок с литерой М – грязевой вулкан «Маленький», фиолетовый кружок с литерой Б – грязевой вулкан «Большой»; тонкая линия с обозначением типа В92-13 – многоканальный сейсмический профиль, черточки на линиях с цифрами – пункты возбуждения упругих колебаний

Полученные результаты имеют принципиальное значение для понимания эволюции и механизмов образования как Байкальской рифтовой зоны, так и внутриконтинентальных рифтов в целом.

Разработан алгоритм определения палеомощностей слоев (без учета фазовых превращений в глинах, подобно переходу смектит – иллит), составляющих осадочный чехол. Восстановление условий уплотнения осадочной толщи и, в частности, определение палеомощностей слоев, слагающих осадочный покров, представляют значительный интерес для геологов и геофизиков, занимающихся проблемами образования и развития осадочных бассейнов, формирования скоплений углеводородов и их миграции, а также предсказанием размеров и свойств резервуаров, в которых и образуются нефтегазовые залежи.

5. Научно-исследовательское оборудование

В результате реконструкции здания в филиале Института океанологии был создан уникальный лабораторный научно-исследовательский комплекс, включающий три экспериментальных бассейна: гидрофизический бассейн, гидроакустический бассейн и вращающийся стратифицированный бассейн.

Гидрофизический бассейн (рис. 30) предназначен для физического моделирования гидрофизических процессов в глубине морской среды, на границах раздела «вода-воздух» и «вода-дно». В бассейне могут изучаться поверхностные и внутренние волны, взаимодействие волн между собой, взаимодействие внутренних волн с дном, а также различные аспекты турбулентности, возникающей в стратифицированной жидкости. Объем бассейна составляет 29,3 м³, внутренние габариты ванны бассейна, длина, ширина, глубина (ДШГ) – 7,0, 2,0, 2,2 м.



Рис. 30. Гидрофизический бассейн

Для создания и поддержания температуры для масштабного моделирования натурной стратификации воды по плотности в бассейне размещены теплообменные

поверхности, набираемые из гибкой гофрированной нержавеющей трубы. Объем бассейна разделяется на три равные зоны по высоте. В каждой зоне предусматривается установка теплообменников с возможностью их подключения к «горячему» или «холодному» контурам. Источником теплоснабжения и холодоснабжения для теплообменников бассейна является холодильная машина, установленная в техническом помещении.

Гидроакустический бассейн с рабочим объемом 14,4 куб. м. предназначен для исследования акустических явлений в жидкости (рис. 31). Внутренние габариты ванны бассейна, (ДШГ) – 4,0, 2,0, 2,2 м. Объем бассейна составляет 17,6 м³.

Автоматизированная система линейного перемещения обеспечивает закрепление измерительных излучателей и приемников, и испытываемых образцов, перемещение их вдоль и поперек бассейна, вверх, вниз и вращение вокруг геометрической оси, а также отсчет и регистрацию значений текущих координат. Имеется комплекс водоподготовки при заполнении гидроакустического бассейна.

Акустический бассейн позволяет проводить:

- исследования характеристик макетов излучающих и приёмных гидроакустических антенн;
- исследования отражающих свойств объектов различной формы и материала изготовления;
- регистрацию шумоизлучения макетов подводных техногенных объектов;
- исследования отражающих свойств биологических объектов (рыб);
- регистрацию сигналов биологических объектов (рыб);
- исследования акустических характеристик звукопоглощающих материалов;
- исследования акустических характеристик воздушных пузырьков;
- исследования методов формирования и излучения гидроакустических сигналов;
- исследования методов приёма гидроакустических сигналов;
- физическое моделирование функционирования макетов гидроакустических устройств различного назначения.

Вращающийся стратифицированный бассейн (рис. 32) с рабочим объемом 0,8 м³ предназначен для выполнения экспериментальных исследований динамических процессов с учетом вращения Земли и сложных геоморфологических условий прибрежных акваторий и морского шельфа. Бассейн может использоваться для изучения динамики и структуры вихрей в однородной, многослойной (с несмешивающимися и смешивающимися компонентами) и непрерывно стратифицированной соевым раствором жидкости, а также динамики переноса твердотельных и жидких маркеров в вихревых течениях в широком диапазоне уровней базовой завихренности потока.



Рис. 31. Акустический бассейн

Бассейн располагается на поворотном столе, управляемом компьютером, и включает в себя систему сбора и обработки данных, координатное устройство и измерительное оборудование. В стенки бассейна вмонтированы оптические стекла. Объем бассейна составляет $0,117 \text{ м}^3$, внутренние габариты ванны бассейна, длина, ширина, глубина (ДШГ) – $0,60, 0,52, 0,50 \text{ м}$.

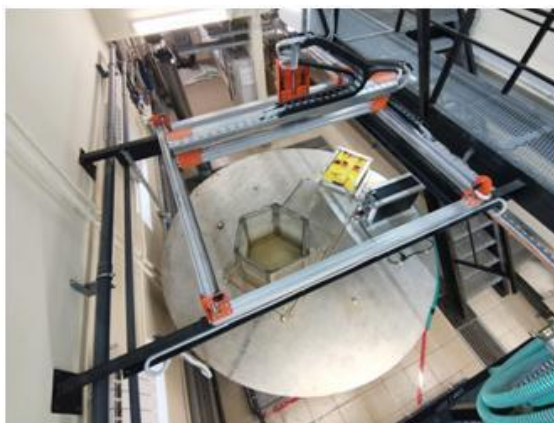


Рис. 32. Вращающийся стратифицированный бассейн

В Санкт-Петербургском филиале Института океанологии им. П.П. Ширшова сложился коллектив сотрудников, способных решать фундаментальные, поисковые и прикладные задачи освоения океана, связанные с региональными изменениями климата, циркуляцией воды и льда, взаимодействием атмосферы и океана, оценкой характеристик ветровых волн и морских экосистем. Созданные в учреждении экспериментальный комплекс, а также макеты оптических приборов существенно

расширяют границы научных изысканий, позволяя проводить уникальные исследования.

Наиболее полную информацию об истории филиала, а также о текущей научной деятельности можно получить на сайте <https://spb.ocean.ru/>.

Литература

1. Каган Б.А., Софьина Е.В. Приливные изменения регионального климата морской системы: два способа их учета применительно к Баренцеву морю летом // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 1. С. 17–25.
2. Каган Б.А., Софьина Е.В. Способ учета приливных изменений региональных климатов водоемов на примере безледного Баренцева моря // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 2. С. 275–283.
3. Каган Б.А., Софьина Е.В., Тимофеев А.А. Сравнение пространственных распределений диссипации бароклинной приливной энергии и коэффициента диапикнической диффузии в Баренцевом и Карском морях в целях изучения приливных изменений региональных климатов морских систем // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 2. С. 5–12.
4. Каган Б.А., Тимофеев А.А. Моделирование поверхностных и внутренних полусуточных приливов в Карском море // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 2. С. 265–275.
5. Каган Б.А., Софьина Е.В. Высокора разрешающее моделирование поверхностной результирующей циркуляции вод в Карском море, ее баротропной и бароклинной составляющих и роль приливов в их формировании // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 2. С. 103–107.
6. Каган Б.А., Софьина Е.В. Приливные изменения регионального климата Карского моря: результаты моделирования // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 1. С. 40–44.
7. Каган Б.А., Софьина Е.В., Тимофеев А.А. Влияние приливов на климатические характеристики Карского моря в безледный период // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 2. С. 51–60.
8. Вольцингер Н.Е., Андросов А.А. Негидростатическая динамика проливов Мирового океана // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 1. С. 26–40.
9. Вольцингер Н.Е., Андросов А.А. Экстремальная негидростатическая приливная динамика // *Вычислительные технологии*. 2019. Т. 24, № 2. С. 37–51.
10. Вольцингер Н.Е., Андросов А.А. Моделирование длинноволновой динамики на материковом склоне океана и регионах свала глубин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 4. С. 16–26.

11. *Вольцингер Н.Е., Андросов А.А., Клеванный К.А., Сафрай А.С.* Океанологические модели негидростатической динамики: обзор // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 1. С. 3–20.
12. *Androsov A., Voltzinger N., Kuznetsov I., Fofonova V.* Modelling of nonhydrostatic dynamics and hydrology of the Lombok Strait // *Water*. 2020. 12(11). 3092.
13. *Андросов А.А., Фофонова В.В., Родионов А.А., Кузнецов И.С., Вольцингер Н.Е.* Моделирование приливной динамики северных проливов Курильской гряды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14. № 3. С. 20–34.
14. *Романенков Д.А., Зинченко В.А., Андросов А.А.* Моделирование приливного перемешивания в Баренцевом и Белом морях // *Тезисы докладов международной научной конференции «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики», г. Санкт-Петербург, 2–4 марта 2019 г. / СПб: ГИЦ РФ АНИИ, 2020. С. 280–282.*
15. *Ерёмина Т.Р., Волощук Е.В., Максимов А.А.* Оценка биогеохимических изменений в донных отложениях восточной части Финского залива вследствие вселения полихет *Marenzelleria* spp. // *Известия РГО*. 2016. Т. 148, Вып. 1. С. 55–71.
16. *Ерёмина Т.Р., Исаев А.В., Волощук Е.В., Рябченко В.А., Максимов А.А.* Балтийское море в настоящем и будущем – климатические изменения и антропогенное воздействие / Под ред. Т.Р. Ерёминой. СПб.: «ЛЕМА», 2016. 152 с.
17. *Isaev A.V., Eremina T.R., Ryabchenko V.A., Savchuk O.P.* Model estimates of the impact of bioirrigation activity of *Marenzelleria* spp. on the Gulf of Finland ecosystem in a changing climate // *J. Mar. Syst.* 2017. V. 171. P. 81–88.
18. *Vankevich R.E., Sofina E.V., Eremina T.R., Ryabchenko V.A., Molchanov M.S. and Isaev A.V.* Effects of lateral processes on the seasonal water stratification of the Gulf of Finland: 3-D NEMO-based model study // *Ocean Sci.* 2016. 12. P. 987–1001.
19. *Vladimirova O.M., Eremina T.R., Isaev A.V., Ryabchenko V.A., Savchuk O.P.* Modelling dissolved organic nutrients in the Gulf of Finland // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018. V. 11, № 4. P. 90–101.
20. *Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., Ryabchenko V. and Savchuk O.* Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: validation and verification // *Water*. 2020. V. 12. P. 1307.
21. *Westerlund A., Tuomi L., Alenius P., Myrberg K., Miettunen E., Vankevich R.E. and Hordoir R.* Circulation patterns in the Gulf of Finland from daily to seasonal timescales. 2019. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*.
22. *Ryabchenko V.A., Leontyev I.O., Ryabchuk D.V., Sergeev A.Yu., Dvornikov A.Yu., Martyanov S.D., Zhamoida V.A.* Mitigation measures of coastal erosion on the Kotlin Island's shores in the Gulf of Finland, the Baltic Sea // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018. V. 11, № 2. P. 36–50.

23. *Ryabchenko V.A., Karlin L.N., Isaev A.V., Vankevich R.E., Eremina T.R., Molchanov M.S., Savchuk O.P.* Model estimates of the eutrophication of the Baltic Sea in the contemporary and future climate // *Oceanology (English translation)*. 2016. V. 56, № 1. P. 36–45.
24. *Meier M., Edman M.K., Eilola K.J., Placke M., Neumann T., Andersson H., Brunnabend S., Dieterich C., Frauen C., Friedland R., Gröger M., Gustafsson B., Gustafsson E., Isaev A., Kniebusch M., Kuznetsov I., Müller-Karulis B., Omstedt A., Ryabchenko V., Saraiva S. and Savchuk O.* Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations // *Front. Mar. Sci.* 2018.
25. *Meier H. E.M., Edman M., Eilola K., Placke M., Neumann T., Andersson H.C., Brunnabend S.-E., Dieterich C., Frauen C., Friedland R., Gröger M., Gustafsson B.G., Gustafsson E., Isaev A., Kniebusch M., Kuznetsov I., Müller-Karulis B., Naumann M., Omstedt A., Ryabchenko V., Saraiva S. and Savchuk O.P.* Assessment of Uncertainties in Scenario Simulations of Biogeochemical Cycles in the Baltic Sea // *Front. Mar. Sci.* 2019. V. 6. P. 46.
26. *Филатов Н.Н., Исаев А.В., Савчук О.П.* Оценка состояния и прогнозирование изменений гидрологического режима и экосистем крупных озер // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2019. № 3. С. 99–113.
27. *Martyanov S.D., Dvornikov A.Yu., Ryabchenko V.A., Sein D.V., Gordeeva S.M.* Investigation of the relationship between primary production and sea ice in the arctic seas: assessments based on a small-component model of marine ecosystem // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018. V. 11, № 2. P. 108–117.
28. *Martyanov S.D., Dvornikov A.Yu., Gorchakov V.A., Losa S.N.* Model estimates of the ecosystem contribution in the carbon dioxide exchange between the ocean and the atmosphere in the Barents Sea // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2017. V. 10, № 1. P. 11–16.
29. *Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А.* Экспериментальная оценка возможностей лидара ПЛД-1 по регистрации гидрооптических неоднородностей в толще морской среды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 2. С. 41–48.
30. *Атаджанова О.А., Зимин А.В.* Малые вихри в Онежском заливе Белого моря и их влияние на распределение хлорофилла // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 6. С. 11–19.
31. *Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А., Гуреев Б.А., Глитко О.В.* Авиационная лидарная батиметрическая съёмка прибрежных акваторий с большой высоты // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 4. С. 85–93.
32. *Chalikov D.* Numerical modeling of sea waves. Springer, 2016. 330 p.
33. *Bulgakov K.J.* Numerical Simulation of the Transformation of a Nonlinear Wave at a Finite Depth // *Physics of Wave Phenomena*. 2017. V. 25, № 1. P. 78–82.

34. *Chalikov D., Babanin A.V.* Nonlinear sharpening during superposition of surface waves // *Ocean dynamics*. 2016. 66 (8). 931–937.
35. *Chalikov D., Babanin A.V.* Parameterization of wave boundary layer // *Atmosphere*. 2019. 10 (11). 686.
36. *Чаликов Д.В., Булгаков К.Ю.* Структура приводного слоя атмосферы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 2. С. 50–65.
37. *Сафрай А.С., Ткаченко И.В., Гордеева С.М.* Влияние вариаций граничных условий на эволюцию одиночной внутренней волны в канале // *Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб: Нестор-История, 2016. С. 175–177.
38. *Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е.* Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 2 (194). С. 80–90.
39. *Зимин А.В.* Субприливные процессы и явления в Белом море. М.: ГЕОС, 2018. 220 с.
40. *Атаджанова О.А., Зимин А.В.* Гидрологические условия в юго-западной части Баренцева моря в октябре – ноябре 2018 г. (по материалам 74-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш») // *Комплексные исследования Мирового океана. Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. Севастополь, 22–26 апреля 2019 г. [Электронный ресурс]*. Севастополь: МГИ. С. 33–34. URL: http://mhi-ras.ru/news/news_201904151055.html (дата обращения: 18.02.2021).

Основные инновационные исследования Института озераведения РАН за период существования РАН

В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев

Последнее десятилетие деятельности Института озераведения АН СССР (ныне ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН), предшествующее образованию Российской академии наук, было наиболее плодотворным за всю историю Института. В этот период ИНОЗ являлся головной организацией и непосредственным участником работ по программам Государственного комитета СССР по науке и технике в области исследований всех крупнейших озер Советского Союза. Работы выполнялись совместно с более чем 80-ю организациями Академии наук и различных министерств и ведомств союзного и республиканского подчинений. Цель исследований заключалась в комплексном изучении существующих опасных для экономики экологических проблем и поиске путей их разрешения. Вследствие распада СССР эти крупномасштабные исследования были прекращены и продолжались совместно с организациями бывших союзных республик лишь по проблеме происхождения и эволюции озер территории Советского Союза. В 1991-1994 годах были подготовлены 4 завершающих тома, которые вместе с предыдущими образовали монографическую серию из 8 томов «История озер». Издание включает как давно исчезнувшие с поверхности Земли озера, представляющие большой интерес для понимания происходящих в природе общих закономерностей ее развития и поиска полезных ископаемых, так и современные уникальные озера, такие как Байкал, Ладога, Онега, Балхаш, Иссык-Куль, Севан и т.д., а также озерные регионы с огромным множеством малых озер. При этом представлен как процесс происхождения озер, так и их эволюции в тесной связи с имевшими место изменениями климата и природной среды на водосборных бассейнах. По масштабу охвата во времени (от триаса до современного периода) и территории бывшего СССР с ее огромным физико-географическим разнообразием, комплексности проработок огромной базы разносторонних данных, глубина заключений и выводов издание не имеет аналогов в мировой научной практике и получило высокую оценку отечественных и зарубежных ученых. Оно подвело итоги палеолимнологических исследований XX века и до сих пор остается уникальным в этой области науки.

Озерный фонд России

Продолжением работ по выявлению крупномасштабных проявлений в развитии и функционировании озер явились выполненные в 2013 – 2018 годах комплексные исследования современного состояния, причин и тенденций изменения озер России. Озера, в первую очередь крупные, являются важными источниками питьевого и хозяйственного водоснабжения, водного транспорта, энергетики, рекреации и

биоресурсов. Между тем, по мере роста экономики, увеличиваются не только потребности в воде, но и существенно возрастает антропогенная нагрузка, приводящая к загрязнению водоемов, их истощению и деградации. При выполнении исследований кроме количественной оценки озерного фонда страны, ее отдельных физико-географических и административных регионов, было установлено качество составляющих его озерных вод, выявлены особенности функционирования водных экосистем, расположенных в разных природных условиях, вскрыты основные закономерности реакции озерных экосистем на антропогенную нагрузку в зависимости от происхождения, а также выделены предпринятые природоохранные меры, которые в последние десятилетия наилучшим образом способствовали восстановлению озер.

Выполненное исследование позволило не только получить целостную картину озерного фонда страны по количественным и качественным показателям, но и конкретизировать существующие проблемы использования и охраны озер в различных регионах России. Наиболее неудовлетворительное состояние озерных экосистем и наибольшие тренды изменения озерного фонда в настоящее время наблюдаются в центральной и южной части Европейской территории России. При сохраняющемся характере землепользования, темпах экономической активности и отсутствии жесткого экологического законодательства состояние большинства озерных экосистем в ближайшие десятилетия останется в экологическом отношении крайне неблагоприятным. Неудовлетворительное экологическое состояние озерных экосистем наблюдается и на юге Азиатской части России, но в сравнении с Европейской частью ситуация здесь в целом более благоприятная, однако она существенно ухудшается в годы низкой водности, когда большинство негативных процессов на озерах резко обостряется.

Значительный акцент в исследованиях сделан на наблюдающихся в последние десятилетия негативных изменениях качества озерных вод арктических территорий. Громадные пространства Арктики и субарктики изучены очень слабо, несмотря на возникающие здесь серьезные экологические проблемы, связанные с активной разработкой месторождений полезных ископаемых. Северные озерные экосистемы в силу своей биологической упрощенности характеризуются повышенной чувствительностью к любым видам антропогенных нагрузок, поэтому существующие планы активного освоения Арктики могут привести к существенному снижению природно-ресурсного потенциала озерного фонда как объекта водоснабжения, рекреации, сельскохозяйственного и иного использования.

Результаты указанных работ представлены в серии монографий В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой, А.В. Измайловой «Озера Европейской части России» [1] и «Озера Азиатской части России» [2], которые, по сути, являются первой попыткой столь многостороннего географического обобщения, проведенного по

озерам всей страны с использованием многоплановой лимнологической информации. В них также заложены теоретические основы и необходимые прикладные статистические данные для выявления тенденций изменения озерного фонда по количественным и качественным показателям при дальнейшем социально-экономическом развитии страны.

Комплексные исследования крупнейших озер Европы

В течение всего 30-летнего периода существования РАН Институт озероведения основное внимание уделял комплексным исследованиям экологического состояния, рационального использования и охраны системы Великих Европейских озер: Ладоге (рис.1) и находящихся на его водосборе озерах Онега и Ильмень.



Рис.1. Экспедиционные работы на Ладоге

Ладожское озеро – крупнейшее озеро Европы, геостратегический водный объект, определяющий жизнедеятельность Санкт-Петербурга и северо-западных территорий России, которая напрямую зависит от экологического состояния озера и его водосбора. В небольшой статье невозможно с достаточной степенью понимания

изложить основные результаты многоплановых междисциплинарных исследований Ладожского озера и водных объектов его бассейна, тем более что многие результаты представлены в работах [3-6], а также в последней обобщающей коллективной монографии «Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата» [7]. В этой монографии рассмотрен ряд важных фундаментальных и прикладных задач по оценке антропогенной трансформации экосистемы Ладожского оз. в условиях изменяющегося климата, существенно расширяющих имеющиеся представления о функционировании и развитии самого озера и его водосборной территории. Выявлены изменения термического режима Ладоги, связанные с климатическими изменениями. Дана оценка воздействия водосбора на состояние озерной экосистемы. Создана геоморфологическая карта, на которой отражены особенности строения дна озера. Гидрологические, гидрохимические, гидробиологические и токсикологические исследования позволили оценить современное состояние озера и его притоков. Выявлены зоны экологического риска на акватории и водосборной территории, требующие регулярного мониторинга для предотвращения возникновения катастрофических ситуаций, связанных с возможным неконтролируемым негативным воздействием этих зон на весь водоем. На акватории озера и его притоках проведены исследования по оценке загрязнения микропластиком. Сформулированы принципы и основные направления совершенствования мониторинга Ладожского оз. Достигнуты значительные успехи в создании и практическом применении моделей термогидродинамических процессов и экосистемы Ладожского оз. На рис. 2 представлены результаты трехмерного моделирования распределения первичной продукции фитопланктона по акватории Ладожского оз. в настоящее время и при возможном потеплении регионального климата [8].

Важность сохранения водных ресурсов Ладожского и Онежского озер отмечена в Стратегии экологической безопасности РФ (документ утвержден Указом Президента Российской Федерации от 19.04.2017 г. №176), созданной по итогам заседания Совета Безопасности РФ от 20 ноября 2013 г. Тем не менее, научно обоснованная и официально утвержденная на государственном уровне стратегия рационального использования водных ресурсов этой крупнейшей пресноводной системы в настоящее время отсутствует. В середине 90-х годов прошлого века Институтом озероведения РАН был предложен первый вариант федерального закона об охране природной среды Ладожского озера и его бассейна, который был одобрен решением Межрегионального координационного комитета Северо-Запада по рациональному природопользованию и охране окружающей среды в августе 1995 г. В последующие годы работы по совершенствованию концепции закона продолжались [9, 10]. Законопроект предусматривал, что субъекты РФ, на территории которых расположен природный комплекс Ладожского и Онежского озер, будут вправе

принимать подзаконные правовые акты по вопросам переданных им государственных полномочий, а также издавать обязательные для исполнения методические указания и инструктивные материалы по их осуществлению. Окончательный проект закона был одобрен ЗАКС Санкт-Петербурга и направлен в Государственную Думу Федерального собрания Российской Федерации. После его обсуждения на заседании профильного комитета он был вынесен на первое заседание в ГД. Однако Правительство РФ посчитало представленное финансово-экономическое обоснование закона недостаточно убедительным и чреватым препятствиями для развития промышленности в Республике Карелия и рекомендовало его снять с рассмотрения.

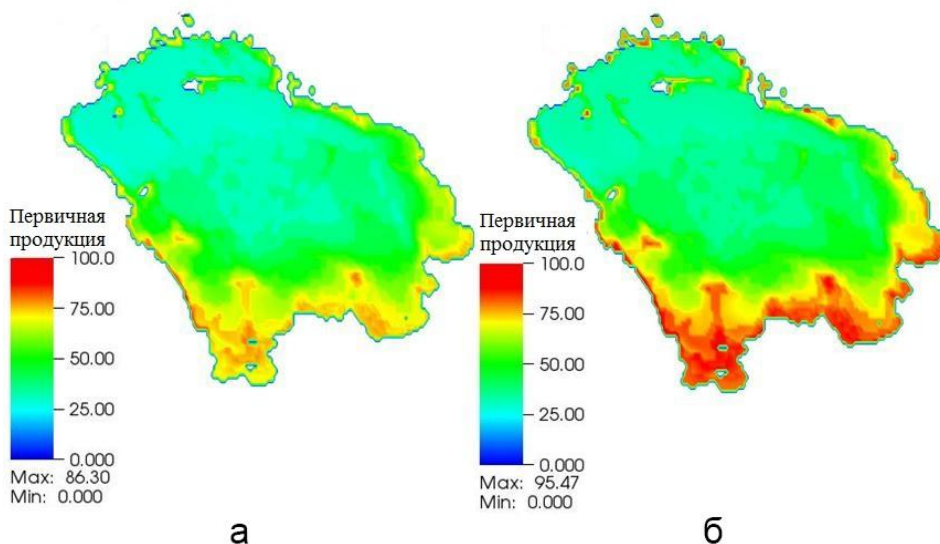


Рис.2. Распределение первичной продукции фитопланктона в Ладожском оз. в осенний период: а) – среднеклиматический год; б) – потепление климата до 5° (по данным моделирования)

Чудско-Псковское озеро – крупнейший европейский трансграничный водоем, расположенный на границе между Россией и Эстонией. На основе модели *Flake* выполнены расчеты с целью получения прогностической оценки возможных изменений температурного и кислородного режимов озер Чудского и Псковского в условиях изменяющихся климатических воздействий на период по конец 2100 г. [11] В качестве исходного был принят сценарий изменения климата A2, рассчитанный по модели общей циркуляции атмосферы и океана ECHAM5_MPI-OM. Как показано на рис. 3 температура воды в Чудском и Псковском озерах будет иметь тенденцию к возрастанию, которое к 2100 г. составит 2,2°C для поверхности. Продолжительность ледостава на Чудском озере уменьшится практически вдвое. Также будет уменьшаться и толщина ледового покрова с 40 см в начале XXI века до 20 см в его

конце. Ожидаются отрицательные тренды в динамике концентрации растворенного кислорода как в поверхностных слоях, так и у дна.

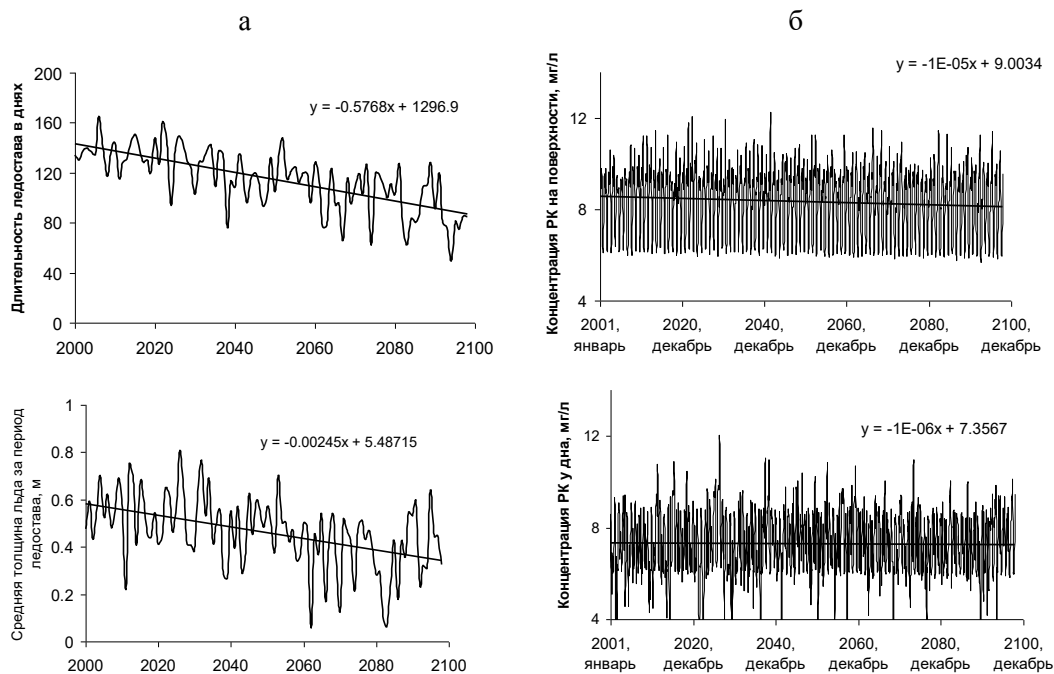


Рис. 3. Продолжительность периода ледостава и динамика толщины ледового покрова (а), а так же динамика концентрации РК (б) в Чудском озере в XXI веке в соответствии со сценарием А2

В качестве примера расчета характеристик гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов Чудско-Псковского озера на рис. 4 представлены результаты математического моделирования [11], которые наряду с данными контактных и дистанционных измерений составляют основу изучения функционирования экосистемы озера.

Оздоровление Финского залива Балтийского моря

Последние три десятилетия характеризуются активным трехсторонним сотрудничеством между Финляндией, Эстонией и Россией в изучении и оздоровлении Финского залива. ИНОЗ РАН принимал активное участие в международных проектах, направленных на решение экологических проблем водной системы Ладога – р. Нева – Восточная часть Финского залива. Наиболее важными и масштабными мероприятиями явились проекты «Год Финского залива – 96» и «Год Финского залива – 2014». В первом проекте с Российской стороны участвовали 12 организаций, координация научных исследований осуществлялась Институтом озераведения РАН.

По результатам работ сформирована «Программа мер по сокращению загрязнения водных объектов и осуществлению водоохранных мероприятий в бассейне Балтийского моря», в которой были определены основные предприятия-загрязнители и намечены пути необходимой модернизации их очистных сооружений, а также строительство навозохранилищ. Программа мер была обсуждена и одобрена на совещании министров по охране окружающей среды трех стран с участием представителей общественности и потенциальных инвесторов. Положения программы мер составили основу дальнейших действий трех стран, направленных на изучение, охрану, оздоровление и рациональное использование ресурсов Финского залива в последующие годы. Результаты исследований российских специалистов, выполненные в рамках проекта, представлены в монографии «Финский залив в условиях антропогенного воздействия» [12].

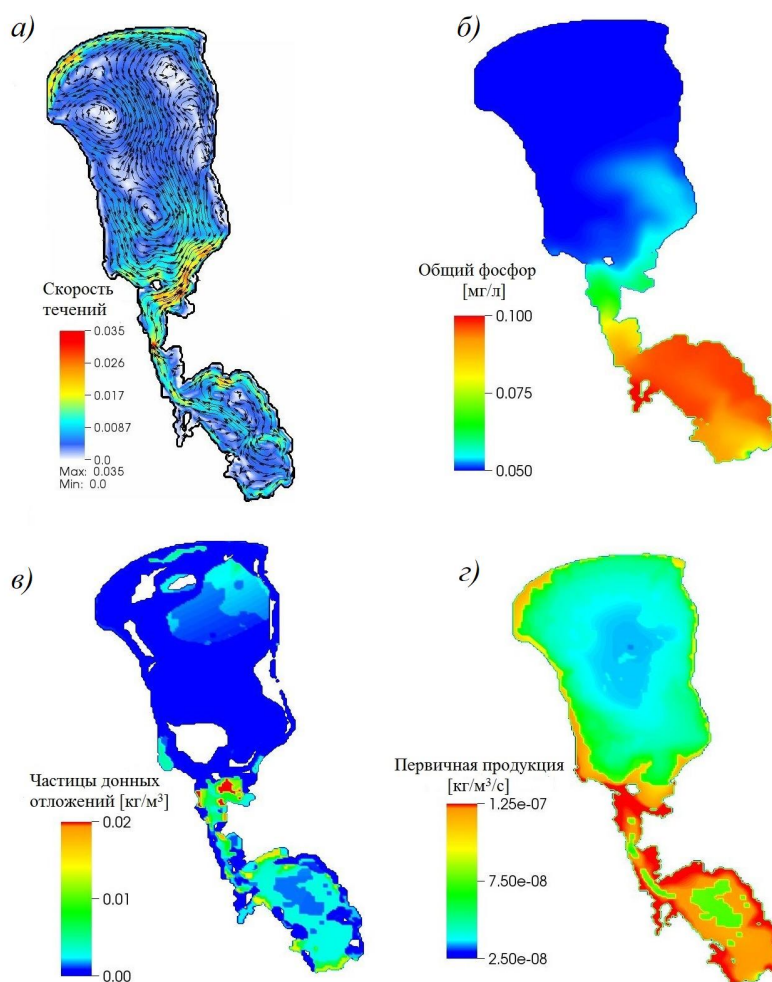


Рис. 4. Результаты трехмерного моделирования для Чудско-Псковского озера: поле скоростей течений (а); пространственное распределение концентрации общего фосфора (б), концентрации частиц донных отложений (в) и первичной продукции фитопланктона (з)

Проект «Год Финского залива – 2014» объединил ученых, представителей государственных структур и общественности Финляндии, Эстонии и России с целью содействия выполнению странами региона норм национального и международного законодательства, международных природоохранных конвенций, а также проведения научных исследований по всем ключевым темам для обеспечения защиты Финского залива и устойчивого развития региона сегодня и в будущем [13]. В рамках проекта ИНОЗ РАН проводил работы, связанные с оценкой биогенной нагрузки на Финский залив с Российской водосборной территории и проверкой ее соответствия международным требованиям. Указанным работам предшествовало подписание в 2007 г. всеми странами Балтийского региона на сессии Хельсинской комиссии (ХЕЛКОМ), так называемого Плана действий по Балтийскому морю (ПДБМ), который должен представлять собой долговременную стратегию оздоровления Балтийского моря. Одно из важнейших направлений ПДБМ – разработка мероприятий по снижению поступления в морскую экосистему общего фосфора и общего азота, приводящих к нежелательному эвтрофированию. ПДБМ предполагает установление в будущем платы за избыточное поступление биогенных веществ в Балтийском море от каждой страны, что придает особую актуальность вопросу о выполнении научно-обоснованной оценки современного уровня биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России.

Работы проводились по заказу Министерства природных ресурсов и экологии специалистами ИНОЗ РАН совместно с Российским государственным гидрометеорологическим Университетом и при участии экспертов Института окружающей среды Финляндии. Для территории, не охваченной данными наблюдений, вынос азота и фосфора оценивался по результатам математического моделирования с использованием разработанной ИНОЗ РАН модели ILLM. Был также выполнен вычислительный эксперимент с целью оценки возможных снижений фосфорной нагрузки на Финский залив при условии совершенствования сельскохозяйственного производства в северо-западном регионе РФ. При проведении расчетов имитировалось выведение из биогенного цикла водосбора фосфора, образовавшегося на фермах и птицефабриках, за счет совершенствования систем хранения и переработки навоза, а также оптимизации использования удобрений в сельском хозяйстве Ленинградской области. Предполагалось полное усвоение удобрений сельскохозяйственными культурами с последующим выносом биогенных веществ за пределы водосбора с продукцией сельского хозяйства. Результаты расчетов показали, что реализация указанного подхода позволит снизить фосфорную нагрузку на Финский залив более чем на 120 т Р/год по отношению к современному уровню.

В результате расчетов биогенной нагрузки на Финский залив с его частного водосбора и значений нагрузок от других источников (Ладожское озеро и река Нева,

Чудское озеро и река Нарва, река Луга и Санкт-Петербург) была получена современная оценка биогенной нагрузки на Финский залив с Российской части водосбора в объеме: 3143 т Р/год и 68407 т N/год. В итоге был сделан важный вывод, что на территории, составляющей около 80% площади водосбора Финского залива, формируется 64-65% от допустимых значений биогенной нагрузки на Балтийское море, рекомендованных в ПДБМ редакции 2007 г. [14]. Из сказанного следует, что биогенная нагрузка на Финский залив с Российской территории в настоящее время не превосходит критических значений и какие-либо высказываемые нередко претензии к нашей стране в данном случае не уместны.

В начале двухтысячных годов в Невской губе Финского залива возникла серьезная экологическая проблема, вызванная появлением локальных негативных экологических ситуаций в мелководных малопроточных прибрежных зонах. Последние были обусловлены сбросами в акватории сточных вод крупными очистными станциями аэрации. Центральной, Северной и Красносельской, а также малыми очистными сооружениями Петродворца, Сестрорецка, Репино, Зеленогорска и Кронштадта. Особо острая критическая ситуация с загрязнением Южного берега сложилась в районе Стрельны по причине выпуска сточных вод Красносельской станцией аэрации в непосредственной близости от берега в сформировавшейся здесь застойной зоне. Намеченный на 2005 год ввод в строй Юго-Западных очистных сооружений (ЮЗОС) при заложенном в проекте местоположении и перенаправлении на ЮЗОС водовыпусков Красносельской станции выпусков их сточных вод в условиях сложившейся в Невской губе опасной экологической ситуации грозил для нее катастрофическими последствиями. Понимая сложность положения, ГУП «Водоканал СПб» обратился к Институту озерадения РАН с просьбой рассмотреть вопрос оптимизации мест водовыпусков расположенных в Невской губе очистных сооружений с тем, чтобы не допустить загрязнения прибрежных районов акватории.

Институтом озерадения РАН был выполнен комплекс натурных исследований течений в акватории Невской губы, а также численные эксперименты с использованием трехмерной гидродинамической модели, направленные на оценку возможности разбавления сточных вод ЮЗОС за счет водных масс Центральной части Невской губы и глубоководных фарватеров. В качестве наилучшего варианта для выпусков ЮЗОС было предложено их расположение вблизи Морского канала на расстоянии 5 км от берега. Рекомендованное местоположение было одобрено Научно-техническим советом ГУП «Водоканал СПб» и реализовано на практике [15]. Правильность выбора подтверждается тем, что в настоящее время гидродинамическая ситуация в этой части Невской губы в большинстве случаев приводит к тому, что сточные воды ЮЗОС распространяются в шлейфе стоков Центральной станции аэрации (ЦСА) вдали от берега в зоне интенсивного течения невыходящих вод в

направлении водопропускных створов комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС), где они подвержены дополнительному перемешиванию в морском канале проходящими судами. На рис. 5 представлен пример расчета распространения в Невской губе шлейфов сточных вод от очистных сооружений Санкт-Петербурга для летней ситуации при северном ветре 5 м/с и минимальном расходе Невы, составляющим 1 600 м³/с, выполненный совместно со специалистами СПб филиала ИО РАН [16].

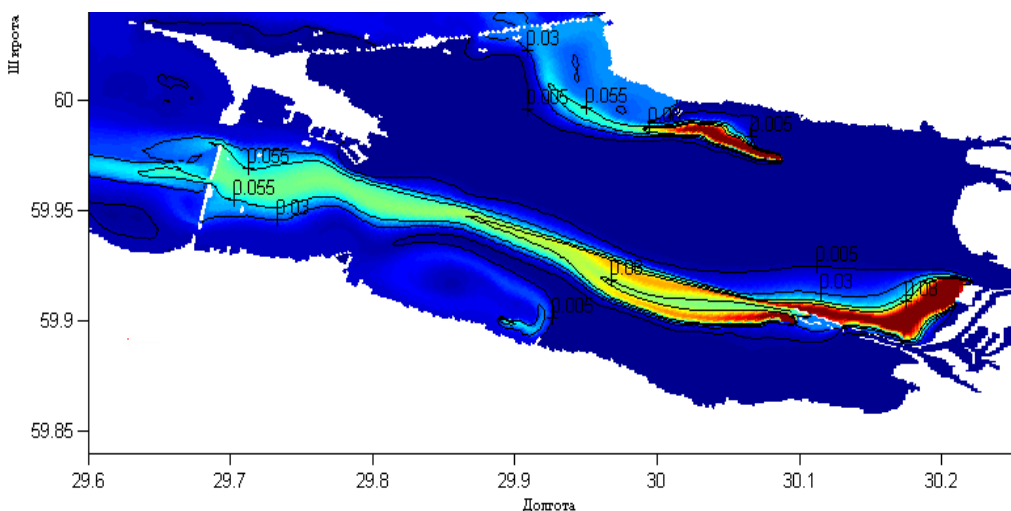


Рис 5. Результаты расчетов распространения в Невской губе шлейфов сточных вод от очистных сооружений Санкт-Петербурга для летней ситуации при северном ветре 5 м/с и минимальном расходе Невы 1600 м³/с

Кроме того, было показано, что манипулирование затворами водовыпускных сооружений КЗС позволяет изменять концентрацию примесей в их окрестности. При этом качество воды может быть улучшено (т.е. достигнуто уменьшение концентрации вредных примесей) только у северного побережья Невской губы и у северного побережья о. Котлин. Добиться значительного улучшения качества воды у южного побережья Невской губы, манипулируя затворами водопропускных сооружений КЗС, по-видимому, не удастся.

Обнаружение и ликвидация разливов нефтепродуктов

В последней четверти XX-го века в связи с резким ростом транспортировки водным путем нефтепродуктов в регионе существенно увеличилась вероятность серьезных аварийных разливов, которые могли нанести непоправимый ущерб культурно-исторической части Санкт-Петербурга, поставить под угрозу водоснабжение мегаполиса и ряда городов и населенных пунктов Ленобласти и

Республики Карелия, а разлив в восточной части Финского залива мог привести к загрязнению финляндской части акватории. Между тем используемые в отечественной и мировой практике методы и средства обнаружения и ликвидации разливов нефтепродуктов технически устарели, не отвечали запросам времени и требовали существенного развития.

В начале 2000-х годов ИНОЗ РАН вместе с НПК ГОИ им. С.И. Вавилова выиграли тендер, объявленный Администрацией Санкт-Петербурга на создание в рамках комплексного плана обнаружения и ликвидации аварийных нефтеразливов технологии непрерывного контроля за наличием нефтяных загрязнений на водной поверхности в черте города. Значительные трудности при обнаружении локализации и сборе аварийных разливов нефтепродуктов в Санкт-Петербурге связаны в первую очередь с высокой мощностью потока и скоростью течения р. Нева. Поэтому особое значение для повышения эффективности мероприятий по ликвидации нефтяных разливов и предотвращения загрязнения имеет сокращение времени подхода судов «первого броска» к месту разлива и начала работ по локализации нефтяного пятна. Это в свою очередь требует создания системы обнаружения нефтяных загрязнений на р. Нева, представляющей собой разветвленную сеть датчиков, размещенных в зонах повышенного риска и своевременно реагирующих как на небольшие выбросы нефтепродуктов (фоновые условия), так и аварийные.

Выполненные подробные съемки в различные периоды года и расчеты течений на р. Нева на специально разработанной математической модели позволили построить достаточно детальные сценарии возможного распространения нефтяных загрязнений в акватории реки. Это послужило основанием для выделения приоритетных зон защиты городских объектов, для которых необходимо было в первую очередь обеспечить получение информации о нефтяных загрязнениях. В итоге было решено в основу создаваемой технологии непрерывного контроля за нефтяными загрязнениями положить оптические методы и средства с передачей многомерной оптической информации по системе мобильной связи в центр управления по ликвидации аварийных разливов (рис. 6).

Для размещения оптических средств было предложено воспользоваться градостроительной особенностью – наличием множества мостов через реки и каналы города. В 2004 году была запущена в пробную эксплуатацию первая очередь круглосуточной системы непрерывного контроля за разливами нефтепродуктов, которая включала в себя 4 моста: Литейный, Александра Невского, Володарский и Малоохтинский с установленными на них автоматизированными информационно-оптическими комплексами. С помощью комплекса определяется не конкретный тип обнаруживаемого нефтепродукта, а наличие пленок нефтепродуктов на водной поверхности и измеряют их концентрации в воде на основе физических и физико-химических методов анализа. В состав комплекса входят: дистанционные оптические

регистраторы нефтяных пленок типа «Краб», автоматические анализаторы концентрации нефтепродуктов «Флюорат АЕ 2», инфракрасные видеокамеры и сотовые видеокамеры в защитных кожухах, система передачи данных по GSM-каналу. Одновременно на двух других мостах: Кантемировском и Большим Обуховским отработывались усовершенствованные средства обнаружения нефтепленок и передачи информации. Схема расположения оптических комплексов системы регистрации разливов нефтепродуктов в акватории р. Невы представлена на рис.7.



Рис.6. Малогабаритный светодиодный регистратор нефтепродуктов «Краб», установленный на Литейном мосту через р. Неву

Пробная эксплуатация системы раннего обнаружения аварийных разливов показала, что она в основном отвечает поставленным перед ней задачам, позволяет достаточно эффективно фиксировать нефтепродукты на поверхности воды и в случае превышения пороговых значений передавать информацию в центр управления. Так, с ее использованием только в 2008 году было выявлено 68 разливов нефтепродуктов и собрано более 30 тонн нефтеводяной смеси.

Несмотря на полученные положительные результаты, эксплуатация системы в 2008 году была приостановлена, а сама она законсервирована. Камнем преткновения для администрации Санкт-Петербурга стал вопрос о том, на балансе какой городской структуры должна содержаться автоматизированная распределенная система непрерывного контроля за нефтеразливами.

В 2011 году по заказу ГУП «Водоканал СПб» на Кузьминском железнодорожном мосту был установлен усовершенствованный комплекс

обнаружения нефтяных загрязнений с исправлением некоторых выявленных ранее недостатков. Он входил частью в создаваемую Водоканалом систему обнаружения токсичных веществ и предназначался для предотвращения попадания нефтепродуктов в водозабор очистных сооружений г. Колпино. При средней скорости р. Невы около 2,9 км/час, обнаружение нефтяного пятна предоставляло достаточно времени (примерно 4 часа) для принятия соответствующих мер по предотвращению его попадания в водозаборные сооружения г. Колпино.

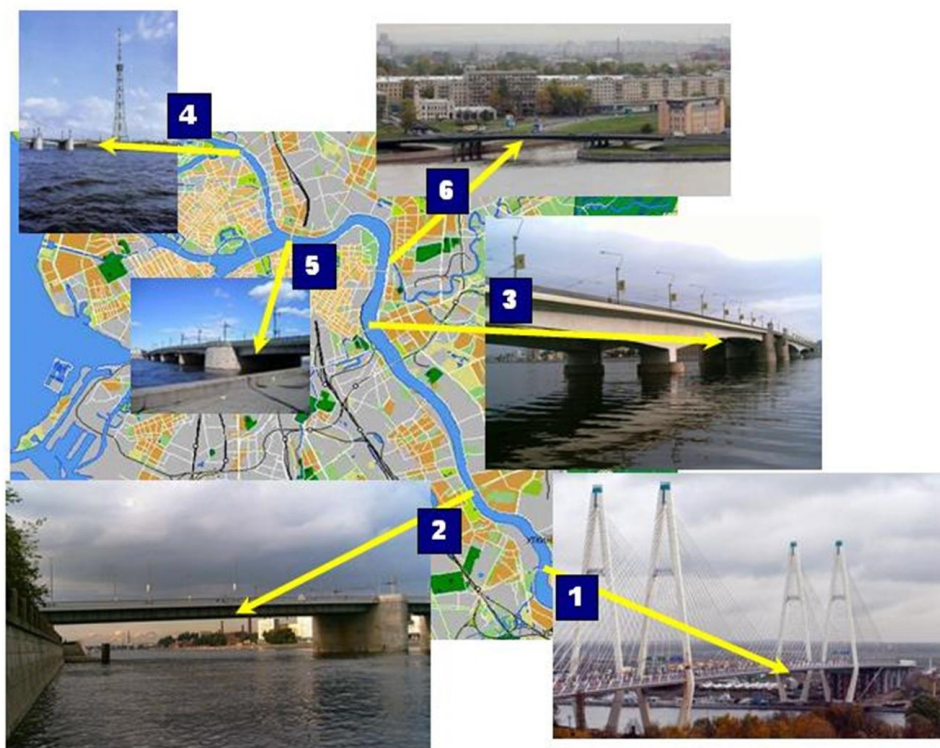


Рис. 7. Единая автоматизированная система регистрации разливов нефтепродуктов дистанционными оптическими комплексами в акватории р. Невы (1 – Большой Обуховский мост, 2 – мост Володарского, 3 – мост Александра Невского, 4 – Кантемировский мост, 5 – Литейный мост, 6 – Малоохтинский мост)

Начиная с 90-х годов прошлого века ИНОЗ РАН активно работал над созданием новой технологии ликвидации последствий нефтяных загрязнений. Институтом была предпринята попытка объединить в одном препарате возможности сорбционной технологии и биологических методов. Полученный препарат, который вобрал в себя достижения обоих подходов, получил название биосорбента. Важнейшими при создании препарата были следующие основополагающие положения:

- использование штаммов микроорганизмов только природного происхождения, причем обязательно родственных экосистеме района применения;
- применение в качестве сорбентов только естественных экологически инертных носителей;
- учет физико-химических свойств разных типов нефтепродуктов.

Исходя из названных положений, было разработано несколько модификаций препарата «Биосорб» для работы в разных регионах и очистки от нефтепродуктов поверхности и водной толщи, прибрежных слоев и донных отложений. В 1992-2001 годах Институт принимал участие в организованных на средства Евросоюза сравнительных испытаниях препаратов для ликвидации последствий нефтеразливов на возможность использования их в северных широтах, включая Арктический регион. На первом этапе 1992-1994 г.г. испытания были направлены на проверку эффективности препаратов при очистке поверхности воды и водной толщи и включали три вида экспериментов: лабораторные, модельные и натурные. Первые два вида исследований осуществлялись на базе Государственного технологического центра Финляндии (VTT-center), а натурные работы проводились в Кольском заливе на базе Мурманского морского биологического института РАН (ММБИ РАН). В экспериментах тестировались американский биосорбент «Пристон Си» компании «Марин систем», российский препарат «Биосорб А» и финский сорбент «Эколайф» компании «Ka biokasva Ou».

Лабораторные эксперименты были направлены на выявление поведения нефти в воде и изменения ее свойств во времени под воздействием препаратов, а также на санитарно-токсикологический контроль как за отдельными штаммами микроорганизмов, входящих в состав биосорбента, так и за экологической безопасностью применения самих препаратов. Исследования проводились по специально созданной программе с использованием разработанных для этого методов и средств. Исследования выявили наличие токсичности в случае американского препарата «Пристон Си», который, в отличие от «Биосорб А», создавался как универсальное средство для использования на всех водных объектах земного шара при заложенном в нем постоянном наборе штаммов микроорганизмов.

Модельные эксперименты преследовали цель проверки работоспособности препаратов при различных условиях: отсутствии и наличии волнения, разных температурных режимах, в процессе замораживания и размораживания воды при температуре около 0°C, наличии битого льда в воде, в период освещения и темноты. Все препараты тестировались одновременно в специальном бассейне VTT-center при одинаковых условиях. Продолжительность каждого из тестов составляла в среднем 3,5 недели, при этом как и в лабораторных экспериментах использовались искусственная соленая и солоноватая вода. Результаты экспериментов показали, что эффективность обоих биосорбентов была близка при положительных температурах, а

при температуре 0°C «Биосорб А» в основном сохранял свою активность, в то время, как у препарата «Пристон Си» она падала в несколько раз. Активность американского препарата существенно уменьшалась и в случае темноты. Более высокая активность «Биосорб А» в этом случае объяснялась тем, что в нем использовались штаммы микроорганизмов из Арктического региона. Таким образом, была выявлена более высокая низкотемпературная активность препарата «Биосорб А» и его существенно меньшая зависимость от освещения.

Натурные эксперименты проводились с целью проверки в природных условиях Арктики свойств тестируемых препаратов, выявленных в лабораторных и модельных экспериментах. Работы проводились на акватории губы Белокаменка Кольского залива, где с помощью морских боновых заграждений с подводной частью 1,5 м были образованы 4 тест-бассейна с глубиной 6-7 м и размером 5×5 м, на расстоянии 20 м друг от друга. В каждом из бассейнов было разлито по 50 литров сырой нефти, при этом один бассейн использовался в качестве контрольного. На нем происходил процесс естественного самоочищения, а на остальных наблюдались изменения нефти под действием одного из тестируемых препаратов. С помощью водолазов ежедневно брались пробы грунта для седиментирующихся фрагментов нефти и отслеживания процесса разрушения на дне.

Для тестирования воздействия препарата на различные водные организмы использовались естественные фильтраторы воды-моллюски, которые отбирались для анализа с целью обнаружения появления в их тканях соединений, имеющих мутагенную и канцерогенную активность. Кроме того, анализировались качественные и количественные изменения в составе морского фито и зоопланктона в опытных бассейнах в сравнении с контрольным бассейном. Проведенные натурные эксперименты полностью подтвердили полученные ранее результаты и заключения по данным лабораторных и модельных экспериментов. В итоге группа независимых экспертов, опираясь на полученные интегральные показатели активности и безопасности, сравнительную эффективность тестируемых препаратов оценила следующим образом: «Биосорб А» > «Эколайф» > «Пристон Си».

На втором этапе испытаний в 1998-2001 годах были проведены эксперименты по очистке прибрежной зоны в губе Белокаменка Кольского залива, организованные совместно VTT-center Финляндии и ММБИ РАН. В них тестировались биосорбент «Биосорб Д» ИНОЗ РАН и два препарата финского и норвежского производителей, созданные на основе минеральных удобрений. Анализ процесса биодеструкции нефти осуществлялся в течение года, в том числе в условиях полярной зимы. Кроме прямого анализа изменения содержания нефти в грунте контролировались показатели микробиологической активности и физико-химические факторы среды в слоях береговых отложений 0-5 и 5-10 см.

Результаты натуральных исследований оказались очень показательными. Они продемонстрировали, что, во-первых, имеет место пролонгированный эффект действия биосорбента «Биосорб Д», который идентифицировался даже на 300-тые сутки эксперимента, во-вторых, активность биосорбента была в течение всего эксперимента выше, чем у других препаратов, и, в третьих, что особенно важно с практической точки зрения- биодеградация под действием биосорбента подвергается до 60-70% нефти даже в климатических условиях арктического побережья.

Различные модификации препарата «Биосорб» были успешно использованы в более чем в 40 случаях ликвидации серьезных аварийных разливов нефтепродуктов, которые имели место на Ладоге, р. Нева, Финском заливе, Черном море. Основные положения биосорбционной технологии ликвидации нефтеразливов, результаты международных сравнительных испытаний, а также примеры практического применения препарата «Биосорб», приведены в монографии А.Б. Левченко и В.А. Румянцева [17].

Ранняя диагностика кризисных экологических ситуаций

Рациональное использование и охрана водных объектов подразумевает наличие достаточно надежной информации об их состоянии, получение которой не обеспечивает система государственного мониторинга поверхностных вод Росгидромета. Разработанная в 70-х годах прошлого века она ориентирована главным образом на определения загрязнения воды химическими веществами, которое не дает объективных сведений о качестве воды и состоянии водной экосистемы. При этом чрезвычайно важную информацию о негативных процессах в водных объектах можно получить лишь, когда последние достигли серьезного развития и представляют реальную экологическую угрозу.

В ИНОЗ РАН было разработано несколько вариантов модернизации системы государственного мониторинга поверхностных вод применительно к конкретным задачам рационального использования и охраны водных объектов. Первый из них выполнен по заказу Комитета по природопользованию и охране окружающей среды администрации Санкт-Петербурга, в 2002 году для контроля за обеспечением экологической безопасности на водоемах урбанизированных территорий. Система получила название ранней диагностики кризисных экологических ситуаций и кроме урбанизированных водоемов она полностью подходит для малых и средних озер, используемых в рекреационных и хозяйственно-бытовых целях. В основу системы ранней диагностики кризисных экологических ситуаций положено небольшое число показателей, дающих интегральное представление о развитии в водоеме негативных процессов: эвтрофирования, закисления, загрязнения, токсификации. Определение этого комплекса показателей позволяет достаточно адекватно оценить качество воды и состояние водоема в целом. В рамках данной системы разработана методика

измерения, включающая научно обоснованное предписание периодичности обследования водоемов, необходимого числа отобранных для анализа проб, месторасположения станций отбора проб, а также рекомендуемые методики аналитического определения контролируемых показателей. Оценка экологической ситуации на водоеме дается в соответствии с разработанной системой критериев, где для каждого из контролируемых показателей определен диапазон значений, соответствующих «относительно удовлетворительной», «напряженной» или «кризисной» ситуации. Основным достоинством разработанной системы является то, что при резком сокращении материальных и трудовых затрат по сравнению с Федеральной системой мониторинга она обеспечивает возможность оперативной оценки экологического состояния большого числа водоемов и выявления негативных процессов на ранней стадии их развития. В большинстве случаев полученный объем информации является достаточным для своевременного принятия соответствующими городскими структурами превентивных адекватных мер, направленных на оздоровление экологической ситуации [18].

Регуляции цианобактериального «цветения» пресноводных водоемов

Неконтролируемое поступление биогенных веществ от промышленных коммунально-бытовых, сельскохозяйственных и иных предприятий приводит к резкому ускорению процесса антропогенного эвтрофирования, которое обычно сопровождается лавинообразным цианобактериальным «цветением» водных объектов. Устранение причин антропогенного эвтрофирования требует серьезных материальных затрат на модернизацию на предприятиях технологических процессов или очистных сооружений. Поэтому на практике для снижения цианобактериального «цветения» водных объектов стали широко использовать различные физические, химические, биологические и другие методы, среди которых на сегодняшний день наиболее перспективным и экологически «чистым» считается применение ультразвука малой интенсивности.

ИНОЗ РАН работает над созданием комбинированного метода регуляции «цветения» пресноводных водоемов и уже более 10 лет занимается исследованием возможности ультразвукового излучения. Центральное место в работах занимают экспериментальные исследования, которые проводятся в лабораторных условиях как с отдельными видами цианобактерий, так и в натуральных непосредственно на водоемах. В обоих случаях используются специально разработанные для этой цели методики и оборудование. В частности, учитывая большое многообразие условий работы на водоемах в силу различия их морфометрических характеристик, доминирующих видов цианобактерий, возможностей обеспечения безопасности и сохранности оборудования и т.п., были разработаны и опробованы различные типы ультразвуковых установок: с подключением к электросети, использованием

аккумуляторов и солнечных батарей, с размещением ультразвуковых установок на поверхности и под водой, однонаправленным и круговым облучением, с постоянной и переменной частотой (рис. 8). С результатами некоторых выполненных работ можно ознакомиться в [19-22].



(а)



(б)

Рис. 8. Постановка на прудах Парка Победы в Санкт-Петербурге ультразвуковых устройств малой мощности с круговой диаграммой направленности облучения двух типов: а) – автономного; б) – стационарного

Особое внимание в последнее время уделяется исследованию токсигенных цианобактерий, «цветение» которых на пресноводных водоемах, используемых в качестве источников питьевого водоснабжения и рекреации, представляет серьезную угрозу для здоровья жителей городов и сельской местности. В связи с наблюдающимся глобальным потеплением климата острота и масштабы токсигенного «цветения» водоемов, сопровождающегося выделением в воду опасных токсинов, растут и распространяются уже в северных регионах России. Проблема разработки методов регуляции токсигенного «цветения» водоемов становится все более актуальной не только для нас, но и других стран мира.

В Институте озераведения РАН по специально разработанной программе и созданных экспериментальных установках впервые были проведены лабораторные исследования действия ультразвука малой интенсивности на доминирующий на Северо-Западе России вид токсигенных цианобактерий синехоцистис (*Synechocystis* sp). Результаты показали, что ультразвуковое облучение является для цианобактерий стрессом. Впервые был установлен факт, что в состоянии ультразвукового стресса они одновременно запускают два механизма метаболизма: 1) увеличения толщины стенок клеток и слизистого чехла для повышения стрессоустойчивости; 2) биосинтеза токсинов для борьбы с внешним воздействием (рис. 9). Оба механизма для них

энергозатратны и через 2-3 недели наступает период полного истощения запасов и отмирание клеток.

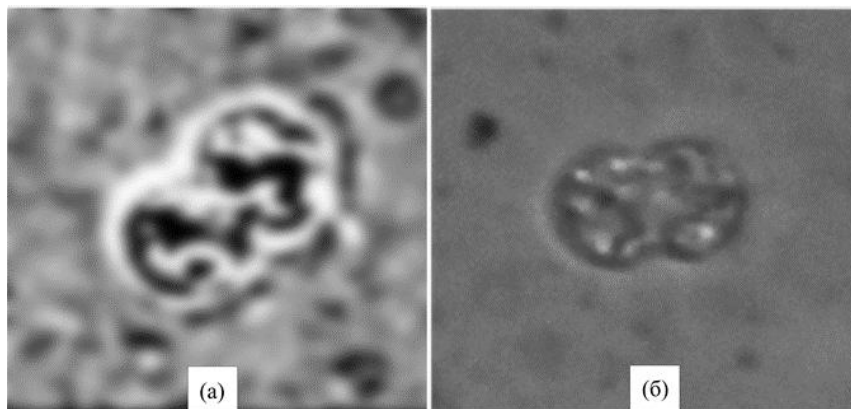


Рис. 9. Микрофотографии клеток цианобактерий *Synechocystis* sp. после акустического облучения: а) – $f = 75$ кГц, $U = 2$ В, б) – $f = 75$ кГц, $U = 4$ В

Полученный вывод является крайне важным, так как открывает реальную возможность создания технологии регуляции токсигенного цианобактериального «цветения» пресноводных водоемов с помощью ультразвукового облучения малой интенсивности.

Заключение

Подводя итог краткому обзору работ, выполненных Институтом за период существования РАН, нужно отметить следующее. Несмотря на сложное положение, вызванное постоянным недофинансированием и существенным сокращением численного состава, часть работ этого периода превосходили близкие по тематике отечественные и зарубежные исследования.

Это, во-первых, выполненные крупномасштабные исследования происхождения, развития и эволюции озер, а также проведенное обобщение озерного фонда России по комплексу количественных и качественных показателей. Во-вторых, разработанные инновационные технологии обнаружения и ликвидации разливов нефтепродуктов на воде, успешная реализация которых на реальных авариях подтвердила правильность заложенных при их создании исходных положений. В-третьих, обнаруженный в лабораторных условиях характер реакции на действие ультразвука малой интенсивности токсигенных цианобактерий, который открывает широкие перспективы для разработки технологии регуляции токсигенного «цветения» водоемов.

Основное место в работах Института занимали исследования Ладожского озера – уникального природного объекта, со времен последнего оледенения сохранившего

представителей флоры и фауны. Озеро имеет большое геостратегическое значение как крупнейший пресноводный водоем Европы и оказывает серьезное влияние на экологическое состояние и качество воды Финского залива и Балтийского моря, а также играет огромную роль в водоснабжении Санкт-Петербурга и ряда городов и населенных пунктов Ленобласти и Республике Карелия.

Существенную часть исследований ИНОЗ составляют работы, выполненные в рамках международных проектов или по заказам федеральных и региональных органов власти. В них были даны конкретные решения по оздоровлению экологической обстановки в системе р. Нева – восточная часть Финского залива и Балтийского моря. Необходимо отметить, что предполагаемые решения по международным проектам находили дальнейшее практическое применение, в то время как для отечественных заказов было характерно иногда половинчатое использование результатов по причине отсутствия единого «хозяина» по экологическим проблемам и существующей несогласованности в действиях различных административных органов.

Литература

1. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Озера Европейской части России – СПб, Лема, 2015, 389 с.
2. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Озера Азиатской части России – СПб: Свое издательство, 2017, 480 с.
3. Ладога / Под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. – СПб: Нестор-История, 2013, 468с.
4. Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Под ред. Н.А. Петровой, А.Ю. Тержевика. – СПб.: Наука, 1992, 328 с.
5. Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой. – СПб: Наука, 2002, 327 с.
6. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / В.А. Румянцев, А.И. Сорокин, Н.А. Нестеров. – СПб: Нестор-История, 2015, 199 с.
7. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. /Под ред. Кондратьева С.А., Позднякова Ш.Р. и Румянцева В.А., М., 2021. М.: Изд-во РАН, 640 с.
8. Голосов С.Д., Зверев И.С., Шипунова Е.А. Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3D модели гидродинамики внутреннего моря (МГВМ). / В книге «Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России» под ред. Н.Н. Филатова. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020, с. 166-196.

9. Румянцев В.А., Алхименко А.П., Кудерский Л.А., Соболев И.А. Концепция и проект Федерального закона «Об охране Ладожского озера» – СПб: ИНОЗ РАН, 2008, 110 с.
10. Воропаева Г.М., Румянцев В.А. Концепция совершенствования природопользования в бассейне Ладожского озера. – Л.: Гидрометиздат, 1991, 26 с.
11. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Голосов С.Д., Зверев И.С. Моделирование тепло- и массопереноса в системе «водосбор-водоток-водоем» – Труды КарНЦ РАН, серия Лимнология и Океанология, 2021, № 4, с.40-52
12. Финский залив в условиях антропогенного воздействия. Под ред. Румянцева В.А., Драбковой В.Г. – Изд-во НИИХ СПбГУ, 1999, 363 с.
13. The Gulf of Finland Assessment / Ed. by Mika Raateoja and Outi Setälä - Rep. of the Finnish Environment Inst. 27, Helsinki, 2016, 363 p.
14. Румянцев В.А., Кондратьев С.А. О соответствии биогенной нагрузки с российской территории на финский залив требованиям Плана действий по балтийскому морю – Общество. Среда. Развитие. 2014, №3, с. 159-162.
15. Кармазинов Ф.В., Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Рябченко В.А., Поздняков Ш.Р. Оптимизация расположения водовыпусков очистных сооружений как способ оздоровления акватории Невской губы. – Тезисы докладов Научно-практической конференции «Теория и практика восстановления внутренних водоемов», СПб, 2007, с.28-29.
16. Рябченко В.А., Коноплев В.Н., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Лыскова У.С. Оценка изменения качества воды Невской губы после введения в эксплуатацию Юго-западных очистных сооружений Санкт-Петербурга (по данным математического моделирования). – Изв. РГО, 2006 (5), с.48-57.
17. Левченко А.Б., Румянцев В.А. Биосорбционные технологии в борьбе с нефтяными загрязнениями воды. – СПб: Лема, 2010, 197 с.
18. Румянцев В.А., Игнатьева Н.В. Система ранней диагностики кризисных экологических ситуаций на водоемах – СПб: Изд-во ЛЕМА, 2006, 152 с.
19. Киселев Е.Ю., Румянцев В.А., Рыбакин В.Н. Применение ультразвукового излучения низкой интенсивности для борьбы с «цветением» воды в водоемах. Эффективность воздействия на водоросли и другие организмы. – Уч. зап. РГГМУ. 2014. № 37, с.222-230.
20. Румянцев В.А., Крюков Л.Н., Рыбакин В.Н., Киселев Е.Ю. Проблема «цветения» сине-зеленых водорослей и пути ее решения / Под ред. Ж.И. Алферова, О.В. Белого, Г.В. Дваса, Е.А. Ивановой в кн. Перспективные направления развития науки в Петербурге. – СПб: Изд-во ИП Пермяков С.А. 2015, с. 277-294.
21. Румянцев В.А., Рыбакин В.Н. Результаты лабораторных и натуральных исследований применения ультразвука малой мощности для регулирования цветения цианобактерий на водоемах – Материалы Международ. науч.-практ. конф.,

посвященной памяти А.Н. Антипова «Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования», Иркутск: Институт географии им. Б.В. Сочавы СО РАН. 2019, с. 587-589.

22. Румянцев В.А., Рыбакин В.Н., Рудский И.В., Коровин А.Н. Воздействие ультразвука малой интенсивности на состояние токсигенных цианобактерий – Доклады российской академии наук, Науки о Земле. 2021. том 498. № 1, с. 99-102.

Научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук в решении проблем экологической безопасности

В.К. Донченко, А.А. Тронин

Научно-исследовательский Центр экологической безопасности (НИЦЭБ) был создан для решения проблем экологической безопасности Ленинграда. Впервые данная проблема стала предметом научных дискуссий и широкого общественного обсуждения по поводу строительства комплекса защитных сооружений (КЗС) города от наводнений при явном отставании строительства комплекса очистных сооружений (КОС) городских сточных вод.

В марте 1991 года по представлению председателя Президиума ЛНЦ АН СССР академика Алферова Ж.И. постановлением Президиума Академии Наук СССР № 74 от 19 марта 1991 г. и распоряжением Президиума Ленинградского Научного Центра № 01-78 от 2 апреля 1991 г в структуре ЛНЦ АН СССР, а затем РАН был создан на правах института Ленинградский, а затем Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности (НИЦЭБ РАН). В структуре института был создан ученый Совет (председатель Донченко В.К., уч. секретарь Родионов В.З.)

Создание и становление института совпало с резким обострением экономического кризиса в стране и сокращением расходов на фундаментальную науку. Однако осознание в обществе особой актуальности проблемы обеспечения экологической безопасности позволили новому институту развиваться в этих сложных условиях. Лаборатории института были расположены в различных местах по городу. Их необходимо было собрать в одном здании. Здание, которое было выделено НИЦЭБ в 1989 году, требовало серьезного капитального ремонта. В такой ситуации было принято решение размещать лаборатории в пригодных помещениях и постепенно ремонтировать здание.

НИЦЭБ уже в составе РАН продолжил научно-исследовательские работы в области экологической безопасности по заданиям РАН, по международным научным грантам, а также по договорам с ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», с БАН, с администрациями Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

1. Аэрокосмические дистанционные методы в экологической безопасности

Для продолжения предметной разработки программы поэтапного канализования уже Санкт-Петербурга необходимо было иметь точную информацию о количестве и мощности источников непосредственного сброса сточных вод в акватории города. В этих условиях НИЦЭБ организовал проведение авиационных тепловизионных съемок городских акваторий. (Шилин Б.В., Груздев и др.).

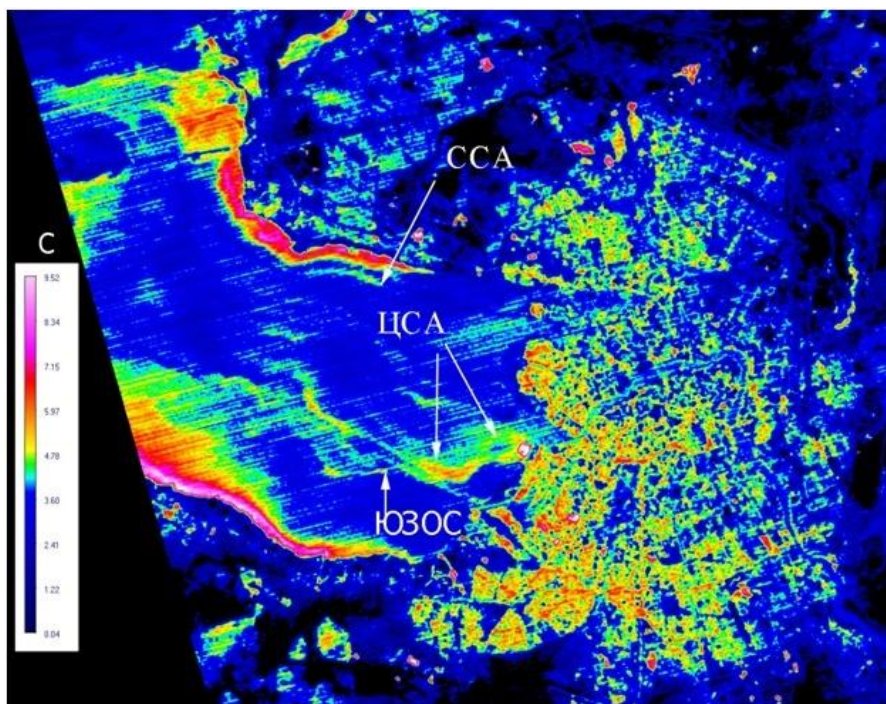
Температура сточных вод в сбросах выше, чем температура в акватории, особенно в переходное время года (весна, осень). В местах сбросов сточных вод создаются термоконтрастные зоны, которые с высокой точностью определяются с помощью тепловизоров установленных на самолете. Авиационные тепловизионные съемки точечных источников загрязнений акваторий позволили проводить картирование городских акваторий, устанавливать и картировать источники сбросов сточных вод на конкретную дату. Периодическое обновление этих карт позволяло проводить достоверные оценки результатов очередного этапа программы канализования Санкт-Петербурга и пуска в эксплуатацию городского коллектора.



По результатам обобщения натуральных исследований в восточной части Финского залива под руководством академика Грамберга И.С. был разработан и издан в 2002 году «Геоэкологический атлас восточной части Финского залива» (от НИЦЭБ в этой работе участвовали Донченко В.К. и Питулько В.М.).

В условиях завершения процессов канализования Санкт-Петербурга и введения в эксплуатацию городских КОС по космическим снимкам проводилась идентификация траекторий распространения тепловых шлейфов очищенных сточных вод от ССА, ЦСА и ЮЗОС в Невской губе.

На приводимом ниже рисунке представлены тепловые шлейфы КОС Санкт-Петербурга. Снимок сканера ASTER 29 апреля 2006 г. Стрелками на рисунке показаны выпуски городских КОС (Тронин А.А.).



С 1992 по 2006 гг. в НИЦЭБ работал академик Кирилл Яковлевич Кондратьев – выдающийся ученый и организатор науки, в 1964-70 гг. ректор Ленинградского государственного университета. Он внес значительный вклад в формирование направлений научных исследований НИЦЭБ. Названия некоторых из последних его монографий, вышедших в 2006 г. раскрывают перспективные научные направления развития института:

«Природные бедствия как интерактивный компонент глобальной экодинамики».

«Глобализация и устойчивое развитие: экологические аспекты».

«Глобальные изменения климата: прошлое, настоящее, будущее».

Оценка климатического фактора в проблеме экологической безопасности в девяностые годы прошлого века приобрела особую актуальность. Под руководством академика Кондратьева К.Я. его учениками были выполнены исследования различных аспектов воздействия климатической изменчивости на процессы глобальной экодинамики (Биненко В.И., Викторов С.В., Мельникова И.Н. и др.).

Востребованным, особенно в условиях возникновения зональных аномальных климатических процессов, стало применение дистанционных космических методов для получения информации и анализа природных биопасностей. Так, например, было изучено влияние климатических изменений на миграцию иксодовых клещей и формирование зон, характеризующихся повышенной плотностью числа особей итальянского пруса. Разработан и апробирован метод прогнозирования и

картографирования зон вспышек численности и развития локальной миграции фронта скоплений саранчи (Горный В.И., Тронин А.А. и др.).



В институте выполняется широкий круг исследований по применению дистанционных методов для изучения термодинамических процессов земной поверхности. Проведена оценка природной энергообеспеченности земель Северо-Запада России. Выполнена диагностика и проведена сравнительная оценка энергоэффективности городов на примере Санкт-Петербурга и Хельсинки. Обоснован термодинамический подход для дистанционного картографирования зон экологического риска на земной поверхности (Горный В.И. и др.).

Впервые с использованием дистанционных космических методов были проведены исследования по оценке риска для здоровья населения от перегрева поверхностей городских дорог, площадей, крыш зданий и сооружений. Появление и активное изучение нового фактора биоопасности для здоровья человека, связанного с изменениями климата, имеет в настоящее время особую актуальность для его учета в практике градостроительства и обеспечения благоприятной городской среды.

Методом спутниковой радиолокационной интерферометрии исследованы процессы деформации земной поверхности на территории Санкт-Петербурга. Зарегистрированы периодические знакопеременные геодинамические вертикальные движения земной поверхности, выявлен механизм формирования знакопеременных геодинамических вертикальных движений и разработаны рекомендации для правительства Санкт-Петербурга по охране памятников культурного наследия (Горный В.И. и др.).

2. Микробиологические исследования

В рамках программы международный экологический патруль (Спиридонов М.А., Пака В.Т., Медведева Н.Г.) был выполнен комплекс экспедиционных работ по оценке экологического состояния Балтики в местах затопления химического оружия. Проведено оконтуривание мест утечки боевых отравляющих веществ (БОВ) на полигонах затопления химического оружия в Балтийском море.



В исследованиях было установлено, что в местах захоронения химического оружия в придонной воде увеличивается численность микроорганизмов, толерантных к продуктам гидролиза иприта. Была показана возможность самоочищения этими микроорганизмами морских экосистем, зараженных БОВ (Медведева Н.Г. и др.). Результаты этих исследований послужили основой для постановки и развития пионерных исследований по ремедиации почвенных экосистем, загрязненных высокотоксичными ксенобиотиками, например, ипритом (Медведева Н.Г. и др.). Выделены и депонированы во Всероссийской коллекции микроорганизмов бактериальные культуры – деструкторы иприта и продуктов его гидролиза, выявлен механизм трансформации продуктов гидролиза иприта в природной среде, разработана технология биоремедиации почв, загрязненных ипритом и продуктами его гидролиза.

3. Микологические исследования

Продолжены исследования по борьбе с биоповреждениями библиотечных фондов и архивных материалов, что позволило разработать и запатентовать новые экологически безопасные эффективные методы биомониторинга и методы борьбы с биоповреждениями.

Были разработаны и запатентованы новые экологически безопасные биоциды на основе микробных метаболитов, создана коллекция продуцентов новых природных биоцидов. Разработана и запатентована технология изготовления биостойкой бумаги с использованием природного биоцида (Медведева Н.Г., Сухаревич В.И. и др.).

4. Химико-аналитические исследования

Стойкие органические загрязнители (СОЗ). В соответствии с рекомендациями Межведомственной комиссии по экологической безопасности (акад. Лаверов Н.П.) Совета безопасности РФ от 10.12.2003 по подготовке Национального плана по принятию РФ Стокгольмской конвенции «О запрещении и ликвидации стойких органических загрязнителей (СОЗ)» от 22 мая 2001 года, по инициативе Президиума РАН в НИЦЭБ РАН был создан специализированный исследовательский комплекс по проблеме СОЗ. Своевременность этих действий была подтверждена принятием Конвенции Россией 17 мая 2004 г.

Это позволило обеспечить наше равноправное партнерство с ведущими европейскими исследовательскими центрами и участие в исследованиях по новому научному направлению: скрининг малоизученных и ранее неизвестных экотоксикантов в компонентах природной среды и биоте (экологическая разведка).

Хромато-масс-спектрометр высокого разрешения MAT95 XR показан на приведенном рисунке.



Работы по исследованию наличия СОЗ и галогенсодержащих потенциально опасных стойких органических соединений (ГСС) на станциях опорной сети в донных отложениях восточной части Финского залива, а также других органических соединений в природных объектах Северо-Запада РФ ведутся в НИЦЭБ РАН с 1996г. Обнаружен ряд потенциально опасных хлорсодержащих органических соединений: хлорированные полисульфиды и хлорсалицилаты. Проводились систематические наблюдения (формирование рядов) трансграничного переноса СОЗ и ГСС,

поступающих с водным стоком с территории Финляндии на территорию Северо-Запада РФ (станции опорной сети на реках: Вуокса, Сайма, Селезневка).

В результате исследований в прибрежных акваториях восточной части Финского залива с применением метода хроматомасс-спектрометрии впервые был изучен состав органических соединений серы, образующихся в анаэробных условиях в донных отложениях. Было идентифицировано 44 соединения, содержащих серу, при этом установлены десять ранее неизвестных органических соединений, восьми из них в настоящее время присвоены индивидуальные CAS номера.

Развитие методологии скрининга и идентификации новых и малоизученных экотоксикантов в природной среде и биоте стало приоритетным направлением в работе института.

За прошедшие годы была создана электронная база данных органических соединений, обнаруженных в пробах, отобранных на территориальной опорной сети станций обсерватории экологической безопасности (Викторовский И.В., Жаковская З.А. и др.).

Токсины синезеленых микроводорослей (цианобактерий). В программу натуральных исследований НИЦЭБ РАН входило проведение работ по оценке угрозы экологической безопасности для водных объектов и здоровья населения связанной с явлением вредного воздействия токсинов сине-зеленых микроводорослей (цианобактерий). Токсины цианобактерий присутствуют в морских и в пресных водах. Их воздействие на живые организмы вызывает отравления. По синдромам отравления они разделены на классы: паралитические – PSP (сакситоксины, гониотоксины), диарретики – DSP, нейротоксины – NSP и токсины, вызывающие амнезию – ASP.

Опасная концентрация токсинов цианобактерий имеет место в загрязненных водах в период «цветения» воды, содержащей много азота и фосфора. Для некоторых из этих веществ наблюдали «пиковые» концентрации около 100 мг/л.

Выделяют несколько групп этих соединений, главными из которых являются: микроцистисы – более 60-ти циклических пептидов, состоящих из семи «неклассических» аминокислот (гепатотоксины); нодуларины – циклические пептиды, содержащие пять аминокислот (гепатотоксины); анатоксины – алкалоиды (нейротоксины). Все эти вещества обладают заметной токсичностью. Так, содержание в питьевой воде некоторых микроцистисов не должно превышать 0,1-1 мкг/л.

Потенциальная угроза безопасности населения по фактору токсинов цианобактерий заключается в том, что они накапливаются в процессе жизнедеятельности в тканях водных организмов, которые при употреблении в пищу могут стать причиной отравления человека. Информация о росте таких случаев в различных странах подчеркивает актуальность исследований по данному направлению.

В НИЦЭБ РАН были разработаны макетные образцы приборов и испытаны в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» для диагностики наличия в воде нейротоксинов, гепатотоксинов, возбудителей инфекционных заболеваний и белковых токсинов (Зигель В.В. и др.).

Лекарственные средства в окружающей среде. НИЦЭБ РАН одним из первых в России провел поисковые исследования по выявлению и оценке содержания в различных водных объектах Санкт-Петербурга и Ленинградской области, а также в составе сточных вод ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» лекарственных препаратов (кофеин, кетопрофен, диклофенак, ципрофлоксацин и др.) наиболее распространенных в РФ (Жаковская З.А. и др.).

Экологический баланс Санкт-Петербурга. В 2013–2014 гг. впервые на примере Санкт-Петербурга были выполнены исследования поверхностного стока с территории большого города. Исследования финансировал ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». Это было связано с тем, что после завершения работ по приему в городскую систему водоотведения ливневых стоков возникли проблемы с очисткой. Для корректировки технологических регламентов городских очистных сооружений необходимо было определить реальный перечень загрязняющих веществ в поверхностном стоке по районам города.

Результатом исследований НИЦЭБ РАН с использованием химико-аналитического метода «проба неизвестного состава» был установлен реальный перечень загрязняющих веществ по районам Санкт-Петербурга.

Удивление вызвали повышенные концентрации по тяжелым металлам и другим веществам в районах, где по официальным данным отсутствовали промышленные источники таких загрязнений. Анализ сочетаний основных веществ в поверхностном стоке позволил установить характерную группу загрязняющих веществ и установить новый источник загрязнения атмосферы и гидросферы – истирание тормозных дисков и колодок автотранспорта.

Изучение миграционных форм экотоксикантов. Важным направлением в химико-аналитических исследованиях института является изучение консервативных и лабильных (связанных и подвижных) миграционных форм экотоксикантов (тяжелых металлов) в окружающей среде с использованием вольт-амперометрических методов. Это позволило разработать методы идентификации миграционных форм тяжелых металлов в природных средах, а также методы определения термодинамических и кинетических характеристик взаимодействий соединений тяжелых металлов, гуминовых веществ и минеральных взвесей (Кудрявцева В.И. и др.).

5. Методы биоэлектронной диагностики состояния экологической безопасности окружающей среды

Активное развитие получили созданные в институте методы биоэлектронной диагностики состояния экологической безопасности окружающей среды с использованием АБС. Были проведены работы по модернизации АБС, что позволило включить их в автоматизированные системы управления водоподготовкой на городских водопроводных станциях и городских КОС ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

Впервые были созданы и внедрены на заводе сжигания осадков после очистки сточных вод ЮЗОС инновационные системы производственного экологического контроля выбросов загрязняющих веществ (Холодкевич С.В., и др.).

В июле 2006 года использование АБС на водозаборах и городских водопроводных станциях Правительством Санкт-Петербурга было отнесено к особым мерам обеспечения безопасности проходившей в городе встречи глав государств и участников встреч Большой Восьмерки(G-8).

Методы биоэлектронной диагностики использовались в экспедиционных исследованиях по оценке здоровья (экологической безопасности) морских экосистем в Адриатическом, Балтийском, Баренцевом, Белом, Северном и Черном морях, а также для оценки здоровья пресноводных экосистем.

На рисунке показан погружной измерительный модуль, который использовался для оценки в реальном времени состояния экологической безопасности действия предприятий нефтегазового комплекса на шельфе Северного моря.



6. Исследования объектов прошлого (накопленного) экологического ущерба

После смены общественно-политической формации в постсоветских государствах и развитием связанных с этим процессов закрытия и ликвидации предприятий промышленности, сельского хозяйства, транспорта и т.д. особую актуальность получили исследования по изучению возникших новых угроз экологической безопасности. Образовался новый класс депрессивных природно-хозяйственных систем (ПХС). Они не стали очередным звеном в жизненном цикле ПХС, когда существующие ПХС, утратившие положительные свойства сменяются на более совершенные и развитые. Наоборот, они возникли, когда естественные процессы научно-технического прогресса внезапно оборвались. Сначала образовались объекты, зоны и территории потенциального экологического риска, многие из которых впоследствии стали источниками загрязнения окружающей среды. Явление возникновения депрессивных ПХС неоднократно имело место в истории земной цивилизации. Однако после распада СССР это явление приобрело континентальный масштаб. Территории и антропогенные объекты, расположенные в границах депрессивных ПХС, были классифицированы как объекты прошлого (накопленного) экологического ущерба (ПЭУ), которые в современных условиях стали источниками угроз экологической безопасности.

В исследованиях НИЦЭБ РАН по проблеме ПЭУ (Питулько В.М., Кулибаба В.В. и др.) было показано, что негативное воздействие депрессивных ПХС не ограничивается контурами земельного отвода, а распространяется далее, образуя ареал хронического загрязнения. Так, после закрытия исходных производств на их территориях остаются разрушающиеся здания, инфраструктурные объекты, отходы в шламонакопителях, а также имеют место остатки топлива, нефтепродуктов, неиспользованные химические вещества и т.д., возникают миграционные процессы загрязняющих веществ в почвах, водной среде и в атмосфере. В исследованиях было показано, что главной причиной сохранения зон и объектов ПЭУ является несовершенство российского законодательства, направленного на решение данной проблемы.

7. Исследования по реабилитации техногенных ландшафтов

В области реабилитации нефтезагрязненных почв и техногенных ландшафтов разработаны технологические схемы рекультивации земель, новые биопрепараты деструкторы нефти, методы фиторекультивации.

Установлено время естественной реабилитации нефтезагрязненных почвенных биоценозов на территории Ленинградской области и получены количественные характеристики ассимилирующей способности различных типов почв, позволяющие систематизировать почвы по устойчивости к нефтезагрязнениям.

Разработаны методы интегральной оценки экологического состояния почв и растительности урбоэкосистем методом биотестирования (для буровых шламов и техногенно загрязненных почв), допущенные для целей государственного экологического контроля и внесенные в Федеральный реестр (Капелькина Л.П. и др.).

Разработаны методы фиторекультивации загрязненных почв, которые используются для фиторекультивации полигонов твердых коммунальных отходов, а также для фиторекультивации загрязненных территорий бывших промышленных объектов. (Бакина Л.Г. и др.).

8. Эколого-экономические и правовые исследования

Экосистемные услуги. С 1991 г. в НИЦЭБ РАН проводились исследования экономических и правовых проблем природопользования применительно к стоимостной оценке природных ресурсов и экосистемных услуг, включая рекреационные.

В 2000–2006 гг. институт принимал участие в проекте ЮНЕП (GIWA/UNEP/GEF), в рамках которого проводилась комплексная эколого-экономическая диагностика тенденций изменения экологического состояния 50-ти больших морских экосистем с целью разработки политики, обеспечивающей повышение устойчивости их использования. (Титова Г.Д.).

Оценка экологической безопасности при реализации решений генерального плана Санкт-Петербурга. В 2004 г. по инициативе Комитета по градостроительству и архитектуре Правительства Санкт-Петербурга в состав работ ЗАО «Петербургский НИПИГрад» по разработке Генерального плана Санкт-Петербурга до 2020 года были включены исследования по оценке антропогенных угроз экологической безопасности, требующих градостроительного регулирования. Руководителем этих работ был академик Инге-Вечтомов С.Г. От НИЦЭБ в состав междисциплинарного коллектива вошли Донченко В.К., Венцюлис Л.С., Викторовский И.В., Горный В.И., Кулибаба В.В., Питулько В.М., Скорик Ю.И., Тронин А.А., Цветкова А.В., Холодkevич С.В., Яхнин Э.Я. Основное внимание в этих исследованиях справедливо было уделено проблеме отходов производства и потребления, в первую очередь, муниципальных, и загрязняющему действию автотранспорта. Предусмотрены также конкретные меры по питьевому водоснабжению и мониторингу окружающей среды.

Исследования процессов обращения с отходами. Одним из приоритетных направлений научной деятельности института являются исследования по проблеме обращения с отходами производства и потребления. Ученые института разработали основные концептуальные положения «Единой политики обращения с отходами в Санкт-Петербурге и Ленинградской области» (Венцюлис Л.С., Скорик Ю.И.).

В 2002 г. НИЦЭБ были разработаны предложения по «Комплексной программе обращения с отходами в Ленинградской области на 2003–2012 годы». Программа была разработана и принята Правительством Ленинградской области к исполнению.

В 2004 г. была разработана «Концепция обращения с отходами в Санкт-Петербурге на 2006–2014 годы». Концепция была принята Постановлением Правительства Санкт-Петербурга № 1151 от 02.08.2005.

По результатам исследований были определены приведенные показатели образования твердых коммунальных отходов в зависимости от различных социально-экономических факторов и климатических особенностей, что позволило провести зонирование территории Российской Федерации по проблеме обращения с твердыми коммунальными отходами.

В составе международного консорциума под руководством академика Федорова М.П. была разработана система управления экологическими рисками, связанными с эксплуатацией полигонов твердых коммунальных отходов в сейсмически активных регионах стран СНГ Центральной Азии (Донченко В.К., Пименов А.Н. и др.).

Экологический паспорт территории Санкт-Петербурга. Реализация разработанной в НИЦЭБ РАН Концепции информационно-аналитического комплекса «Экологический паспорт территории Санкт-Петербурга» (Питулько В.М. и др.), определившей основные принципы организации информационных потоков данных о состоянии окружающей среды и характер частных технических решений, состоялась в январе 2009 г., когда произошло внедрение системы в полном объеме в Комитете природопользования, охраны окружающей среды и экологической безопасности Администрации Санкт-Петербурга.

Целью системы было определение основных принципов и приоритетов экологического развития города, с учетом методов обеспечения экологической безопасности населения, гармоничного сочетания социально-экономических и эколого-градостроительных приоритетов развития города и сопредельных территорий.

В основу Концепции положены принципы обновляющегося информационного кадастра, что позволяет в рамках стратегического планирования перейти к повседневному управлению территорией, обеспечить универсальность информационной поддержки для всех городских территорий, многофункциональность использования достигнутых результатов.

Эффект предотвращенного экологического ущерба. Ключевая идея экологической безопасности заключается в диагностике экологической ситуации, предвидении (прогнозировании) и принятии превентивных мер, обеспечивающих гарантии предотвращения возникновения угроз экологической безопасности в различных ситуациях взаимодействия природы и общества.

Гарантии экологической безопасности – это документально оформленные обязательства хозяйствующих субъектов, свидетельствующие о том, что деятельность их организаций, а также товары, работы и услуги в настоящем и будущем времени не представляет угрозы для экологической безопасности.

Цель исследований эффекта предотвращенного экологического ущерба заключается в раскрытии эколого-экономического механизма его действия в экономических системах на примере стран региона Балтийского моря.

В исследованиях было показано, что предотвращенный экологический ущерб входит в число базовых показателей циркулярной экономики, в которой отходы производства и потребления в виде вторичных ресурсов перерабатываются во вторичное сырье и через сырьевые рынки включаются в циклы производства и потребления (Донченко В.К.).

Проводился анализ коммерческого использования вторсырья в странах региона Балтийского моря с целью повышения эколого-экономической эффективности основных мероприятий, направленных на предотвращение трансграничного экологического ущерба (Венцюлис Л.С., Никанорова А.А.).

Был выполнен анализ примеров реализации эффекта предотвращенного экологического ущерба, обусловленных жизнью коренных малочисленных народов на территориях их исторического обитания. (Бочарникова А. В.).

По результатам сравнительного анализа деятельности водоканалов больших городов региона Балтийского моря было установлено, что прибрежные города представляют собой главный источник поступления традиционных и неспецифических загрязняющих веществ в морскую акваторию.

Было показано, что полученный предотвращенный экологический ущерб в системах очистки сточных вод балтийских водоканалов, а также в системах переработки отходов во вторичное сырье с последующей реализацией на сырьевых рынках позволили повысить уровень экологической безопасности морской среды относительно допустимого уровня ассимиляционной емкости. Балтийские водоканалы были классифицированы, как национальные комплексы международной системы экологической безопасности Балтийского моря. (Донченко В.К., Бегак М.В., Манвелова А.Б. и др.).

9. Участие НИЦЭБ РАН в разработке модельного законодательства государств-участников СНГ

Одним из первых актов после образования СНГ был Рекомендательный законодательный акт «О принципах экологической безопасности в государствах Содружества». Проект этого законодательного акта был разработан НИЦЭБ РАН (Донченко В.К., Макаров О.Н.). Он был принят Постановлением МПА СНГ от 29 декабря 1992 г.

За период с 1992 по 2021 год при участии специалистов НИЦЭБ РАН было подготовлено более 20 проектов модельных нормативно-правовых актов и международных договоров, в том числе:

– Модельный Экологический кодекс для государств – участников Содружества Независимых Государств (Общая часть). Принят Постановлением МПА СНГ от 16 ноября 2006 г. (Донченко В.К., Макаров О.Н., Соболев И.А.).

– Модельный Экологический кодекс для государств – участников Содружества Независимых Государств (Особенная часть). Принят Постановлением МПА СНГ от 31 октября 2007 г. (Бегак М.В., Донченко В.К., Макаров О.Н., Соболев И.А.).

– Модельный закон «Об экологическом аудите». Принят Постановлением МПА СНГ от 18 апреля 2014 г. (Кодолова А.В.).

– Модельный закон «О рациональном использовании и охране трансграничных вод (водных объектов)». Принят Постановлением МПА СНГ от 18 апреля 2014 г. (Кодолова А.В.)

– Модельного закона «О предотвращении и минимизации негативного воздействия биоцидов на окружающую среду». Принят Постановлением МПА СНГ от 20 мая 2016 г. (Донченко В.К., Кодолова А.В.).

– Модельный закон «О распространении и использовании генно-модифицированных организмов в сфере экспорта сельскохозяйственной продукции». Принят Постановлением МПА СНГ от 20 мая 2016 г. (Кодолова А.В.).

– Модельный законодательный акт «Термины и определения в модельном законодательстве государств-участников СНГ». Принят Постановлением МПА СНГ от 20 мая 2016 г. (Бегак М. В., Донченко В.К.).

– Обоснование проекта Межгосударственного соглашения по формированию Объединенной информационной системы государств – участников СНГ по защите от биоопасностей 2014-2016 гг. (Горный В.И., Кодолова А.В.).

– Сравнительно-правовой анализ экологического законодательства государств-участников СНГ. Одобрено Постановлением МПА СНГ от 20 мая 2016 г. (Кодолова А.В.)

– Конвенция Содружества Независимых Государств о сотрудничестве в области исследования и использования космического пространства в мирных целях. Подписана главами государств-участников СНГ 28 сентября 2018 г., вступила в силу в 2019 г. (Тронин А.А., Горный В.И., Кодолова А.В.).

– Рекомендации по созданию национальных центров экологической безопасности. Приняты Постановлением МПА СНГ от 22 ноября 2019г. (Донченко В.К.).

– Модельный закон «Об экологическом туризме» Принят Постановлением МПА СНГ от 22 ноября 2019 г. (Донченко В.К.).

– Модельный закон «Об оценке экологического ущерба» Принят Постановлением МПА СНГ от 22 ноября 2019 г. (Кодолова А.В.).

10. Научные контакты НИЦЭБ РАН

Институт традиционно поддерживает научные связи с институтами отделения наук о Земле РАН, а также с российскими и зарубежными университетами.

Сотрудники НИЦЭБ РАН активно участвовали и участвуют в работе экспертных Советов Комитетов Совета Федерации и Государственной Думы Российской Федерации, а также в работе научно-технического Совета Росприроднадзора министерства природных ресурсов и экологии.

Они входят в состав объединенного научного Совета по комплексной проблеме «Экология и природные ресурсы» Санкт-Петербургского научного Центра РАН, в состав секции «Экология и защита природы» Санкт-Петербургского Дома ученых им. М. Горького, секция «Экология и защита природы» (Калинина И.К.), а также в состав многих других общественных организаций.

11. Образовательная деятельность

С 1996 по 2012 г. в структуре проводилась работа по подготовке научных кадров. За годы работы аспирантуры и докторантуры подготовлены и успешно защитили свои диссертации 17 кандидатов наук и 13 докторов (зав. аспирантурой Цветкова И.А.).

Сотрудники института преподают во многих ВУЗах Санкт-Петербурга.

В 1997 году в составе факультета географии и геоэкологии (в настоящее время институт наук о Земле) Санкт-Петербургского государственного университета была организована базовая выпускающая кафедра «Экологическая безопасность и устойчивое развитие регионов» (зав. каф. с 1997 по 2018 г. Донченко В.К.).

В 2008–2012 гг. НИЦЭБ РАН принимал активное участие в международном консорциуме совместного международного проекта международной программы ТЕМПУС 144746-TEMPUS-2008-RU-JPCR «Совершенствование образования в области экологического менеджмента», (координатором программы был Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра «Экологическая безопасность и устойчивое развитие регионов»). В состав консорциума входили преподаватели и ученые из 13 университетов и организаций 9 стран.

На кафедре за эти годы было подготовлено более четырехсот специалистов, бакалавров и магистров по специальностям: экологическая безопасность и экологический менеджмент.

12. Международное сотрудничество

НИЦЭБ через международные научные и образовательные программы, такие как TACIS, LIFE, TEMPUS, INTAS, EU Framework и др. осуществлял международное научное сотрудничество.

В рамках двустороннего сотрудничества выполнялись работы с научными и образовательными учреждениями: Республики Беларусь, Германии, Индии, Нидерландов, Республики Казахстан, Кыргызской Республики, Китая, Норвегии, Финляндии, Чехии, Швеции, Республики Узбекистан, Украины, Эстонии, Японии и др.

Институт установил партнёрские отношения с авторитетными международными организациями: Межпарламентской ассамблеей государств - участников СНГ, ХЕЛКОМ, ЮНЕП, Зеленый крест и др. НИЦЭБ РАН является соучредителем международного Центра (Фонда) по космическому зондированию им. Ф. Нансена. (Ученый секретарь НИЦЭБ по международным связям Романюк Л.П).

13. Перспективы развития научной деятельности НИЦЭБ РАН

В настоящее время НИЦЭБ РАН вошел на правах обособленного подразделения в структуру Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Основные направления научной деятельности НИЦЭБ РАН утверждены Приказом Минобрнауки №768 от 8 июля 2020 г. Они включают:

- фундаментальные эколого-экономические и правовые проблемы обеспечения экологической безопасности;
- фундаментальные основы оценивания и обеспечения здоровья экосистем, методы диагностики их состояния и оперативного предупреждения о возникновении угроз экологической безопасности;
- фундаментальные и прикладные основы процессов трансформации и миграции экотоксикантов в окружающей среде;
- фундаментальные и прикладные исследования жизненных циклов природно-хозяйственных систем и объектов прошлого экологического ущерба, методы и процессы реабилитации нарушенных и загрязненных экосистем и техногенных ландшафтов, системы обращения с отходами.

В соответствии со стратегией развития НИЦЭБ РАН были определены основные направления научно-организационной деятельности института на ближайшую перспективу:

- Сохранение междисциплинарного характера исследований института.
- Тесное взаимодействие с органами исполнительной и законодательной власти по проблемам экологической безопасности.

– Адаптация тематик работ с научными планами Отделения наук о Земле РАН.

– Интеграция с высшей школой.

– Кооперация исследований в международных исследовательских сетях.

В качестве перспективных научных направлений для института можно указать следующие:

– Экологическая безопасность природно-хозяйственных систем и городов.

– Методы оценки экологического риска и ущерба.

– Экологическая безопасность региона Балтийского моря.

– Биоремедиация загрязнённых почв и техногенных ландшафтов.

– Проблемы комплексного обращения с отходами Северо-Запада РФ, и, в первую очередь, Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

– Экологические последствия изменений климата.

Заключение

Подводя итоги 30-летней деятельности института, можно констатировать, что поставленные перед ним задачи по научному сопровождению строительства в Ленинграде–Санкт-Петербурге систем городского водоснабжения и водоотведения выполнены. Успешное завершение строительства городских очистных сооружений позволило обеспечить завершение 12 августа 2011 г. строительство управляемого гидротехнического сооружения – КЗС Санкт-Петербурга от наводнений.

Более трехсот лет наш город не мог дать достойный отпор стихии, а сейчас КЗС работает в заданном технологическом режиме и состояние защищенности Санкт-Петербурга от наводнений ни у кого не вызывает сомнений. Практически доказано, что реализация мирового опыта по использованию управляемых защитных гидротехнических сооружений, например, возведенных в дельтах рек Рейна и Шельды в Нидерландах, способствует улучшению качества водной среды.

Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений и объекты ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» неразрывно связаны и представляют собой уникальную природно-техническую систему экологической безопасности большого города, которую можно рассматривать, как Санкт-Петербургский блок природно-технической системы экологической безопасности Балтийского моря, в создании которой есть вклад ученых НИЦЭБ.

Полученный опыт может рассматриваться, как международная экологическая инициатива Санкт-Петербурга. Экономический и экологический эффект внедрения данной системы определяется не только в денежном выражении, главное достижение заключается в защите здоровья петербуржцев и водных экосистем Балтийского моря.

Никто из скептиков не мог и предположить, что эти объекты будут построены, создадут положительный экологический имидж России и станут объектами

посещения многочисленных туристов – жителей и гостей нашего города. В частности, до пандемии коронавируса COVID-19 «Водоканал Санкт-Петербурга» и Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений входили в число объектов посещений участников международного Невского экологического конгресса, который всегда проходит в конце мая. Безусловно, после пандемии эти экскурсии возобновятся.

Следует, однако, отметить, что достигнутый результат представляет собой важнейший, но не окончательный этап в развитии природно-технической системы экологической безопасности Балтийского моря. Особую актуальность в настоящее время имеет проблема трансграничного сетевого управления системами водоотведения больших городов региона Балтийского моря на основе наилучших доступных технологий.

Создание международного сетевого экологического портала «Здоровье Балтийского моря», имеющего каналы открытого доступа, позволит в наше сложное время координировать действия стран региона Балтийского моря и разрабатывать надежные прогнозы развития экологической ситуации. Это следующий этап, который вполне может быть реализован под эгидой ХЕЛКОМ.

Целесообразно подготовить междисциплинарную научную программу, ориентированную на научное обоснование и практическую реализацию цифровых методов диагностики и прогнозирования экологического риска. Это необходимо для подготовки принятия управленческих эколого-экономических решений, обеспечивающих своевременную оценку и поддержание экологически безопасных уровней экологической емкости территории водосборного бассейна Балтийского моря подверженных негативным природным, антропогенным и природно-антропогенным воздействиям.

С основания НИЦЭБ до 2017 года директором института был доктор экономических наук, профессор Донченко В.К., с 2017 г. – доктор геолого-минералогических наук Тронин А.А.

В 2020 г. НИЦЭБ РАН вошёл в состав Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра как обособленное подразделение. Научно-методическое руководство институтом осуществляется Отделением наук о Земле РАН и его академиком-секретарём, академиком Глико А.О.

2.6. ОТДЕЛЕНИЕ ИСТОРИКО-ФИЛОЛОГИЧЕСКИХ НАУК

Институт истории материальной культуры РАН на рубеже тысячелетий *О.И. Богуславский*

В статье изложены наиболее значимые результаты исследований ведущих ученых Института истории материальной культуры РАН за последние 30 лет. Представлены исследования первоначального заселения территории нашей страны, что связано с новейшими археологическими открытиями на Кавказе, Таманском полуострове, в Крыму, а также в Арктике. Дана краткая характеристика результатам работ в рамках традиционных направлений исследований. Отдельно охарактеризована роль археологических исследований в мероприятиях по сохранению культурного наследия, в частности, участием ученых ИИМК РАН в изучении Пальмиры (Сирийская республика).

21 ноября 1991 года Указом Президента РСФСР была восстановлена Российская академия наук как высшее научное учреждение России. В этом же году постановлением Президиума АН СССР Ленинградское отделение Института археологии АН СССР, которое является прямым наследником старейшего государственного археологического учреждения России — Императорской археологической комиссии (ИАК), образованной в Санкт-Петербурге в 1859 г., было преобразовано в самостоятельное научное учреждение с возвращением ему прежнего наименования — Институт истории материальной культуры РАН (ИИМК РАН) [1].

Научная деятельность ИИМК РАН традиционно включает изучение широкого спектра археологических культур каменного века Евразии (Отдел палеолита); исследование раннеземледельческих культур и городских цивилизаций Центральной Азии, Кавказа, Среднего и Ближнего Востока, а также археологических культур степной зоны Евразии (Отдел археологии Центральной Азии и Кавказа); изучение греко-варварских контактов в Северном Причерноморье (Отдел истории античной культуры); исследование взаимодействия племен и народов на территории Восточной Европы и в регионе Балтики, археология и история Древней Руси (Отдел славяно-финской археологии). Экспериментально-трассологическая лаборатория ведет микро- и макроанализ орудий труда, а Лаборатория археологической технологии изучает древние производства и занимается проблемами радиоуглеродного датирования археологических объектов. Вопросами, связанными с проведением охранных археологических работ и использованием информационных технологий в археологических исследованиях, занимается Отдел охранной археологии. В состав ИИМК РАН входят также Лаборатория камеральной и цифровой обработки, учета и хранения археологических коллекций и Научный архив.

Палеолит Кавказа и юга Русской равнины всегда были в сфере интересов археологов РАИМК — ГАИМК — ЛОИА АН СССР — ИИМК РАН. Научно-исследовательская деятельность в XX в. кавказской школы палеолитоведения в ЛОИА АН СССР — ИИМК РАН ознаменовалась новыми открытиями и исследованиями первоклассных археологических памятников и созданием ряда крупных обобщающих работ. Вплоть до 80-х гг. прошлого века наиболее ранние археологические находки на территории Южного Кавказа были представлены памятниками, возраст которых определялся в интервале 600–300 тыс. л. н. [2]. Крупные изменения в представлениях о первоначальном появлении человека на Южном Кавказе произошли с открытием на юге Грузии раннепалеолитической стоянки Дманиси, возраст которой составляет около 1,8 млн. л. н. [3]. Обнаруженные в результате работ Армяно-Российской экспедиции в Лорийской котловине места пребывания древних людей позволили заполнить этот пробел и по-новому взглянуть на формирование раннего населения региона в ашельский период (рис. 1). Сравнение обнаруженных каменных индустрий с близкими по времени материалами Ближнего Востока, который долгое время считался исходным пунктом заселения Южного Кавказа, показывает, что они существенно отличаются по набору используемого каменного сырья, технико-морфологическим показателям и направлению эволюции. С другой стороны, наблюдаются некоторые черты преемственности между ранними и поздними стадиями развития ашеля на Южном Кавказе [4]. Это позволяет полагать, что ашель Южного Кавказа формировался в основном независимо от ашеля Ближнего Востока, но не исключает возможности некоторых связей между ними в результате межрегиональных миграций [5].

В 2002 г. в Предкавказье, на Тамани был найден археологический памятник эпохи палеолита возрастом древнее 1 млн. л. — раннепалеолитическая стоянка Богатыри/Синяя Балка (рис. 2) [6]. В последующие годы в результате исследований была выявлена и предварительно изучена новая, ранее неизвестная самобытная раннеашельская индустрия («культура»), названная таманской. Ее создатели были охотниками на крупных млекопитающих и собирателями водных пищевых ресурсов на пляжах морских лагун и эстуариев. Прослеживаются два этапа в развитии этой индустрии. Первый — стоянка Кермек (возраст в интервале от 2,1 до 1,8 млн. л. н.), второй — комплексы стоянок Родники 1–4 и Богатыри/Синяя Балка (возраст в интервале от 1,6 до 1,0 млн. л. н.) [7, 8].

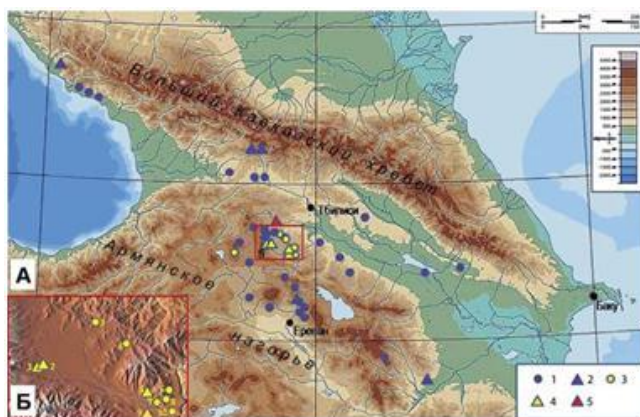


Рис. 1. А — расположение основных раннепалеолитических памятников Южного Кавказа: 1 — позднеашельские местонахождения; 2 — позднеашельские стратифицированные памятники; 3 — ранне- и среднеашельские местонахождения; 4 — ранне- и среднеашельские стратифицированные памятники; 5 — олдованская стоянка Дманиси. Б — ранне- и среднеашельские памятники Лорийской котловины: 1 — Карахач; 2 — Мурадово; 3 — Дзорамут; 4 — Привольное; 5 — Ягдан; 6 — Ардви; 7 — Кохес; 8 — Мгарт; 9 — Курган I; 10 — Аревацаг (по Е.В. Беляевой и В.П. Любину [5])



Рис. 2. Расположение раннепалеолитических стоянок в южном Приазовье на северном берегу Таманского полуострова (А). Б — вид с северо-востока (по В.Е. Щелинскому [8])

Эту картину дополняют исследования сотрудников ИИМК РАН в Крыму. В 2016 и 2017 гг. сотрудниками ИИМК РАН были проведены археологические исследования в Солнечной долине Судакского городского округа [9]. Изученные здесь археологические материалы могут быть предварительно датированы, начиная с 900 тыс. л. н. (рис. 3). Полученные результаты дают основание относить к этому же времени нестратифицированные каменные изделия аналогичного облика, найденные

ранее в Южном Крыму украинскими археологами на поверхностях высоких морских террас. Таким образом, новые исследования по раннему палеолиту в Крыму подтвердили общепринятую гипотезу о заселении Восточной Европы именно с территории Кавказа [10]. Открытие раннепалеолитических местонахождений на крымском побережье показало особое значение Крыма как промежуточного пункта в дальнейшем распространении предков ископаемого человека на территорию Русской равнины и, возможно, далее на запад [11].

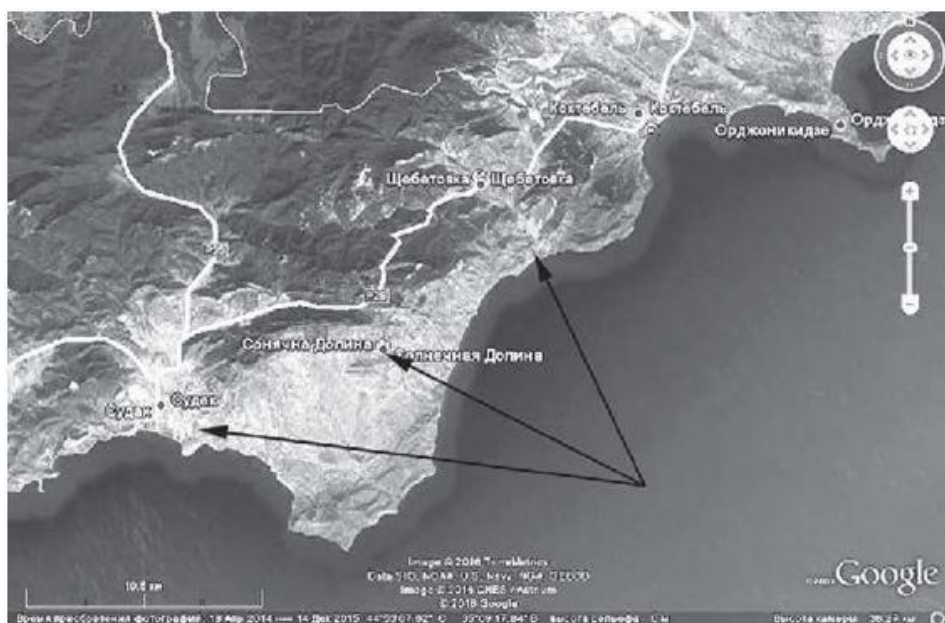


Рис. 3. Крымский полуостров (южная часть). Стрелками указаны места работ Крымского отряда ИИМК РАН в 2016–2017 гг. (по Н.К. Анисюткину и В.А. Кулакову [11])

В вопросах исследования материальной культуры древнейших обитателей России большое значение уделяется хронологии среднепалеолитических памятников Русской равнины (Шлях, Хотылёво 1, Бетово, Бирючья балка 2, Рожок 1, Сухая Мечётка) и Пруто-Днестровского междуречья (Тецканы 10, грот Буздужаны), исследовавшихся в последние два десятилетия (1998–2018) экспедициями Отдела палеолита ИИМК РАН (рис. 4). Полученные данные дают достаточные основания предполагать, что средний палеолит появился на юге и западе Восточной Европы значительно раньше, чем в ее центральных и восточных областях. Вместе с тем нельзя исключить, что какие-то из рассмотренных выше памятников Русской равнины имеют на самом деле гораздо более древний возраст, чем представляется по имеющимся сейчас данным. Что касается конца среднепалеолитической эпохи в Восточной Европе, то самые поздние датировки, ставящие под сомнение

общепринятые сейчас представления о верхней хронологической границе среднего палеолита, делались еще до широкого внедрения современных методов очистки образцов и могут быть сильно омоложенными [12].

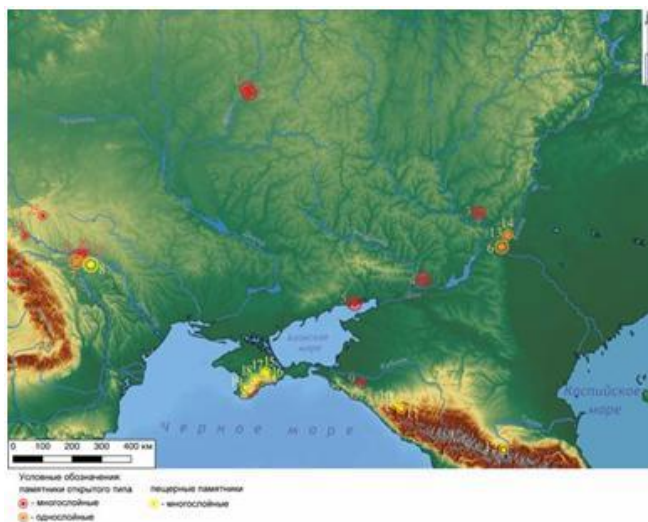


Рис. 4. Карта, показывающая расположение памятников, упоминаемых в тексте статьи (крупными значками показаны памятники, исследовавшиеся экспедициями ИИМК РАН в 1998–2018 гг.) (по Л.Б. Вишняцкому, П.Е. Нехорошеву, А.К. Очередному [12])

Обширный регион верхнего и среднего течения Енисея всегда был традиционным местом сосредоточения усилий исследователей палеолита из Ленинграда — Санкт-Петербурга. Начиная с 1960 г. здесь проводились поиски и раскопки памятников эпохи палеолита. Итогом этой деятельности стал капитальный двухтомный труд [13, 14] с подробным описанием материалов кокоревской и афонтовской палеолитических культур и коллективный свод памятников региона [15]. Работы были продолжены Н.Ф. Лисицыным, открывшим стоянки каменного века в покровных отложениях высоких террас Енисея, размываемых водохранилищем Красноярской ГЭС [16]. На Верхнем Енисее С.Н. Астахов открыл и обследовал многочисленные местонахождения (включая ашельские и мустьерские) в Туве, а также раскопал несколько верхнепалеолитических поселений в горах Западного Саяна [17]. Позже к исследованиям в последнем районе подключился С.А. Васильев, сосредоточившийся на раскопках группы многослойных памятников близ Майны, которые, среди прочего, доставили уникальный образец палеолитической глиняной статуэтки [18]. П.Е. Нехорошев на протяжении ряда лет возглавлял кампанию спасательных раскопок палеолитических стоянок в Березовском карьере в Красноярском крае [19]. С.Н. Астахов при участии японских коллег возобновил исследования палеолита в Туве и провел разведки на южном участке проектируемой

железной дороги Кызыл — Курагино. Во время исследования многослойного поселения Ирба 2 ниже культурных напластований голоценового возраста были обнаружены остатки, относящиеся к плейстоцену. Найдены кости бизона, северного, благородного и гигантского оленя, лошади, медведя, зайца, изделия из камня и предметы из обработанного рога. Радиоуглеродное датирование указало на финальноплейстоценовый возраст находок (примерно от 13 до 11 тыс. лет). Комплекс принадлежит к афонтовской культуре, доминировавшей в бассейне Верхнего Енисея в конце палеолита. Особое значение памятнику Ирба 2 придает редкая находка — овальная плоская галька белого мрамора с 37 насечками по краю, крестообразными гравировками на обеих плоскостях и следами не завершенных сверлин (рис. 5). Ближайшие аналогии находка с Ирбы находит в гравированных дисках из агальматолита, происходящих из Афонтовой Горы II и III в Красноярске. Подобные находки редки в палеолите и представляют собой, скорее всего, амулеты [20].

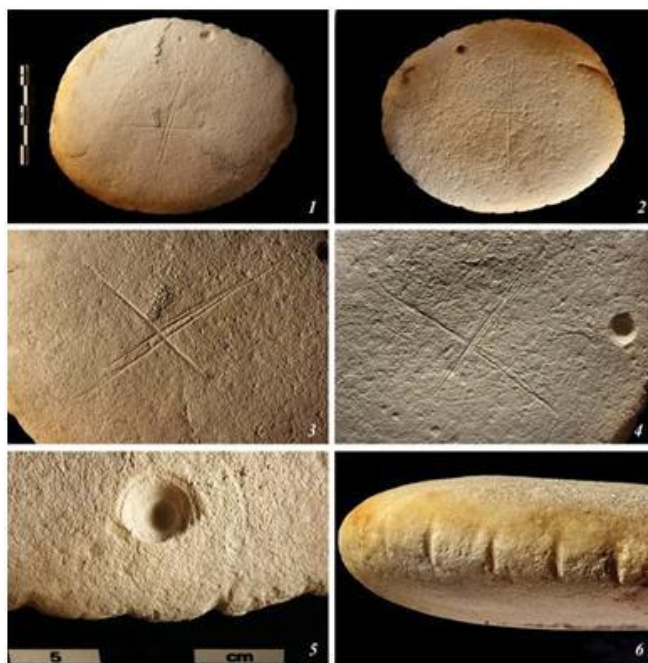


Рис. 5. Гравированная галька со стоянки Ирба 2 (фото Е. Ю. Гири): 1 — общий вид (поверхность «А»); 2 — общий вид (поверхность «В»); 3 — изображение креста на поверхности «А»; 4 — изображение креста на поверхности «В»; 5 — сверлина на поверхности «В»; 6 — насечки на ребре предмета (по С.А. Васильеву, А.В. Полякову, П.Б. Амзаракову и др. [20])

Вот уже более трёх столетий разносторонние исследования Арктического региона России представляют собой важнейшее направление деятельности научных учреждений нашего города. К 1980-м гг. оказался сформирован колоссальный фонд

источников, на основании которых можно было ставить и решать важнейшие культурно-исторические вопросы, связанные с древним прошлым Арктики. В ходе работ Восточно-Сибирской (Яно-Индигирской) экспедиции ИИМК РАН за последние 30 лет были открыты и исследованы уникальные памятники каменного века — Жоховская стоянка (Новосибирские о-ва), чей возраст составляет 9 000 л. н. (рис. 6), и палеолитическая Янская стоянка, возраст которой составляет ~32 000 л. н. (рис. 7). Если первая является древнейшим свидетельством расселения людей в высокоширотной Арктике, то материалы Янской стоянки впервые раскрывают облик древней культуры населения Арктики во многих и неожиданных деталях. Это уникальные памятники мировой археологии. Так, археологические контексты Янской стоянки доставили коллекции изделий из бивня мамонта и кости феноменального качества, коллекции многих категорий орудий являются крупнейшими в мире. Исследования Янской стоянки продолжаются. Помимо этих двух объектов, было открыто и в разной степени изучено 15 других объектов, относящихся к различным эпохам. Многие из них связаны с так называемыми «кладбищами мамонтов». В результате исследований установлено, что эти объекты являются результатом человеческой деятельности, собрано большое количество костей мамонтов, повреждённых в результате охоты. В ходе работ получено огромное количество разносторонней палеоприродной и палеоклиматической информации, проведены исследования четвертичных отложений района работ, реконструирована природная среда позднего плейстоцена, воссозданы условия обитания древнего человека. Показано, что основные изменения культуры местного населения и его расселение в пределах Северо-Востока России были тесно связаны с природными процессами. В результате работ установлено, что насельники арктической Сибири ранее 9 000 л. н. смогли одомашнить собаку и начали использование транспортного собаководства, что оказалось колоссальным адаптационным прорывом. Возникла культура подвижных охотников первой половины голоцена [21].

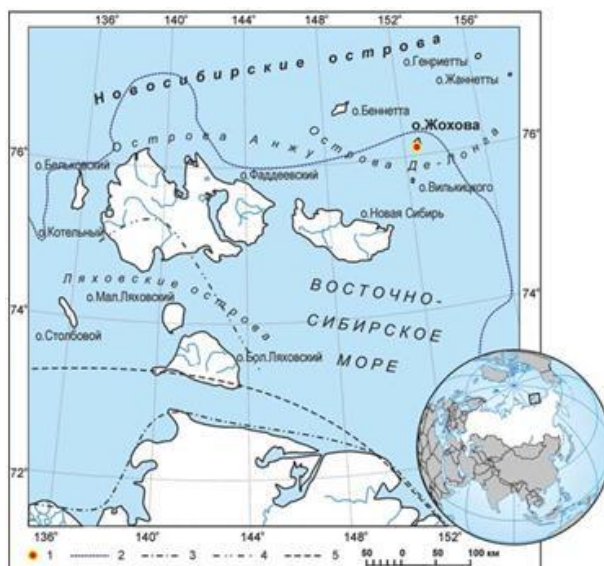


Рис. 6. Карта-схема архипелага Новосибирские о-ва, Сибирская Арктика и основные черты природной обстановки на этой территории около 9 000 л. н.: 1 — местоположение Жоховской стоянки; 2 — положение береговой линии около 9 000 л. н.; границы распространения древесных и кустарниковых пород около 9 000 л. н.: 3 — прямоствольной берёзы; 4 — ольховника и кустарниковой берёзы (по данным Толль, 1897); 5 — лиственницы (по В.В. Питулько [21])

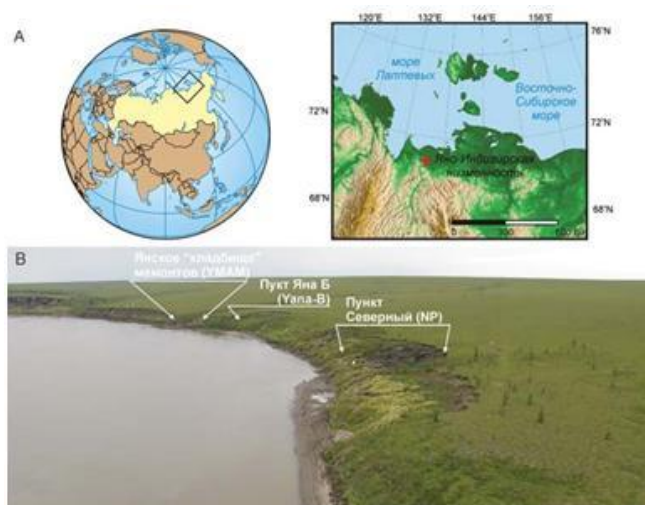


Рис. 7. Местоположение Янской стоянки: А — географическое положение Янского стояночного комплекса; В — пространственное взаимоотношение объектов Янской стоянки на левом берегу р. Яны, вид с востока (по В.В. Питулько [21])

Изучение более поздних эпох развития человечества имеет весьма сложный и многогранный характер. Важное место в приобретении новых знаний имеют так

называемые торфяниковые стоянки. Они дают возможность исследовать редко сохраняющиеся в других местах уникальные изделия из дерева и других растительных материалов, широко использовавшихся древним населением (рис. 8). На севере Европы благоприятные условия для формирования подобных стоянок сложились еще в раннем голоцене в самом конце палеолита. Среди торфяниковых стоянок на территории Европейской части России одно из ключевых мест занимает Замостье 2 — многослойная озерная стоянка (поселение) позднего мезолита — среднего неолита. Стоянка Замостье 2 расположена в бассейне Верхней Волги, на севере Московской области (Сергиево-Посадский р-н), в пойме реки Дубна. Весьма актуальной в последние годы является проблема диеты первобытного человека и ее возможные сдвиги. Подходы к решению этой проблемы предлагаются самые разные. В частности, к материалам стоянки Замостье 2 применяется целый ряд новых естественно-научных разработок: молекулярный и изотопный анализ липидов, извлеченных из образцов нагара, образовавшегося на сосудах в процессе приготовления пищи, а также измерение стабильных изотопов ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) в коллагеновых экстрактах, полученных из образцов человеческих костей [22, 23].



Рис. 8. Замостье 2. Деревянный инвентарь и конструкции: 1 — кремневая пластина с берестяной обмоткой; 2 — полоз саней; 3 — весло; 4 — рыболовные верши (вид 2011 г.); 5 — планка с берестяной обмоткой; 6 — поплавок из-под верши; 7 — фигурка змеи; 8–9 — ложечки; 10–11 — конические поделки; 12 — заготовка ковша; 13 — муфта для тесла (фрагмент), 14 — наконечник дротика. 1, 3–4, 8–9 — ранний неолит; 2 — финальный мезолита; 5–7, 10–14 — поздний мезолит (по О.В. Лозовской [23])

Трасологический метод, разработанный выдающимся русским ученым Сергеем Аристарховичем Семёновым, основателем экспериментально-трасологической лаборатории в ЛОИА / ИИМК РАН, получил всемирное признание и является одним из оригинальных научных направлений, которое сформировалось внутри самой археологии [24]. Благодаря применению комплексной методики исследования производственного инвентаря, включающей технико-морфологический, экспериментально-трасологический анализы с привлечением археологического контекста, планиграфии, данных естественных наук (палеоботаники, палеозоологии) и этнографических наблюдений, появилась возможность не только определять функции орудий труда, характеризовать особенности различных производств, но и реконструировать основные направления хозяйственных систем древности (рис. 9). Использование в современных трасологических исследованиях наряду с традиционными методиками цифровой техники, сканирующих устройств, объемного моделирования, разнообразных способов выявления органических остатков, сохранившихся на рабочих поверхностях орудий, позволяет детализировать функциональные определения многих орудий, в том числе древнейших инструментов для обработки растительного сырья. Полученные данные являются важнейшим источником для характеристики особенностей освоения человеком природной среды на различных этапах древней истории [25].



Рис. 9. Экспериментальные работы по использованию тёрочников в верхнем палеолите: 1 — заготовка каменной плитки для растирания; 2 — заготовка куранта для растирания; 3 — «мука» из корней высушенного рогоза; 4 — процесс изготовления муки из корней высушенного рогоза; 5 — следы использования на экспериментальной плитке-тёрочнике (микрофото $\times 50$); 6 — следы использования на экспериментальном куранте (микрофото $\times 100$) (по Н.Н. Скауну, В.В. Терехину, Л. Лонго, И.Б. Пантюхиной [25])

Начиная с 1973 г. Кольской экспедицией ИИМК РАН открыты и исследуются 4 памятника наскального искусства, находящиеся в Заполярье (рис. 10). Они демонстрируют как сходство с другими памятниками Фенноскандии, так и существенные различия. То, что отдельные фигуры и наскальные композиции раскладываются в небольшое количество весьма стандартизованных типов, говорит в пользу того, что изображались не «сценки из жизни», а мифологические сюжеты. Исследуемые наскальные изображения вполне вписываются в широкий круг наскального искусства Северной Европы, относимого к обществам с присваивающим типом хозяйства. Репертуар наскальных полотен очень близок, хотя стиль изображений и характер даже однотипных композиций различаются значительно. В то же время выявляемые сходства и несходства памятников наскального искусства скорее следует интерпретировать как следствие сходства элементов хозяйственно-культурного типа создателей наскальных изображений, а не как свидетельство их интенсивных «культурных» связей через всю Фенноскандию с посещением «художниками» своих отдаленных коллег [26].



Рис. 10. Памятники наскального искусства, расположенные на Кольском и Рыбачьем полуостровах в Мурманской области (по Е.М. Колпакову и В.Я. Шумкину [26])

В последние десятилетия наша наука все чаще сталкивается с проблемой периодизации археологических материалов той или иной эпохи. Особенно актуальна эта проблема становится при создании крупных обобщающих трудов, учебников и справочников по археологии. Оказалось, что у нас до сих пор нет надежного средства упорядочить во времени многочисленные археологические данные в соответствии с их культурно-исторической значимостью. Особенно остро эта проблема встает при

изучении памятников бронзового века юга Восточной Европы. В основу периодизации этих памятников необходимо положить более точный и объективный критерий, чем простая смена культур. Этим критерием является изменение во времени технологии металлообработки (рис. 11). Всем очевидно, что металлопроизводство имело огромное значение для развития культуры и общества в бронзовом веке, и следы его воздействия заметны повсюду, начиная с хозяйства и заканчивая идеологией. Крупные изменения в металлопроизводстве фиксируют глубокие сдвиги в культуре. В целом становится все более и более очевидным, что технология является одним из самых важных параметров культуры. В последние годы была разработана технологическая схема периодизации бронзового века южной половины Восточной Европы. В соответствии со сложившейся традицией ее I этап может быть назван «ранним бронзовым веком» (вторая половина IV — начало III тыс. до н. э.), II этап — «средним» (III — начало II тыс. до н. э.), III этап — «поздним» (с середины II тыс. до н. э.). Эти этапы не во всех регионах наступили одновременно. Так, I–II этапы раньше всего начались на территории Северного Кавказа [27].

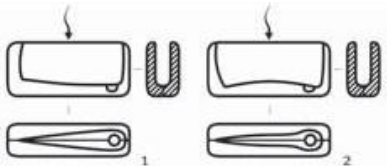
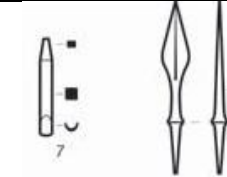
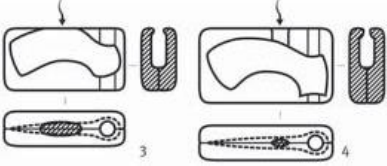
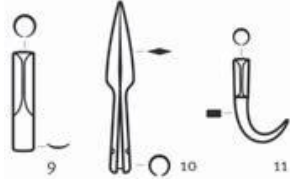
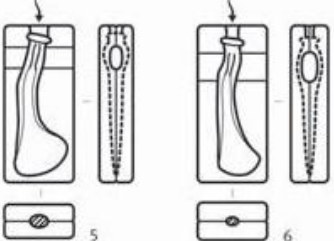
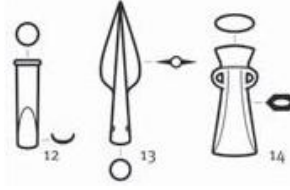
	Группы металла	Типы конструкций литейных форм	Типы узлов крепления	Материал литейных форм
I	Cu + As Cu			глина
II	Cb + As Cu + Sb Cu			глина
III	Cu + Sn Cu+Sn+As Cu			камень

Рис. 11. Основные признаки этапов развития металлообработки эпохи бронзы южной половины Восточной Европы (по В.С. Бочкареву [27])

Минусинские котловины для российской археологии совершенно особое, знаковое место. В начале XX в. на основе материалов проведенных здесь раскопок

С.А. Теплоуховым была разработана периодизация археологических памятников от энеолита до монгольского времени [28]. Именно эта блестящая работа заложила фундамент современных научных знаний. Схема развития археологических культур Минусинских котловин с момента ее разработки С.А. Теплоуховым сразу стала опорной для всего обширного сибирского региона. Он выделил три последовательно сменявшие друг друга археологические культуры эпохи бронзы: афанасьевскую, андроновскую и карасунскую (рис. 12). Особую сложность при изучении памятников древних периодов Минусинских котловин представляет абсолютная хронология. Полученные в последние десятилетия результаты естественно-научных методов позволяют значительно уточнить хронологические рамки археологических культур Среднего Енисея [29, 30]. Новейшие исследования позволили снять ряд противоречий для ранних памятников, а для эпохи поздней бронзы выработать систему периодизации, в которой радиоуглеродные даты хорошо подтверждаются аналогиями с памятниками, датированными по письменным источникам [31].

Теплоухов С.А. 1920-е годы	Грязнов М.П. 1970-е годы	Современная хронология 2000-е годы		
I этап Минусинской курганной культуры	подгорновский этап тагарской культуры	подгорновский этап тагарской культуры		
	баиновский этап тагарской культуры	IV этап	Б А	
Карасунская культура	Карасунская культура Каменноложский этап «классический» (карасунский) этап	Эпоха поздней бронзы	III этап	В Б А
			II этап	Б А
Андроновская культура	Андроновская культура. Фёдоровский этап	Андроновская (фёдоровская) культура		
	Окуневская культура	Окуневская культура	Разливский этап	
Афанасьевская культура	Афанасьевская культура		Черновский этап	
		Уйбатский этап		
неолит	неолит	неолит		

Рис. 12. Схема относительной хронологии культур энеолита и эпохи бронзы Среднего Енисея на разных этапах ее развития (по А.В. Полякову и И.П. Лазаретову [31])

На протяжении тысячелетий решающую роль в истории Центральной Азии играли скотоводческие племена. Особое место среди них занимают сюнну (хунну или азиатские гунны), с именем которых связана целая эпоха в истории этого региона. Она начинается с быстрого усиления сюнну в конце III в. до н. э. и заканчивается в первые века н. э. постепенным распадом сюннуской «державы». Завоевания сюнну распространили их власть на огромную территорию от Маньчжурии до бассейна Енисея и привели к крушению сложившихся здесь в скифское время крупных и разнообразных по культурному облику племенных объединений. Их население частично было вытеснено из районов своего исконного обитания, частично продолжало свое развитие уже в рамках сюннуской «империи». Именно в этот период складывается основа для формирования племенных объединений эпохи средневековья, во многом определивших этническую ситуацию на востоке степного пояса и в Новое время. Часть современных исследователей считает, что установление сюннуского господства и изменение этнокультурной ситуации в Центральной Азии дало толчок «великому переселению народов». Наиболее актуальной проблемой изучения центральноазиатских гуннов (сюнну) можно считать проблему раннего этапа их истории и судьбы племенного объединения. Проведенный в последние годы анализ письменных источников и археологических данных показывает, что существующая «ордосская гипотеза» о ранней истории сюнну должна быть снята. Археологические следы миграции сюнну в европейские степи отсутствуют. Совокупность данных показывает, что историческая судьба собственно сюнну как конкретного племени связана в раннем средневековье с Центральной Азией [32].

Исследования памятников античного периода на протяжении более полутора веков являются одной из основных задач петербургских археологов. Кроме изучения остатков древней материальной культуры в последние годы на первый план выходят задачи комплексных исследований, ставящих своей целью, в частности, изучение палеоклимата. Так, при раскопках на Семибратнем городище в 2001–2009 гг. были проведены раскопки оборонительных сооружений V–I вв. до н. э., укрепленного здания и теменоса, относящихся к позднеэллинистическому периоду (рис. 13). В процессе работ была получена серия палинологических образцов, анализ которых позволил сделать ряд заключений об изменении природных условий в этом районе. Полученные данные позволяют сделать вывод, что расцвет Лабриса и его последующий упадок, помимо военно-политических причин, явно обусловлен влиянием климатических факторов, колебаний уровня Черного моря и изменений гидрологического режима Кубани [33].



Рис. 13. Оборонительные сооружения северной части Семибратнего городища (Лабриса). Реконструкция В. Б. Мартирова (по В.А. Горончаровскому [33])

В настоящее время проведение археологических раскопок часто связано с необходимостью осуществления аварийно-спасательных мероприятий на разрушающихся, по различным причинам, памятниках. Подобные работы занимают все больше места в исследованиях археологов и, в частности, специалистов ИИМК РАН, но и они позволяют получить уникальный материал для изучения прошлого. Древнее поселение и грунтовый некрополь Артющенко-2 расположены в южной части Таманского полуострова. Некрополь расположен к востоку от поселения, он был обнаружен после значительного обвала берега, который произошел зимой-весной 2002 г. С 2003 г. Таманский отряд приступил к спасательным раскопкам этого активно разрушающегося объекта. Раскопки некрополя Артющенко-2 позволяют ввести в научный оборот новые материалы, свидетельствующие о присутствии в традициях поселенцев Азиатского Боспора характерных устойчивых компонентов погребального обряда (рис. 14). Погребальный инвентарь характеризует некрополь Артющенко-2 как типичный для своего времени и ставит его в один ряд с другими известными архаическими некрополями Боспора и Северного Причерноморья в целом. Проведенный анализ различных групп находок позволяет говорить, что пик активности совершения захоронений приходится на вторую и третью четверти V в. до н. э. Погребения этого времени отличаются самым разнообразным и относительно богатым инвентарем, который отражает и тип хозяйственной деятельности, и торговые и культурные связи в регионе. В начале IV в. до н. э. погребальный обряд немного трансформируется: количество инвентаря в погребениях уменьшается, он становится менее разнообразным. Это может быть связано как с изменением погребальных традиций у старого населения, так и с притоком нового населения, привнесившим свои традиции [34].



Рис. 14. Некрополь Артюшенко-2. Расписные сосуды: 1 — погребение 47; 2 — погребение 6; 3 — погребение 39; 4 — погребение 6; 5 — погребение 70 (по С.В. Кашаеву [34])

На западной окраине поселения Артюшенко-1 на протяжении нескольких лет изучался весьма необычный комплекс (рис. 15). Он включал в себя ряд объектов: глинобитная площадка (площадь — около 130 кв. м), на которой производилось сжигание пленчатой пшеницы-однозернянки; крупные жертвенные ямы, в которых обнаружены скелеты животных, иногда залегающие пластами; человеческие погребения в неглубоких ямах. Все эти объекты относятся ко II–III вв. н. э. Их совокупность позволяет считать, что на западной окраине Артюшенко-1 обнаружен священный участок. Его особенности не позволяют связывать этот участок с греческой культурной традицией. Следует указать на сходство священного участка поселения Артюшенко-1 с «ямными святилищами» Фракии, что, возможно, стало результатом усиления фракийского культурного влияния на Боспоре в римское время или даже проникновением сюда фракийских этнических групп [35].

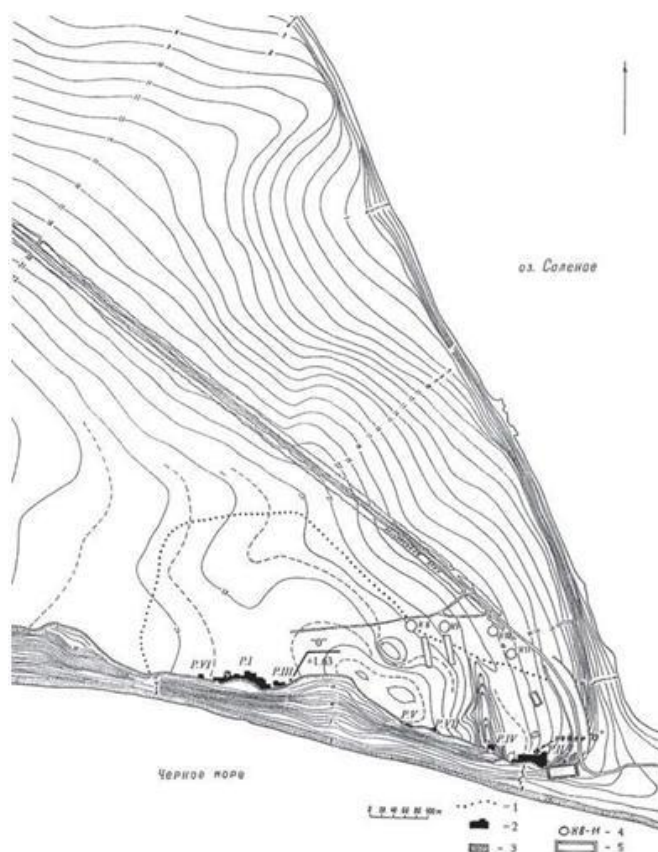


Рис. 15. Поселение Артюшенко–1. План: 1 — границы поселения; 2 — участки раскопов; 3 — раскоп 2017 г. (дополнительно обозначен стрелкой); 4 — курганы; 5 — современные постройки (по Ю.А. Виноградову [35])

Сохранение культурного наследия крайне сложная и многогранная деятельность, которая может принимать различные формы. Древняя Пальмира — величественные развалины позднеантичного города, принадлежащего к числу лучших образцов древнеримской архитектуры и признанного ЮНЕСКО памятником Всемирного наследия. Согласно объединенным результатам наземного осмотра памятника экспертами группы Министерства Культуры РФ и специальной экспедиции под руководством ИИМК РАН установлено, что преднамеренно разрушены или пострадали в ходе военных действий наиболее знаковые объекты архитектурно-археологического наследия. Созданная археологами ИИМК РАН, Государственного Эрмитажа и специалистами фирмы «Геоскан» комплексная цифровая система «PalmyraGIS» содержит наиболее полные и актуальные сведения о состоянии архитектурных и археологических объектов памятника Всемирного наследия ЮНЕСКО «Археологические памятники Пальмиры» (рис. 16). В результате проведенных работ Россия стала единственным обладателем самой актуальной

фиксации современного состояния всемирно известного памятника, позволяющей обеспечить предельную точность при дистанционном обсуждении, планировании и проведении реставрационных мероприятий и будущих археологических исследований [36].

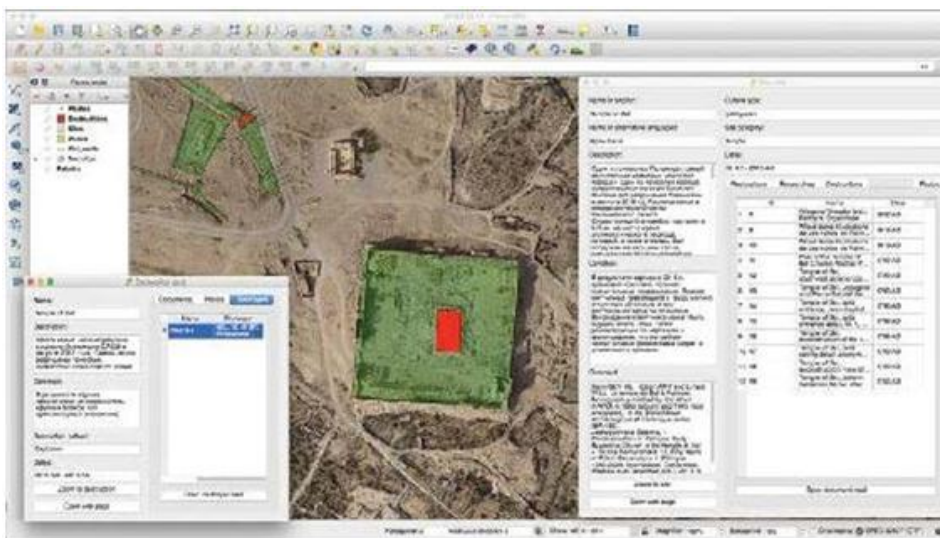


Рис. 16. Плагин «PalmyraGIS User Tools», открыта карточка храма Бела (по Н.Ф. Соловьевой, С.Л. Соловьеву, Е.К. Блохину и Э.Э. Казакову [36])

В центре внимания исследователей ИИМК РАН традиционно остаются проблемы средневековой археологии и ранние этапы формирования Русского государства. Старая Ладога — уникальный комплекс памятников, расположенный на протяжении 5 км, преимущественно по левому берегу реки Волхов, и включающий более 160 объектов археологии (от неолита до позднего средневековья), истории и архитектуры [37] (рис. 17). Каждый полевой сезон дает не только интересные находки, но и ставит перед исследователями новые вопросы, решение которых далеко выходит за пределы собственно ладожской проблематики и имеет значение для Древней Руси в целом. В настоящее время ИИМК РАН начинает серию оперативных публикаций материалов и исследований Старой Ладоги с целью формирования Корпуса археологических источников Ладоги. Первое издание посвящено 80-летию начала систематических раскопок Старой Ладоги (1938–2018). В нем обобщены основные итоги работ за последние десятилетия, дана характеристика базовых социально-исторических концепций и идей, которые в разное время определяли трактовки материалов. Определены существенные черты современного этапа исследований и намечены перспективы дальнейшего изучения Староладожского комплекса [38, 39].



Рис. 17. Устье Ладожки — естественная гавань. Фото 2018 г. (по В.А. Лапшину [39])

Не менее значимым для изучения ранней истории России является Рюриково городище в истоке Волхова (рис. 18). Новгородская экспедиция ЛОИА/ИИМК на протяжении ряда десятилетий вела работы по изучению Городища, при этом была получена большая серия находок (керамика, украшения, предметы вооружения и др.). Их анализ позволяет сделать вывод о разнонаправленных связях населения Городища (элементы скандинавской, славянской и финской культур). Особо отметим изучение системы ранних укреплений Городища и раскопки остатков Благовещенского собора начала XII в. Многолетние исследования Рюрикова городища не только вывели его в число памятников культуры общеевропейского уровня, но во многом определили его судьбу, нынешнюю и грядущую среди объектов национального наследия всей России. В 2009 г. Дума Великого Новгорода приняла решение о включении территории Городища в городскую черту. Рюриково городище и Новгород были признаны символами зарождения русской государственности, празднование 1150-летия состоялось осенью 2012 г. Тогда 22 сентября на Городище был открыт памятный знак — «Княжий камень», свидетельствующий о приходе на Русскую землю в IX в. скандинавского князя по приглашению новгородцев. Надпись на многотонном валуне, принесенном в Приильмень ледником из Скандинавии тысячи лет назад, воспроизводит фрагмент текста «Повести временных лет» по Радзивилловскому списку с описанием прихода Рюрика и строительством «городка над Волховом» [40].



Рис. 18. Современный общий вид на Городище после реставрации руин церкви Благовещения в 2018 г. (по Е.Н. Носову и Н.В. Хвоцинской [40])

Нижнее Поволховье, как известно, было подвержено длительному (с середины VIII в., а возможно, и ранее) и интенсивному скандинавскому культурному и экономическому воздействию. Значение торговли для региона было очень велико. Но в первую очередь его следует рассматривать как компактный земледельческий микрорегион. Об этом свидетельствует структура расселения, представляющая скопление неукрепленных поселений под защитой двух-трех городищ (рис. 19). Раннесредневековое земледельческое освоение Восточно-Балтийского региона во второй половине I тыс. н. э. можно разделить на три этапа, обусловленные динамикой увлажненности и, видимо, ростом численности населения. Учитывая специфику механического состава почвы, а именно — близкое залегание материковой известняковой плиты и большое количество известнякового щебня и ледниковых валунов в тонком слое перекрывающего ее моренного суглинка, — можно сделать вывод, что распашка производилась ралом с железным наконечником. Проведенный в последние годы анализ подобных находок указывает на то, что комплекс орудий обработки земли из Нижнего Поволховья до середины X в. имеет смешанный характер и обнаруживает значительное сходство с набором орудий Центральной Швеции и связанных с ней областей Восточной Прибалтики. Это, возможно, позволяет ставить вопрос о наличии в скандинавской экспансии в Восточной Европе (на начальных ее этапах) элементов аграрной колонизации [41].

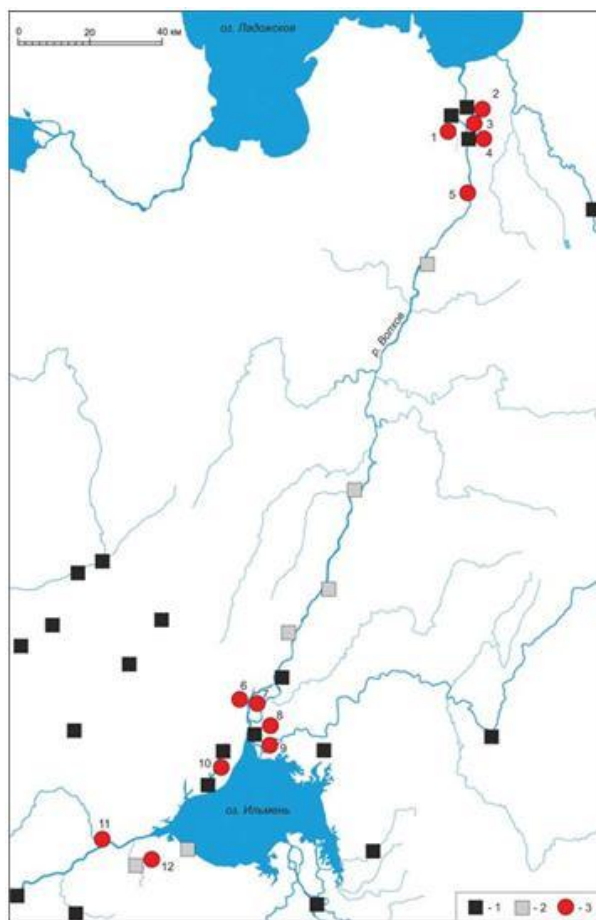


Рис. 19. Земледельческое освоение Ильмень-Волховского региона в I тыс. н. э.
 1. Городища раннего железного века — раннего средневековья. 2. Городища по неподтвержденным данным. 3. Места археологической фиксации пашен, датирующихся временем не позднее X в. Номерами обозначены исследованные участки пашен: 1 — Ладога, Земляное городище; 2 — Любша, городище; 3 — Любша, селище; 4 — Новые Дубовики; 5 — Выдин Остров; 6 — Новгород, Софийская сторона; 7 — Новгород, Торговая сторона; 8 — Рюриково Городище, холм; 9 — Рюриково Городище, пойма; 10 — Георгий; 11 — Мшага Воскресенская; 12 — Коломо
 (по И.И. Еремееву [41])

Работы по изучению и сохранению средневековых городов связаны для исследователей ИИМК РАН, в первую очередь, с городом Выборгом. Строительная деятельность в Выборге в Средние века определялась в решающей степени сложным рельефом первоначальной поверхности города, для которой были характерны крутые скальные выступы и глубокие впадины между ними (рис. 20). Первые жители выбирали ровные участки для своих небольших по размерам домов и хозяйственных построек, но уже в следующем поколении вынуждены были осваивать неудобные низменные места. Эта необходимость создавать мощные, до 0,5 м подсыпки и

бревенчатые платформы под дома сохранялась в восточной и даже центральной части города до начала XVI в. Городская территория еще не представляла единого целого и наиболее освоенные ее участки располагались отдельными «пятнами» под склонами центральной городской возвышенности. Различные части города развивались неравномерно, и это проявлялось как в строительной деятельности, так и в материальной культуре, что, по всей видимости, диктовалось различиями в занятиях населявших их жителей. На историю города, его облик и материальную культуру наложило свое отпечаток расположение Выборга не только на восточной границе Швеции с Русью, отразившееся в строительстве в 1293 г. Выборгского замка и в 1470-е гг. каменной городской стены, но и в самой восточной оконечности «городской цивилизации» Балтики. У города были налаженные торговые связи со многими городами Балтийского побережья от Германии до Таллинна, его купцы активно участвовали в посреднической торговле Запада с Новгородом и с последней четверти XV в. также с Москвой. Выборг получил городские привилегии в 1403 г. В последней четверти XV — начале XVI в. он предстает уже как сложившийся средневековый европейский город с развитой городской структурой и не отличавшейся от остальных городских центров Балтики материальной культурой жителей. В то же время жилые дома Выборга еще в большей своей части были деревянными [42].



Рис. 20. Первоначальная поверхность скалы с восточной стороны центральной городской возвышенности у ул. Краснофлотская (по А.И. Сакса [42])

В задачи не входило описание всех значимых научных результатов, полученных в ИИМК РАН за последние 30 лет. Наша задача гораздо скромнее: продемонстрировать основные направления исследований Института, сложившиеся в последние годы, или же трансформацию научных подходов к решению традиционных проблем. Тем не менее, их охват — временной, территориальный и культурный — огромен, что говорит само за себя и дает, на наш взгляд, достаточную информацию об оценке научного потенциала Института истории материальной культуры РАН.

Литература

1. Глава I. Очерк истории деятельности Императорской археологической комиссии в 1859-1917 гг. / А.Е. Мусин, М.В. Медведева, Н.И. Платонова [и др.] // Императорская археологическая комиссия (1859–1917): история первого государственного учреждения российской археологии от основания до реформы: Коллективная монография. В 2-х томах / Научные редакторы-составители А.Е. Мусин, М.В. Медведева. 2-е издание, переработанное и дополненное. СПб: ИИМК РАН, 2019. С. 62-353. DOI 10.31600/978-5-9072-9806-4-2019-62-353.
2. Любин В.П., Куликов О.А. О возрасте древнейших палеолитических памятников Кавказа // СА. 1991. № 4. С. 5-8.
3. Lumley H. (de), Lordkipanidze D., Feraud G., Garcia T., Perrenoud Ch., Falqueres Ch., Gagnepain J., Saos T., Voinchet P. Datation par la methode Ar/Ar de la couche de cendres volcaniques (couche VI) de Dmanissi (Georgie) qui a livre des restes d'hominides fossiles de 1, 81 Ma. // Comptes Rendus Palevol. 2002. № 1(3). P. 181-189. DOI:10.1016/S1631-0683(02)00023-4.
4. Беляева Е.В. Новый взгляд на развитие ашеля на Кавказе / Е.В. Беляева, В.П. Любин // Труды исторического факультета Санкт-Петербургского университета. 2014. № 18. С. 189-214.
5. Беляева Е.В. 1.2. Новые данные о первоначальном заселении Южного Кавказа (результаты работ армяно-Российской экспедиции, 2003-2018 гг.) / Е.В. Беляева, В.П. Любин // Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография. СПб: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 18-26. DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-18-26.
6. Bosinski G., Scelinskij V.E., Kulakov S.A., Kindler L. Bogatyri (Sinaja Balka) — Ein altpalaolithischer Fundplatz auf der Taman-Halbinsel (Rubland) // Erkenntnisjager. Kultur und Umwelt des fruhen Menschen. Veroffentlichungen des Landesamtes fur Archaologie, 2003. Bd. 57/I. S. 79-89.
7. Кулаков С.А. 1.1. Достижения сотрудников ИИМК РАН в изучении палеолита Кавказа в конце XX – начале XXI века / С.А. Кулаков // Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография. СПб: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 9-17. DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-9-17.
8. Щелинский В.Е. 1.3. Начало заселения первобытными людьми территории России: древнейшие раннепалеолитические стоянки Южного Приазовья / В.Е. Щелинский // Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии):

Коллективная монография. СПб.: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 27-55. DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-27-55.

9. *Анисюткин Н.К.* Исследования местонахождений раннего палеолита на высоких морских террасах Южного Крыма в 2016 г / Н.К. Анисюткин, С.А. Кулаков, А.Л. Чепалыга // *Археологические вести*. 2018. № 24. С. 33-41. DOI 10.31600/1817-6976-2018-24-33-41.

10. *Амирханов Х.А.* Северный Кавказ: начало преистории / Х.А. Амирханов. Махачкала : Издательский дом Мавраевъ, 2016. – 343 с. – ISBN 9785906124227.

11. *Анисюткин Н.К.* 1.4. Новые данные о раннем палеолите Крыма / Н.К. Анисюткин, С.А. Кулаков // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии)* : Коллективная монография. – Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 56-68. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-56-68.

12. *Вишняцкий, Л.Б.* 1.5. Новые данные по хронологии среднего палеолита Восточной Европы (по результатам полевых исследований ИИМК РАН 1998-2018 гг.) / Л. Б. Вишняцкий, П. Е. Нехорошев, А. К. Очередной // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии)*: Коллективная монография. – Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. – С. 69-82. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-69-82.

13. *Абрамова З.А.* Палеолит Енисея. Афонтовская культура. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. 157 с.: ил.

14. *Абрамова З.А.* Палеолит Енисея. Кокоревская культура. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1979. 200 с.: ил.

15. *Абрамова З.А., Астахов С.Н., Васильев С.А., Ермолова Н.М., Лисицын Н.Ф.* Палеолит Енисея. Л.: Наука, 1991. 158 с.: ил.

16. *Лисицын Н.Ф.* Поздний палеолит Чулымо-Енисейского междуречья / Н.Ф. Лисицын. – Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2000. 232 с. (Труды ИИМК РАН, т. II).

17. *Астахов С.Н.* Палеолитические памятники Тувы – Санкт-Петербург: Издательство Нестор-История, 2008. 180 с. – ISBN 9785981872495.

18. *Васильев С.А.* Поздний палеолит Верхнего Енисея (по материалам многослойных стоянок района Майны) диссертация ... доктора исторических наук : 07.00.06 - Археология. СПб: ИИМК РАН, 2008. 528 с.: ил. + Прил.

19. *Нехорошев П.Е.* Новая верхнепалеолитическая стоянка на юге Западной Сибири - Берёзовский разрез 1 / П.Е. Нехорошев // А.В.: Сборник научных трудов в честь 60-летия А.В. Виноградова. – Санкт-Петербург: Редакционно-издательский центр «КУЛЬТ-ИНФОРМ-ПРЕСС», 2007. – С. 7-16.

20. *1.6. Палеолитический человек в предгорьях Саян: стоянка Ирба 2 близ Курагино (Красноярский край) / С.А. Васильев, А.В. Поляков, П.Б. Амзараков [и др.] // Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография. Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 83-102. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-83-102.*
21. *Питулько В.В. 1.7. Гонка со временем: в поисках начального этапа освоения человеком сибирской Арктики / В.В. Питулько // Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография. Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 103-136. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-103-136.*
22. *Место керамического комплекса стоянки Замостье 2 в рамках общей хронологии верхневолжской культуры / Д. Медоуз, В.М. Лозовский, О.В. Лозовская [и др.] // Неолитические культуры Восточной Европы: хронология, палеоэкология, традиции: материалы Международной научной конференции, посвященной 75-летию Виктора Петровича Третьякова, Санкт-Петербург, 12–16 мая 2015 года. – Санкт-Петербург: ООО «Периферия», 2015. – С. 84-91.*
23. *Лозовская О.В. II.1. Торфяниковая стоянка Замостье 2: некоторые итоги и перспективы исследований / О. В. Лозовская // Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография. – Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 139-156. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-139-156.*
24. *К истокам трасологии: Первобытная техника 40 лет спустя: функциональные исследования и русское наследие (Верона, Италия, 20-23 апреля 2005 г.) / Н.Н. Скакун, С.А. Васильев, Г. Плиссон, Э. Клод // Археологические вести. 2010. № 16. – С. 234-243.*
25. *II. 2. современные трасологические исследования в археологии / Н.Н. Скакун, В.В. Терехина, Л. Лонго, И.Е. Пантюхина // Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография. Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 157-165. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-157-165.*
26. *Колпаков Е.М. II.4. Сокровища наскального искусства Российской Арктики / Е.М. Колпаков, В.Я. Шумкин // Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография. Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 171-187. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-171-187.*

27. *Бочкарев В.С.* II. 3. к вопросу о периодизации памятников бронзового века Юга Восточной Европы / В. С. Бочкарев // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография.* Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 166-170. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-166-170.
28. *Теплоухов С.А.* Древние погребения в Минусинском крае // *Материалы по этнографии.* 1927. Т. III, вып. 2. С. 57-112.
29. *Поляков А.В.* Радиоуглеродные даты афанасьевской культуры / А.В. Поляков // *Афанасьевский сборник.* Барнаул: Азбука, 2010. С. 158-171.
30. *Поляков А.В.* Радиоуглеродные даты окуневской культуры / А.В. Поляков // *Записки Института истории материальной культуры.* 2017. № 16. С. 52-74.
31. *Поляков А.В.* II.5. Современная хронология эпохи палеометалла Минусинских котловин / А.В. Поляков, И.П. Лазаретов // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография.* Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 188-202. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-188-202.
32. *Миняев С.С.* II.6. Актуальные проблемы изучения сунну / С.С. Миняев // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография.* Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 203-208. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-203-208.
33. *Горончаровский В.А.* III.1. Семибратнее городище (Лабрис) по данным раскопок боспорской экспедиции ИИМК РАН в 2001-2009 гг / В.А. Горончаровский // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография.* – Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 211-229. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-211-229.
34. *Кашаев С.В.* III.2. Грунтовый некрополь Артющенко-2 (v-II вв. до Н.Э.) / С.В. Кашаев // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография.* Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 230-253. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-230-253.
35. *Виноградов Ю.А.* III.3. Священный участок античного поселения Артющенко-1 / Ю.А. Виноградов // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография.* Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 254-270. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-254-270.

36. *Ш.4. Пальмира во времени и пространстве* / Н.Ф. Соловьева, С.Л. Соловьев, Е.К. Блохин, Э.Э. Казаков // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии)*: Коллективная монография. Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 271-286. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-271-286.
37. *Кирпичников А.Н.* Раннесредневековая Ладога по данным новых историко-археологических исследований / А.Н. Кирпичников // *Древности Поволховья*. СПб: ИИМК РАН, 1997. С. 5-25.
38. *Новое в археологии Старой Ладоги: Материалы и исследования* / Е.Н. Носов, Н.И. Платонова, С.В. Белецкий [и др.]. Санкт-Петербург: Невская Книжная Типография, 2018. – 536 с. (Труды ИИМК РАН, Том. LIII.). – ISBN 9785907053106. – DOI 10.31600/978-5-907053-10-6.
39. *Лапшин В.А.* IV.1. Изучение старой Ладоги: итоги и перспективы / В.А. Лапшин // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии)*: Коллективная монография. Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 289-302. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-289-302.
40. *Носов Е.Н.* IV.2. Рюриково городище – выдающийся археологический памятник Древней Руси / Е.Н. Носов, Н.В. Хвощинская // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии)*: Коллективная монография. Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 303-323. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-303-323.
41. *Еремеев И.И.* IV.3. К вопросу об аграрной скандинавской колонизации в Восточной Европе в раннем средневековье / И.И. Еремеев // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии)*: Коллективная монография. Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 324-347. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-324-347.
42. *Сакса А.И.* IV.4. Выборг - город на перекрестке истории / А.И. Сакса // *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии)*: Коллективная монография. Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 348-378. – DOI 10.31600/978-5-85803-525-1-348-378.

Санкт-Петербургский филиал Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук в 1991-2021 гг.

Н.А. Ащеулова, Е.Ф. Синельникова

В представленном материале дан краткий очерк основных достижений Санкт-Петербургского филиала Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук за последние 30 лет. СПбФ ИИЕТ РАН является одним из ведущих научно-образовательных центров России по исследованию истории науки и техники, социологии науки и науковедения. СПбФ ИИЕТ РАН помимо научно-исследовательской деятельности осуществляет подготовку кадров высшей квалификации на Академической кафедре истории и философии науки, которая предоставляет широкий спектр программ подготовки по истории и философии науки, педагогике, коммуникационным технологиям, иностранным языкам. В состав СПбФ ИИЕТ РАН также входит Музей-квартира известного путешественника и исследователя Центральной Азии П.К. Козлова.

Санкт-Петербургский филиал Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук (СПбФ ИИЕТ РАН) был воссоздан в августе 1953 г. как Ленинградское отделение ИИЕТ (ЛО ИИЕТ АН СССР). Его базой стали 7 небольших историко-научных учреждений, возникших в Ленинграде после перевода в Москву Института истории науки и техники АН СССР (ИИНиТ), организованного Н.И. Бухариным в 1932 г.

Именно от 1932 г. ведет отчет СПбФ ИИЕТ не только как структурное подразделение ИИЕТ, но и как реальный преемник предшествующих академических учреждений, в частности, Комиссии по истории знания АН СССР (КИЗ), основанной в 1921 г. В.И. Вернадским. С КИЗ и ИИНиТ СПбФ ИИЕТ сохранил преемственность не только тематическую и функциональную, но даже кадровую и территориальную. Некоторые сотрудники ЛО ИИЕТ работали еще в КИЗ, а размещались все три учреждения, по существу, в одних и тех же зданиях. Более того, они работали в рамках единой научно-исследовательской программы, истоки которой уходят в XVIII век. В ней сложилась традиция рассматривать историю науки с позиции самого ученого сословия, а также в связи с развитием геополитических, экономических и идеологических интересов государственной власти.

Эти задачи решались разнообразными формами и методами историко-научных исследований. Это обзор и анализ источников; исторические очерки; публикации архивных материалов; биографии ученых; история отдельных учреждений, научных предприятий и отраслей знаний; воспоминания; хронология событий и т.д. Прошлые исследования часто оценивали с учетом их значения для современности, к ним апеллировали для установления истины и приоритета научных открытий. Особый интерес вызывала персонифицированная или антропологическая история науки, в

которой давался анализ эпох и открытий, оценки вклада того или иного ученого в мировую науку. К истории науки обращались для пропаганды научных проектов и демонстрации значения отдельных отраслей знания для страны. Развитие науки, как правило, исследовалось в широком социально-государственном контексте. Когнитивная история реконструировалась с учетом социально-политических и идеологических факторов на основе огромного массива архивного материала.

История науки воспринималась петербургскими историками науки, прежде всего, как диалог ученого сословия с обществом и властью и как способ возможного воздействия на их сознание, а также как саморефлексия и самоидентификация самого научного сообщества. Это определило главные функции историко-научных исследований в Санкт-Петербурге:

- 1) когнитивные – путь к постановке и к лучшему пониманию обсуждаемых проблем и способ доказательств истинности взглядов;
- 2) просветительно-дидактические – пропаганда и просвещение общества;
- 3) конъюнктурные – продвижение интересов ученого сословия;
- 4) идеолого-патриотические – доказательство важности науки как источника экономической и военной мощи государства, показателя его просвещенности, цивилизованности и превосходства над другими странами.

В СПбФ ИИЕТ РАН эта программа успешно реализовалась и продолжает развиваться в рамках различных историко-научных направлениях исследований.

Традиционно большое внимание в СПбФ ИИЕТ РАН уделялось изучению истории Академии наук и научных учреждений. Исследователями истории Академии наук в 1991–2021 гг. были изданы биографии известных ученых: естествоиспытателей И.А. Гильденштедта [1], А.Ф. Миддендорфа [2, 3], гидрографа, метеоролога и педагога Ф.Ф. Врангеля [4], гидрометеоролога М.Н. Рыкачева [5], директора Академии наук княгини Е.Р. Дашковой [6], историка В.И. Ламанского [7] и др. Совместно с Санкт-Петербургским институтом истории Российской академии наук опубликовано пять выпусков серийного издания «Деятели русской науки XIX–XX вв.» [8-12]. В жанре исторических очерков на основе архивных и опубликованных источников в них раскрывались неизвестные страницы жизни, научной, научно-организационной и общественной деятельности отечественных ученых прошедших двух столетий.

300-летию со дня рождения крупнейшего российского историографа, архивиста, путешественника, организатора науки, а также первого российского историка был посвящен сборник «Г.Ф. Миллер и русская культура» [13].

В 2011 г. во всем мире широко отмечалось 300-летие со дня рождения М.В. Ломоносова. С 2008 по 2012 г. велась активная работа по подготовке 2-го дополненного и исправленного издания Полного собрания сочинений М.В. Ломоносова. Ответственными редакторами стали академик Ж.И. Алфёров

(тт. 1–4), д.и.н. В.Г. Смирнов (т. 9) и д.и.н. В.С. Соболев (т. 10). В подготовке этого издания активно работали сотрудники СПбФ ИИЕТ РАН под руководством Э.И. Колчинского. Полному собранию сочинений М.В. Ломоносова в 10 томах [14] были присуждены национальная премия «Лучшие книги и издательства года» (2011), премии Ассоциации книгоиздателей «Лучшая книга года» (2012, 2013). К юбилею М.В. Ломоносова были подготовлены и другие научные издания [15-17].

В 2013 г. отмечалось 150-летие со дня рождения В.И. Вернадского. К юбилейной дате был приурочен выход книги «В.И. Вернадский и Комиссия по истории знаний. К 150-летию со дня рождения В.И. Вернадского» [18].

В 2000–2007 гг. благодаря коллективным усилиям сотрудников СПбФ ИИЕТ РАН были изданы четыре тома «Летописи РАН», охватывающие период 1724–1934 гг. [19]. В этом труде была впервые предпринята попытка изложить день за днем историю Академии наук, отразив ее многообразную деятельность. Ответственными редакторами «Летописи РАН» стали Н.И. Невская (т.1), М.Ф. Хартанович (т. 2 и т. 3), Э.И. Колчинский и Г.И. Смагина (т. 4), главный редактор издания – Президент Российской академии наук Ю.С. Осипов. В 2008 г. «Летопись РАН» стала лауреатом конкурса «Лучшие книги года» по гуманитарным наукам.

Отдельные аспекты истории Академии наук рассматривались в монографиях Г.И. Смагиной [20], М.Ф. Хартанович [19], Е.Ю. Басаргиной [22-24], Т.И. Юсуповой [25, 26], В.С. Соболева [27, 28] и др., а также в ряде коллективных трудов [29-33] и публикаций значимых документальных источников [34-36].

Особое внимание в последние годы научные сотрудники СПбФ ИИЕТ РАН уделяют исследованию проблем институционализации отечественной науки. Этому посвящены монографии А.В. Кольцова [37], Э.И. Колчинского, С.И. Зенкевич, А.И. Ермолаева и др. [38], Е.Ф. Синельниковой и В.С. Соболева [39], Э.И. Колчинского и Е.Ф. Синельниковой [40] и др.

Основными направлениями историко-биологических исследований в СПбФ ИИЕТ РАН являются: изучение деятельности выдающихся биологов, исследование развития естественной истории, генетики, физиологии, молекулярной биологии, экологии и их вклада в развитие эволюционной теории и различных направлений эволюционной биологии; исследование истории эволюционной теории и развития ее основных проблем; разработка научного наследия выдающихся биологов, особенно, в области эволюционного синтеза; методология историко-эволюционных исследований и история природоохранных, экологических и биосферных исследований. Историки биологии СПбФ ИИЕТ РАН активно включились в разработку социальной и институциональной истории биологии, в изучение международных научных связей, а также взаимодействия различных отраслей биологии и практики. Характерной чертой петербургских историков биологии всегда была реконструкция развития

исследований, идей и теорий с учетом социально-политических и идеологических факторов.

Становлению эволюционной теории Ч. Дарвина была посвящена монография Я.М. Галла [41]. Сотрудники Филиала способствовали организации выставок в Дрездене в 1994 г. «Дарвин и дарвинизм». М.Д. Голубовский и Э.И. Колчинский участвовали в подготовке двухтомного издания «Дарвин и К°. История биологии в портретах» [42], вышедшего в свет под руководством одного из наиболее авторитетных современных историков биологии Ильзы Ян.

В 2009 г. мировая научная общественность широко отмечала 200-летие со дня рождения Ч. Дарвина и 150-летию со дня выхода в свет его книги «Происхождение видов». В сентябре 2009 г. СПбФ ИИЕТ РАН, совместно с СПбНЦ РАН, СПбГУ и рядом других научных учреждений Санкт-Петербурга провел юбилейную конференцию, в которой приняли участие свыше 300 человек. По ее материалам был подготовлен сборник под редакцией Э.И. Колчинского [43]. В нём были рассмотрены теоретические и историко-научные проблемы эволюционной биологии, характер и степень влияния идей Ч. Дарвина на развитие науки и общества в XIX–XX вв., а также ключевая роль, которую эволюционная теория продолжает играть в поисках ответов на новые вызовы XXI в. Среди авторов 83 статей более 20 специалистов из Англии, Германии, США, Франции, Канады и других стран.

Вклад отдельных ученых в развитие эволюционной мысли проанализирован в работах Я.М. Галла [44, 45], Э.И. Колчинского [46, 47], М.Б. Конашева [48], К.В. Манойленко [49-53], А.Б. Георгиевского [54] и др. Синтетическая теория эволюции рассматривалась в книге Э.И. Колчинского «Единство эволюционной теории в разделенном мире XX века» [55].

Интенсивно цитируется в отечественной и мировой литературе монография Э.И. Колчинского о неокатастрофизме [56]. Монография Л.Н. Хахиной о симбиогенезе была переведена на английский язык и издана в США [57], стимулировав ряд международных конференций и десятки работ, посвященных вкладу российских ученых в постановку и решение этой проблемы. Интересные и важные проблемы взаимодействия эволюционной теории с генетикой и антропологией, поднимались в книгах А.Д. Георгиевского [58, 59] и М.Д. Голубовского [60]. Актуальным аспектам взаимодействия эволюционной теории и религии посвящена книга М.Б. Конашева [61]. Сотрудниками СПбФ ИИЕТ РАН М.В. Лоскутовой и А.А. Федотовой анализировались сложные вопросы становления прикладных биологических исследований в XIX – начале XX в. [62]. Э.И. Колчинским рассматривались проблемы развития отечественной биологии в 1920–1930-е гг. [63].

Эти книги стали удачными примерами плодотворности анализа сложной, а порою и драматической истории эволюционных идей и концепций в отдельных отраслях биологического знаний.

Итогом многолетней работы большого коллектива исследователей России и других стран стал энциклопедический словарь о трехсотлетней истории биологии в Санкт-Петербурге [64], в который включено более 1000 биографий ученых и около 600 статей о научных учреждениях, обществах, журналах, связанных с изучением различных отраслей медико-биологических и сельскохозяйственных наук.

Сравнительно новым направлением исследований в СПбФ ИИЕТ РАН стала экологическая история. Изучением взаимодействия человека и природы в исторической перспективе активно занимается А.А. Федотова. Ее монография, написанная, с зарубежными соавторами на английском языке, посвящена истории одного из самых известных древних лесов Европы – Беловежской пушце. В книге анализируется антропогенное воздействие на этот уникальный природный объект на протяжении XIX века [65].

С 2009 г. СПбФ ИИЕТ выпускает журнал «Историко-биологические исследования», статьи в котором публикуются на английском и русском языках. В 2015 г. журнал был включен в список изданий ВАК.

Закреплению истории античной науки среди основных направлений исследований СПбФ ИИЕТ РАН способствовал выход фундаментальной монографии Л.Я. Жмудя о философии, религии и науке в раннем пифагореизме (1994) [66], которая в дополненном и исправленном виде была издана в 1997 г. на немецком языке. Новаторский характер носила и его книга «Зарождение истории науки в античности» [67], переведенная на английский язык и изданная в Берлине в 2006 г. В ней анализируется зарождение и развитие историографии науки от самых ранних поисков первооткрывателей до появления в школе Аристотеля первых историко-научных трудов (IV в. до н. э). Среди сквозных тем исследования — античная философия и методология науки, в частности, теории науки софистов, Платона и Аристотеля, перипатетическая история философии и медицины, взгляды на научный прогресс, взаимоотношение науки и философии в античный период, преемственность между античной и новоевропейской историографиями науки. Публикация таких работ всегда становилась большим научным событием.

В 2012 г. вышла на русском и английском языках книга Л.Я. Жмудя «Пифагор и ранние пифагорейцы» [68], в которой индивидуальный портрет Пифагора, изображаемого обычно мудрым учителем, выдающимся математиком, этическим реформатором и даже чудотворцем, дан на фоне коллективного портрета пифагорейцев для того, чтобы они дополняли и корректировали друг друга.

Внутри этого направления исследований особый вектор развивает Д.А. Щеглов, изучая историю античной географии.

Обращение к истокам европейской науки и к извечным проблемам ее истории, бесспорно, позволяет глубже понять ее развитие в более поздние периоды.

Общая история технических наук и методологические проблемы истории научно-технического знания разрабатывались группой ученых, до 2019 г. под научным руководством Б.И. Иванова. Они исследовали также вопросы технического образования в Санкт-Петербурге, историографию научного и технического знания, историю оборонных организаций и предприятий Санкт-Петербурга, историю развития электротехники в Санкт-Петербурге. Были изданы обобщающие книги: «Формула приоритета. Возникновение и развитие авторского и патентного права» [69], «История развития электротехники в Санкт-Петербурге» [70]. В последней исследуется развитие электротехники в городе на Неве, начиная с опытов М.В. Ломоносова и Г.В. Рихмана (XVIII в.) и заканчивая работами современных петербургских ученых в области электроники. Наряду с историческими сюжетами приводятся и технические сведения о принципах действия электротехнических устройств.

Под редакцией профессора Ю.Ф. Тарасюка вышли «Очерки истории технических наук в Санкт-Петербурге (XVIII–XIX вв.)» [71], в которых основное внимание уделено истории возникновения и развития технического образования и технических наук до 1917 г. Кроме того, в ней помещен краткий обзор истории промышленности и промышленной политики этого времени и истории издательской деятельности.

Санкт-Петербург служил местом взаимопроникновения различных культур, в том числе научно-технической, контактов с мировым сообществом. Долгие годы, являясь президентом Ассоциации естественнонаучных и научно-технических музеев Санкт-Петербурга и Ленинградской области, Б.И. Иванов вел активную работу в области охраны памятников науки и техники Санкт-Петербурга и координации деятельности этих музеев.

Одним из ведущих направлений исследований в СПбФ ИИЕТ РАН последние 30 лет являются социолого-научковедческие исследования. Под руководством заслуженного деятеля науки РФ, профессора С.А. Кугеля (1924-2015) социолого-научковедческие исследования фокусировались на проблемах реформирования, трансформации российской науки и адаптации ученых к изменяющимся социально-экономическим условиям. Было проведено несколько значимых исследований: «Изучение общественного мнения о науке» (1990), «Миграция ученых» (1993), «Интеллектуальная элита Санкт-Петербурга» (1993–1994), «Разработка мероприятий для усиления ориентации молодежи на научно-техническую деятельность и создание для нее благоприятных условий» (1995), «Реформирование высшей школы: государственные и негосударственные вузы» (1998), «Трансформация академической науки» (1999–2001) и т.д., по итогам которых опубликованы статьи и сборники.

Под руководством С.А. Кугеля проведены крупные всероссийские и международные научные конференции: «Роль фундаментальных социологических исследований в преподавании гуманитарных дисциплин и становлении в России гражданского общества» (21–23 июня 1999 г., Санкт-Петербург), «Науковедение и организация научных исследований в России в переходный период» (9–11 октября 2001 г., Санкт-Петербург).

Ежегодно группа исследователей проводила социологический мониторинг деятельности учреждений СПбНЦ РАН, исследовался научный потенциал Санкт-Петербурга, общественное мнение и быт ученых, их мобильность, динамика научных кадров, механизмов формирования научных школ и научной элиты. В последние годы эти социолого-научоведческие исследования сконцентрировались на проблемах реформирования российской науки, международного научно-технологического сотрудничества, мобильности ученых, подготовки специалистов для исследовательской деятельности и сравнительному анализу мировых практик научно-технологической политики [72, 73].

В рамках изучения современной исследовательской миграции, международного опыта сетевой коллаборации, значения мобильности для национальных систем подготовки интеллектуальной элиты в 2014 г. вышла в свет монография «Мобильная наука в глобальном мире» [74].

В начале 1990-х гг. С.А. Кугель, уделяя большое внимание кадровой подготовке социологов науки, основал Международную школу социологии науки и техники. Школа сегодня носит имя Самуила Ароновича Кугеля и ежегодно собирает исследователей из многих регионов России. Школа привлекает известных ученых из-за рубежа. Проведено более 30 сессий школы, посвященных актуальным проблемам социологии науки и технологий.

Важным фактором консолидации и развития социолого-научоведческой школы С.А. Кугеля протяжении почти полувека служил ежегодник «Проблемы деятельности ученого и научных коллективов». В его выпусках представлены результаты практической работы социологов СПбФ ИИЕТ РАН, данные эмпирических исследований, материалы конференций, семинаров, симпозиумов, а также материалы ежегодных сессий Международной школы социологии науки и техники. Значимым шагом для институционализации школы стала организация в 2010 г. журнала «Социология науки и технологий», выпускаемого на русском и английских языках. Журнал быстро приобрел авторитет и в 2015 г. был включен в список изданий ВАК, а в настоящее время индексируется в *Web of Science*.

Мемориальный музей-квартира путешественника-исследователя Центральной Азии П.К. Козлова (1863–1935) был создан в конце 1988 г. решением Ленгорисполкома при Ленинградском отделе ИИЕТ АН. Инициатива создания музея принадлежала ряду организаций и отдельным ученым (академикам Е.М. Лавренко,

А.П. Окладникову, А.Л. Яншину и др.). Музей располагается в квартире, где путешественник жил с 1912 по 1935 г. В 1989–1996 гг. музей возглавляла Светлана Алексеевна Калядина, затем до 2002 г. – Владимир Андреевич Росов. На протяжении ряда лет музеем руководил д.и.н. А.И. Андреев. 4 декабря 2002 г. состоялось открытие экспозиции первого в Петербурге мемориального музея путешественника для широкой публики.

Основные направления деятельности музея: изучение, сохранение, накопление и популяризация материалов, связанных с научной и экспедиционной деятельностью П.К. Козлова; изучение истории исследования Центральной Азии российскими научными экспедициями конца XIX — начала XX в. Коллекция основного фонда Музея рассматривается как национальное достояние и составная часть Музейного фонда РФ. Экспозиционное пространство музея-квартиры включает в себя рабочий кабинет П.К. Козлова, зал, посвященный истории российских экспедиций в Центральную Азию, Тибетскую комнату с экспозицией, рассказывающей о традиционной буддийской культуре, о российских путешественниках и ученых-тибетологах.

Сотрудники активно участвуют в изучении истории российских экспедиций в Центральную Азию, прежде всего экспедиций самого П.К. Козлова [75].

Наиболее важным результатом изучения деятельности П.К. Козлова является публикация в серии «Научное наследство» его дневников, которые ученый вел практически ежедневно на протяжении всей Монголо-Тибетской экспедиции 1923–1926 гг. (ред.-сост. Т.И. Юсупова, сост. А.И. Андреев) [76]. Эти записи содержат не только сведения об обширной научно-исследовательской деятельности экспедиции – географические и ландшафтные описания местности, характеристики флоры и фауны, метеорологические наблюдения, этнографические заметки, описание археологических раскопок в ноинулинских курганах (Монголия) и городище Хара-Хото (Китай), но и заметки политического и социально-бытового характера о Монголии, Китае, Тибете, а также описания встреч П.К. Козлова с советскими и монгольскими государственными деятелями, руководителями РАН и Монгольского ученого комитета. Кроме того, благодаря усилиям Т.И. Юсуповой, А.И. Андреева и Т.Ю. Гнатюк были изданы дневники Монголо-Сычуаньской экспедиции П.К. Козлова [77].

Исследования по истории российских экспедиций в Центральную Азию в 1870–е – 1920-е гг. были обобщены в сборнике статей, вышедшем в 2013 [78]. Большое научное значение имеет также сборник биографических очерков выдающихся русских исследователей Внутренней Азии конца XIX – начала XX века, Н.М. Пржевальского, В.И. Роборовского, М.В. Певцова, П.К. Козлова, Г.Е. Грумм-Гржимайло и Б.Л. Громбчевского, изданные на английском языке в соавторстве А.И. Андреевым, М.К. Басхановым и Т.Ю. Юсуповой в 2018 г. [79].

Сложным и актуальным вопросам взаимосвязи науки, религии и геополитики посвящены монографии А.И. Андреева [80, 81].

История исследования Центральной Азии отражена также в книгах «От Байкала до священной Лхасы. Новые материалы о русских экспедициях в Центральную Азию в первой половине XX в. (Бурятия, Монголия, Тибет)» [82] и «Тибет в самых ранних фотографиях русских путешественников» [83].

Результатом разработки архива музея стал сборник «Среди людей и птиц. Орнитолог и путешественница Е.В. Козлова (1892–1975)» (сост. А.И. Андреев, Т.Ю. Гнатюк) [84].

В 2013 г. широко отмечалось 150 лет со дня рождения П.К. Козлова. Доклады, прозвучавшие на приуроченной к этой дате конференции «Российское изучение Центральной Азии: исторические и современные аспекты», были опубликованы в сборнике материалов конференции [85]. Главными организаторами празднования выступали СПбФ ИИЕТ РАН и Русское географическое общество.

Одним из важных направлений исследований последних трех десятилетий было изучение международных научных контактов: русско-немецких, русско-французских, русско-американских, русско-китайских, русско-монгольских, русско-сербских, русско-швейцарских и др. Результаты компаративистских исследований изложены в целом ряде изданий [86-95], среди которых следует особо отметить серию «Немцы в России». Озаглавленные таким образом сборники выходили в свет с 1998 г. и до настоящего времени. Ответственным редактором с 1999 г. бесценно выступает Г.И. Смагина.

Важную роль в выработке общего языка методологии историко-научных исследований сыграла серия российско-американских конференций, проведенных в 1994-1998 гг. в Санкт-Петербурге и Филадельфии, а также конференции с историками науки Германии (1999–2003, 2010–2014), Китая (2003, 2005, 2009–2013), Японии (2004–2005, 2010–2012), Франции (2010–2012), Сербии, (2008–2009) г. и др. Их материалы, как правило, публиковались в специальных сборниках, в которых особое внимание уделялось связям биологов России с учеными Германии и Франции.

С 1996 г. сотрудники СПбФ ИИЕТ РАН ежегодно участвуют в русско-немецких конференциях в Галле в Германии, посвященных истории изучения Сибири в XVIII веке. Они способствовали подготовке выставок в Дрездене «Дарвин и дарвинизм» (1994) и в Галле «Великая Северная экспедиция» (1996), также проведению юбилейных мероприятий в связи с 300-летием со дня рождения Г.В. Стеллера в Виндсхайме, Галле и Санкт-Петербурге.

Крупные проекты по социальной, институциональной и когнитивной истории были реализованы с учеными Великобритании, Германии и США; в результате были опубликованы коллективные монографии [96, 97].

Плодотворное международное сотрудничество СПбФ ИИЕТ РАН с ведущими мировыми центрами истории науки не только выражалось в проведении совместных исследований и издании трудов, но также и в посещении института ведущими историками науки – мировыми лидерами этого научного направления. Так, в частности, в 2016 г. институт посещал заслуженный профессор Лорен Грэхэм (Массачусетский технологический институт), в 2017 г. профессор Джозеф Брэдли (Университет Талсы) и др. Кроме того, на заседаниях Ученого совета СПбФ ИИЕТ РАН не редки иностранные гости, выступающие с научными докладами, презентациями книг: в 2013 г. – Стивен Уэйнрайт и Клэр Уильямс (Брунельский университет, Лондон, Великобритания); в 2014 г. Линда Лючия Лубрано (Американский университет, США); в 2015 г. – Дэниел Тодес (Университет Джона Хопкинса, США); в 2016 и 2019 гг. Хироши Ичикава (Университет Хиросимы, Япония); в 2016 г. – Дуглас Винер (Университет Аризоны, США); в 2017 г. Петер Муурсеп (Таллинский университет, Эстония), Жером Пьерель (Университет Бордо, Франция); в 2019 г. – А.А. Бабаев (Институт математики и механики НАН Азербайджана); в 2020 г. – Виктор Пал (Университет Хельсинки, Финляндия) и др.

Многолетнее сотрудничество связывает российских и китайских историков науки, поэтому в стенах СПбФ ИИЕТ РАН довольно часто проходили встречи с делегациями ученых из различных научных учреждений КНР. Ученые из этой страны неоднократно проходили стажировку в институте. В частности, в 2010/2011 гг. на стажировке в СПбФ ИИЕТ РАН была Ян Ай Хауа из Оборонного научно-технического университета Народно-освободительной армии Китая, в 2017/2018 гг. – профессор Институт иностранных языков Ланьчжоуского университета Хань Ли. Сотрудники СПбФ ИИЕТ РАН также проходили долгосрочные стажировки в КНР, в частности, в Институте истории естествознания и техники Китайской академии наук (в 2015/2016 гг. – Т.Ю. Феклова; в 2017/2018 гг. – Т.Ю. Феклова и Д.Н. Савельева). За последние 30 лет также неоднократно проходили двусторонние научные конференции в России и Китае. Результаты совместных исследований были отражены в монографических публикациях [98, 99].

СПбФ ИИЕТ РАН ежегодно организует и проводит различные конференции. С 1966 г. проходит ежегодная Международная научная годичная конференция Санкт-Петербургского отделения Российского национального комитета по истории и философии науки и техники Российской академии наук (до 1991 г. Ленинградского отделения Советского национального объединения истории и философии науки и техники), а с 1971 г. по итогам конференции выпускается сборник трудов «Наука и техники: вопросы истории и теории». Кроме того, за последние несколько лет были проведены важные международные научные мероприятия на базе СПбФ ИИЕТ РАН, в частности, в 2017 – ISA Interim Workshop RC23 «Using Science Policy to Facilitate Innovation, Excellence and Global Cooperation»; в 2018 г. – The 2nd Workshop for

International Cooperative Project “Analyzing Historic Photographs of Foreign Expeditions and Missionaries to Mongolia” (2-й Международный семинар «Образ Монголии в фотографиях научных экспедиций и миссионеров, 1860-1930») в рамках Международного проекта Японского общества продвижения науки MEXT/JSPS № 17H00897; в 2019 г. – Международная конференция «Гумбольдт в России», посвященная двойному юбилею: 250-летию со дня рождения Александра фон Гумбольдта и 190-летию со времени его экспедиции по России; в 2020 г. был организован Научный семинар «Diplomatic Studies of Science in Germany and Russia», в рамках договора о сотрудничестве между СПбФ ИИЕТ РАН и Техническим университетом Берлина (Германия).

Традиционно в СПбФ ИИЕТ РАН большое внимание уделяется подготовке научных кадров. Решением Ученого совета СПбФ ИИЕТ РАН в мае 2016 г. в институте была создана Академическая кафедра истории и философии науки. Коллектив кафедры возглавляет д.филос.н. В.Н. Мангасарян. На кафедре проходят обучение аспиранты не только СПбФ ИИЕТ РАН, но и других академических институтов, а также сотрудники вузов и исследовательских институтов по дополнительным профессиональным программам повышения квалификации: иностранным языкам, истории и философии науки, педагогике высшей школы, информационно-коммуникационным технологиям в образовании и науке и др.

Подводя итог последних тридцати лет деятельности СПбФ ИИЕТ РАН, можно отметить, что, несмотря на все перипетии научной политики, реорганизациям и реформам РАН, историкам, философам и социологам науки, объединенным в институте, удалось сохранить себя как неотъемлемую часть мировой науки, сохранить и приумножить традиции, заложенные предшествующими поколениями ученых. Их трудом введено в научный оборот огромное количество ранее неизвестных архивных материалов, возвращены многие забытые имена, раскрыта роль научного сообщества Санкт-Петербурга в развитии мировой науки и культуры. Нельзя не отметить, перманентный рост продуктивности научных исследований благодаря включению в международные проекты, усложнению социальных сетей и мобилизации мировых интеллектуальных ресурсов.

Литература

1. *Копелевич Ю.Х.* Иоганн Антон Гильденштедт (1745–1781). М.: Наука, 1997. 127 с.
2. *Сухова Н.Г., Таммиксаар Э.* Александр Федорович Миддендорф, 1813–1894. М.: Наука, 2005. 330 с.
3. *Сухова Н.Г., Таммиксаар Э.* Александр Федорович Миддендорф: к двухсотлетию со дня рождения. СПб.: Нестор-История, 2015. 380 с.
4. *Смирнов В.Г.* Неизвестный Врангель. СПб.: Гидрометеиздат, 2006. 362 с.

5. *Смирнов В.Г.* Академик М.А. Рыкачев и развитие геофизики в России. СПб.: Нестор-История, 2014. 603 с.
6. *Смагина Г.И.* Сподвижница Великой Екатерины: очерки о жизни и деятельности директора Петербургской Академии наук княгини Екатерины Романовны Дашковой. СПб.: Росток, 2006. 359 с.
7. *Куприянов В.А., Малинов А.В.* Академик В. И. Ламанский. Материалы к биографии и научной деятельности. СПб.: Дмитрий Буланин, 2020. 560 с.
8. Деятели русской науки XIX–XX веков. Вып. 1. / сост. Т.В. Андреева, М.Ф. Хартанович. СПб.: Дмитрий Буланин, 2000. 411 с.
9. Деятели русской науки XIX–XX вв.: коллективная монография. Вып. 2 / Ред.-сост. М.Ф. Хартанович, Т.В. Андреева. СПб.: Нестор-История, 2000. 414 с.
10. Деятели русской науки XIX–XX вв.: коллективная монография. Вып. 3 / Ред.-сост. М.Ф. Хартанович, Т.В. Андреева. СПб.: Дмитрий Буланин, 2003. 507 с.
11. Деятели русской науки XIX–XX вв.: коллективная монография. Вып. 4 / Ред.-сост. М.Ф. Хартанович, Т.В. Андреева. СПб.: Нестор-История, 2008. 782 с.
12. Деятели русской науки XIX–XX вв.: коллективная монография / [Ред.-сост. Т.В. Андреева, Е.Ф. Синельникова]. [Вып. 5]. СПб.: Дмитрий Буланин, 2018. 304 с.
13. Г.Ф. Миллер и русская культура / Отв. ред. Г.И. Смагина и Д. Дальманн. СПб.: Росток, 2007. 512 с.
14. *Ломоносов М.В.* Полное собрание сочинений. 2-е изд., испр. и доп. В 10 т. СПб.: Наука, 2011-2012.
15. Ломоносов. Краткий энциклопедический словарь / Сост. Э.П. Карпеев. М.: ОГИ, 2009. 480 с.
16. Ломоносов. Сб. статей и материалов. Вып. X / Отв. ред. Г.Ф. Терещенко и Э.И. Колчинский. Ред.-сост. Г.И. Смагина и Т.М. Моисеева. СПб.: Наука, 2011. 467 с.
17. *Смагина Г.И.* Княгиня и ученый: Е.Р. Дашкова и М.В. Ломоносов. СПб.: Росток, 2011. 415 с.
18. В.И. Вернадский и Комиссия по истории знаний. К 150-летию со дня рождения В.И. Вернадского / Отв. ред. Ю.М. Батулин. Ред.-сост. В.М. Орёл, Г.И. Смагина. М.; СПб.: Росток, 2013. 605 с.
19. Летопись Российской академии наук. Т. I. 1724–1802; Т. II. 1803–1860; Т. III. 1861–1900; Т. IV. 1901–1934. СПб.: Наука, 2000–2007.
20. *Смагина Г.И.* Академия наук и российская школа: Вторая половина XVIII в. СПб.: Наука, 1996. 164 с.
21. *Хартанович М.Ф.* Ученое сословие России: Императорская Академия наук второй четверти XIX в. СПб.: Наука. 1999. 222 с.
22. *Басаргина Е.Ю.* Русский археологический институт в Константинополе (очерки истории). СПб.: Дмитрий Буланин, 1999. 243 с.

23. *Басаргина Е.Ю.* Вице-президент Императорской Академии наук П.В. Никитин. Из истории русской науки (1867–1916). СПб.: Нестор-История, 2004. 468 с.
24. *Басаргина Е.Ю.* Императорская Академия наук на рубеже XIX–XX веков. Очерки истории. М.: Индрик, 2008. 655 с.
25. *Юсупова Т.И.* Монгольская комиссия Академии наук. История создания и деятельности (1925–1953 гг.). СПб.: Нестор-История, 2006. 280 с.
26. *Юсупова Т.И.* Советско-монгольское научное сотрудничество: становление, развитие и основные результаты (1921–1961). СПб.: Нестор-История, 2018. 312 с.
27. *Соболев В.С.* «Нести священное бремя прошедшего...»: Российская Академия наук и национальное культурное наследие. 1880–1930. СПб.: Нестор-История, 2012. 378 с.
28. *Соболев В.С.* Во главе первого ученого общества империи: нормативно-правовые основы деятельности президентов РАН. 1725–1917 гг. СПб.: Нестор-История, 2015. 184 с.
29. Во главе первенствующего сословия: Очерки жизни и деятельности президентов Императорской Санкт-Петербургской Академии наук. 1725–1917 / Отв. ред. Э.И. Колчинский. Науч. ред. и сост. В.С. Соболев. СПб.: Наука, 2000. 206 с.
30. Академическая наука в Санкт-Петербурге в XVIII–XX веках. Исторические очерки / Отв. ред. Ж.И. Алфёров. Сост. Э.И. Колчинский и Э.А. Тропп. СПб.: Наука, 2003. 605 с.
31. Академия наук в истории культуры России XVIII–XX вв. / Отв. ред. акад. Ж.И. Алфёров. Ред.-сост. Э.А. Тропп и Г.И. Смагина. СПб.: Наука, 2010. 707 с.
32. Комиссии Академии наук в XVIII–XX веках: Исторические очерки / Отв. ред. Ю.М. Батулин; ред.-сост. Г.И. Смагина, Э.А. Тропп. СПб.: Нестор-История, 2013. 732 с.
33. «Науки производить и совершить». Из истории Российской академии наук / Отв. ред. Н.А. Ащеулова. СПб.: СПбФ ИИЕТ РАН, 2019. 164 с.
34. Комиссия по истории знаний. 1921–1932: Из истории организации историко-научных исследований в Академии наук. Сб. документов / Сост. В.М. Орёл и Г.И. Смагина. Авт. вступит. статьи В.М. Орёл, Г.И. Смагина, И.В. Черказьянова (имен. указ.) и Т.В. Чумакова. СПб.: Наука, 2003. 766 с.
35. Судьба проекта «Русская наука». 1916–1920 (К 100-летию Комиссии по изданию сборника «Русская наука»): Статьи и документы / Отв. ред. чл.-корр. РАН Ю.М. Батулин; ред.-сост. В.М. Орёл, Г.И. Смагина. СПб.; М.: Изд-во «Перо», 2016. 848 с.
36. *Смагина Г.И.* «Познать науку исторически...»: российская история науки в первые десятилетия XX века / Отв. ред. чл.-корр. РАН Ю.М. Батулин, СПб.: Росток, 2020. 672 с.

37. *Кольцов А.В.* Ленинградские учреждения Академии наук СССР в 1934–1945 гг. / Отв. ред. Э.И. Колчинский. СПб.: Наука, 1997. 192 с.
38. *Колчинский Э.И., Зенкевич С.И., Ермолаев А.И. и др.* Мобилизация и реорганизация российской науки и образования в годы Первой мировой войны / Под общ. Ред. Э.И. Колчинского. СПб.: Нестор-История, 2018. 672 с.
39. *Синельникова Е.Ф., Соболев В.С.* Санкт-Петербургское философское общество (1897–1923). СПб.: Дмитрий Буланин, 2020. 208 с.
40. *Колчинский Э.И., Синельникова Е.Ф.* Самоорганизация российской науки в годы кризиса: 1917–1922. СПб.: Скифия-принт, 2020. 276 с.
41. *Галл Я.М.* Становление эволюционной теории Чарльза Дарвина. СПб.: Наука, 1993. 139 с.
42. Darwin and Co. Eine Geschichte der Biologie in Portraits / Hrsg. I. Jahn, M. Schmitt. München, 2001. Bd. 1–2.
43. Чарльз Дарвин и современная биология. Труды Международной научной конференции (21-23 сентября 2009 г., Санкт-Петербург) / Отв. ред. Э.И. Колчинский, ред.-сост. А.А. Федотова. СПб.: Нестор-История, 2010. 820 с.
44. *Галл Я.М.* Г.Ф. Гаузе: эколог и эволюционист / Отв. ред. А.Б. Георгиевский. СПб.: Альманах, 1997. 160 с.
45. *Галл Я.М.* Георгий Францевич Гаузе (1910–1986). Научная биография. СПб.: Нестор-История, 2012. 215 с.
46. *Колчинский Э.И.* Эрнст Майр и современный эволюционный синтез. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 147 с.
47. *Колчинский Э.И.* Кирилл Михайлович Завадский. 1910–1977 / Отв. ред. К.В. Манойленко. СПб.: Нестор-История, 2013. 300 с.
48. *Конашев М.Б.* Становление эволюционной теории Ф.Г. Добржанского. СПб.: Нестор-История, 2011. 180 с.
49. *Манойленко К.В.* В.Н. Любименко: Эволюционные, эколого-физиологические, историко-научные аспекты деятельности / Отв. ред. А.Б. Георгиевский. СПб.: Наука, 1996. 162 с.
50. *Манойленко К.В.* Николай Александрович Максимов. 1880–1952 / Отв. ред. А.Б. Георгиевский. М.: Наука, 1999. 179 с.
51. *Манойленко К.В.* Иван Парфеньевич Бородин. 1847–1930 / Отв. ред. Э.И. Колчинский. М.: Наука, 2005. 274 с.
52. *Манойленко К.В.* Николай Иванович Железнов. 1816–1877. М.: Наука, 2007. 246 с.
53. Манойленко К.В. Андрей Сергеевич Фаминцын / Отв. ред. Э.И. Колчинский. СПб.: Нестор-История, 2016. 288 с.
54. *Георгиевский А.Б.* Эволюционное творчество Л.С. Берга. СПб.: Нестор-История, 2013. 108 с.

55. *Колчинский Э.И.* Единство эволюционной теории в разделенном мире XX века. СПб.: Нестор-История, 2014. 824 с.
56. *Колчинский Э.И.* Неокатастрофизм и селекционизм: Вечная дилемма или возможность синтеза? (Историко-критические очерки). СПб.: Наука, 2002. 554 с.
57. *Khakhina L.N.* Concepts of symbiogenesis: A historical and cultural study of the research of Russian botanists / Ed. L. Margulis and M. McMenamin. Transl. by S. Merkel and R. Coalson. With an app. on I.E. Wallin by D.S. Mehos. New Haven, London: Yale Univ. Press, 1992. 177 p. (A Russian and Western history of symbiosis as an evolutionary mechanism. Т. XXX).
58. *Георгиевский А.Б.* Эволюционная антропология (историко-научное исследование). СПб.: Нестор-История, 2009. 255 с.
59. *Георгиевский А.Б.* Занимательная антропология. М.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 228 с.
60. *Голубовский М.Д.* Век генетики: эволюция идей и понятий. СПб.: СПбФ ИИЕТ РАН, 2000 262 с.
61. *Конашев М.Б.* Эволюционисты и религия. СПб.: Нестор-История, 2012. 200 с.
62. *Лоскутова М.В., Федотова А.А.* Становление прикладных биологических исследований в России: взаимодействие науки и практики в XIX – начале XX вв. Исторические очерки / Отв. ред. Э.И. Колчинский. СПб.: Нестор-История, 2014. 220 с.
63. *Колчинский Э.И.* В поисках советского «союза» философии и биологии (дискуссии и репрессии в 20-е – начале 30-х гг.). СПб.: Дмитрий Буланин, 1999. 273 с.
64. Биология в Санкт-Петербурге. 1703–2008. Энциклопедический словарь / Отв. ред. Э.И. Колчинский. Ред.-сост. Э.И. Колчинский, А.А. Федотова. СПб.: Нестор-История, 2011. 566 с.
65. *Samojlik T., Fedotova A., Daszkiewicz P., Ian D.* Rotherham. Białowieża Forest in the Nineteenth Century: Nature and Culture. Springer (Environmental history series) 2020. XV, 223 p.
66. *Жмудь Л.Я.* Наука, философия и религия в раннем пифагореизме. СПб.: Алетейя, 1994. 376 с.
67. *Жмудь Л.Я.* Зарождение истории науки в античности. СПб.: РХГИ, 2002. 424 с.
68. *Жмудь Л.Я.* Пифагор и ранние пифагорейцы. М.: Ун-т Дмитрия Пожарского, 2012. 445 с.
69. *Вишневецкий Л.М., Иванов Б.И., Левин Л.Г.* Формула приоритета: возникновение и развитие авторского и патентного права. Л.: Наука, 1990. 208 с.
70. *Иванов Б.И., Вишневецкий Л.М., Левин Л.Г.* История развития электротехники в Санкт-Петербурге / Отв. ред. И.А. Глебов. СПб.: Наука, 2001. 203 с.
71. Очерки истории технических наук в Санкт-Петербурге (XVIII–XIX вв.) / Отв. ред. Ю.Ф. Тарасюк. СПб.: Нестор-История, 2009. 435 с.

72. Душина С.А., Куприянов В.А., Хватова Т.Ю. Ученые в сетях «открытой науки». СПб.: Политехника сервис, 2019. 200 с.
73. (Re)searching Scientific Careers. Ed. By Katarina Prpić, Inge van der Weijden and Nadia Asheulova. SPb.: Publishing House “Nestor-Historia”, 2014. 268 p.
74. Ащеулова Н.А., Душина С.А. Мобильная наука в глобальном мире / Ред. В.М. Ломовицкая. СПб.: Нестор-История, 2014. 224 с.
75. Юсупова Т.И. Путешествие как образ жизни: исследователь Центральной Азии П.К. Козлов. СПб.: Нестор-История, 2016. 164 с.
76. Козлов П.К. Дневники Монголо-Тибетской экспедиции. 1923-1926 / Ред.-сост. Т.И. Юсупова, сост. А.И. Андреев; отв. ред. А.В. Постников. СПб.: Наука, 2003. 1039 с.
77. Козлов П.К. Дневники Монголо-Сычуаньской экспедиции, 1907-1909 / Ред.-сост. Т.И. Юсупова, сост. Т.Ю. Гнатюк; отв. ред. А.И. Андреев. СПб.: Нестор-История, 2015. 424 с.
78. Российские экспедиции в Центральную Азию: Организация, полевые исследования, коллекции. 1870-1920-е гг.: Сборник статей / Под ред. А.И. Андреева. СПб.: Нестор-История, 2013. 332 с.
79. Andreyev A., Baskhanov M., Yusupova T. The Quest for Forbidden Lands: Nikolai Przhevalskii and his Followers on Inner Asian Tracks. Leiden; Boston: Brill, 2018. 392 p.
80. Andreyev A. Soviet Russia and Tibet: The Debacle of Secret Diplomacy, 1918–1930s. Leiden; Boston: Brill, 2003. 433 p.
81. Андреев А.И. Тибет в политике царской, советской и постсоветской России. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та; Изд-во А. Терентьева «Нартанг», 2006. 464 с.
82. Андреев А.И. От Байкала до Священной Лхасы: Новые материалы о русских экспедициях в Центральную Азию в первой половине XX в. СПб.; Самара: Агни; Прага, 1997. 336 с.
83. Tibet in the earliest photographs by Russian travelers. 1900–1902 / Ed. by A. Andreyev. New Delhi: Studio Orientalia, 2013. 203 p.
84. Среди людей и птиц. Орнитолог и путешественница Е.В. Козлова (1892–1975) / Отв. ред. А.И. Андреев, ред.-сост. Т.Ю. Гнатюк. СПб.: Нестор-История, 2007. 134 с.
85. Российское изучение Центральной Азии: исторические и современные аспекты (к 150-летию П.К. Козлова) / отв. ред. К.В. Чистяков; ред.-сост. Т.И. Юсупова; ред. Т.Ю. Гнатюк. СПб.: Политехника-сервис, 2014. 408 с.
86. Советско-германские научные связи времени Веймарской республики / Отв. ред. Э.И. Колчинский. Авт. Д.А. Александров, А.Н. Дмитриев, Ю.Х. Копелевич, Б. Ланге, Т.А. Лукина, А.В. Патралов и И. Рихтер. СПб.: Наука, 2001. 367 с.
87. Наука и кризисы: историко-сравнительные очерки / Ред.-сост. Э.И. Колчинский. СПб.: Дмитрий Буланин, 2003. 1040 с.

88. Наука, техника и общество России, и Германии во время Первой мировой войны / Отв. ред. Э.И. Колчинский, Д. Байрау и Ю.А. Лайус. СПб.: Нестор-История, 2007. 504 с.
89. A Distant Accord. Russian-Serbian Links in the Fields of Science, Humanities and Education: the 19th – the first half of the 20th century / eds. A. Petrovich & E. Kolchinsky // Liceum. 2010. Vol. 2010. 197 p.
90. Liberalizing Research in Sciences and Technology. Studies in Science Policy / eds. N. Asheulova, B. Pattnaik, E. Kolchinsky, G. Sandstrom. St. Petersburg: Politechnika, 2010. 681 с.
91. Создатели современного эволюционного синтеза / Ред.-сост. Э.И. Колчинский; ред. А.В. Полевой и С.И. Зенкевич. СПб.: Нестор-История. 2012. 996 с.
92. Эволюционный синтез: границы, перспективы, альтернативы / Отв. ред.-сост. Г. Левит, Э.И. Колчинский, У. Хоссфельд, У. Кучера, Л. Олсон. СПб.: Роза ветров, 2013. 274 с.
93. Dupont J.C., Barbara J.G., Kolchinsky E.I., Loskutova M.V. (dir.) Biologie et médecine en France et en Russie. Histoires croisées (fin XVIIIe-XXe siècle). Paris: Hermann, 2016. 246 p.
94. Thoms U., Sinelnikova E., Arend Ja., Tomsová P., Mádrová K., Hylová P., Zavacká K., Josefovičová M., Kůželová M. Science Overcoming Borders. Praha: Masarykuv ustav a Archiv AV ČR, v. v. i., 2018. 214 p.
95. Science and Society / Ed. J. Birx and E.I. Kolchinsky. SPb.: SPbV IHST RAN, 2000. 274 p.
96. Socio Economic and Technological Innovations: Mechanism and Institutions / eds. Kasturi Mandal, Nadia Asheulova, Svetlana G Kirdina. New Deli: Narosa Publishing House, 2014. 540 p.
97. За «железным занавесом»: Мифы и реалии советской науки / Под ред. М. Хайнеманна, Э.И. Колчинского. СПб.: Дмитрий Буланин, 2002. 527 с.
98. Реформы науки и техники в РФ и КНР: итоги и перспективы Материалы Международного форума «Реформы науки и техники в КНР и РФ: теория и практика», Пекин (КНР), 17-18 октября 2005 г. / Под ред. Н.А. Ащеуловой, Бао Оу, Э.И. Колчинского. СПб.: Нестор-История, 2009. 352 с.
99. Чжан Байчунь, Яо Фан, Чжан Цзючунь, Цзян Лун. Передача Технологий из Советского Союза в Китай в 1949–1966 / Пер.с кит. Е.И. Ганьшиной. Под ред. Бао Оу, Хан Ихуан, Э.И. Колчинского, В.М. Ломовицкой. СПб.: Шаньдунское изд-во «Образование»; Нестор-История, 2010. 230 с.

2.7. ОТДЕЛЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ НАУК

От сельскохозяйственной микробиологии к симбиогенетике

Н.А. Проворов¹, И.А. Тихонович^{1,2}

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии,

² Санкт-Петербургский государственный университет

В 1991–2021 гг. произошло существенное расширение проблематики Всероссийского НИИ сельскохозяйственной микробиологии: от физиологии, экологии и частной генетики почвенных и ассоциированных с растениями микроорганизмов исследователи перешли к разработке симбиогенетики и метагеномики – новых направлений науки о наследственности, связанных с изучением надорганизменных генетических систем. Этот переход открыл возможность для развития симбиотической инженерии – методологии конструирования надвидовых систем сельскохозяйственного и природоохранного назначения, используемых для создания экологически устойчивых систем земледелия и растениеводства.

В 2021 г. ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии отметил знаменательный юбилей: 130 лет назад в Санкт-Петербурге была создана микробиологическая лаборатория, которая впоследствии преобразовалась в одно из крупнейших агробиологических учреждений России. В основе развития ВНИИСХМ лежал синтез идей микробиологии, физиологии растений, почвоведения, а также клеточной биологии и молекулярной генетики. Этот синтез привел к формированию уникальной научной школы симбиогенетики, которая изучает надорганизменные генетические системы и разрабатывает методы конструирования экологически устойчивых агроценозов. Цель нашей статьи – показать логику становления этого направления исследований, понимание которой необходимо для дальнейшего развития фундаментальных и прикладных разработок, связанных с изучением кооперации растений и животных с полезной микрофлорой.

Рождение научной школы

Развитие сельскохозяйственной микробиологии в России началось с организации Бактериологической лаборатории при Департаменте земледелия Министерства земледелия и Государственных имуществ. Эта лаборатория была создана в 1891 г. для борьбы с мышевидными грызунами – вредителями сельского хозяйства и переносчиками опасных инфекций – путем «искусственного распространения среди вредных животных свойственных им повальных болезней».

У истоков лаборатории стояли Б.Л. Исаченко, С.С. Мережковский, Г.А. Надсон и другие выдающиеся отечественные микробиологи. Успешное решение задачи биоконтроля грызунов позволило расширить поле деятельности лаборатории: в 1910-е гг. в ней были начаты работы по микробиологии виноделия и сыроварения. В 1918 г. к этим исследованиям подключился С.П. Костычев, по инициативе которого лаборатория была реорганизована в Отдел бактериологии Сельскохозяйственного Ученого комитета (с 1923 г. – Отдел микробиологии Государственного института опытной агрономии). В 1920-х гг. в Отделе были начаты фундаментальные исследования в области почвенной микробиологии («биодинамики почв»), а затем и микробиологии растений. Последнее направление получило активное развитие после преобразования Отдела во Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, которое состоялось в 1930 г.

Микробиология агроценоза

С самого начала работы Института его проблематика была связана с комплексным изучением процессов формирования систем «микроорганизмы-почва-растения», направленным на создание экологически безопасных методов повышения урожайности растений и плодородия почв. Успешное развитие этой проблематики было основано на глубоком понимании связи почвенной микробиологии и физиологии растений, которое в значительной степени базировалось на научных традициях семьи Костычевых. Отец С.П. Костычева, П.А. Костычев был одним из основоположников почвенной микробиологии: он одним из первых обосновал теорию формирования гумусовых веществ почвы путем микробиологической трансформации растительных остатков [1]. Работая в 1885–1895 гг. в Департаменте земледелия, П.А. Костычев принимал активное участие в создании Бактериологической лаборатории, которая дала начало ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии.

Первые исследования по микробиологии почв базировались на развиваемым С.П. Костычевым представлении о ведущей роли азотфиксирующих и нитрифицирующих бактерий в формировании почвенного плодородия. Об этом свидетельствовало обследование табачных плантаций в Крыму, где С.П. Костычев выявил многочисленные популяции азотобактера [2]. Хотя интенсивное выращивание табака велось на этих плантациях без внесения азотных удобрений, из года в год баланс почвенного азота оставался на высоком уровне, что свидетельствовало об активной фиксации N_2 в почве.

Однако дальнейшие исследования не подтвердили ведущую роль азотобактера в обеспечении азотного баланса почв. В связи с этим все большее внимание стало уделяться роли микроорганизмов в разрушении растительных остатков и образовании гумуса, а также в освобождении почв от ксенобиотиков. Изучение этих

микроорганизмов проводилось под руководством Ю.В. Круглова, возглавившего в 1966 г. лабораторию почвенной микробиологии. Главным выводом, к которому привели работы этой лаборатории, состоит в том, что основой функционирования почвенного сообщества являются не отдельные виды микроорганизмов, а их глубоко интегрированные консорциумы [3]. Они могут быть выделены из почвы, стабильно поддерживаются в лабораторных условиях и используются для создания почвоулучшающих препаратов.

Изучение микробно-растительных отношений получило активное развитие в работах Л.М. Доросинского, который руководил Институтом в 1940–1952 гг. Основное внимание в этих работах было уделено симбиотической азотфиксации, осуществляемой при взаимодействии клубеньковых бактерий и бобовых растений. На основании проведённых исследований Л.М. Доросинский сформулировал положение о тесной связи хозяйской специфичности бактерий с эффективностью симбиоза: наиболее активная фиксация N_2 , обеспечивающая высокую продуктивность бобовых культур, достигается при их инокуляции штаммами, обладающими узкой специфичностью по отношению с растениям-хозяевам [4].

Работы по клубеньковым бактериям были дополнены изучением эндофитных и эпифитных (ризосферных) микроорганизмов, которые были инициированы Ю.М. Возняковской [5] и получили активное развитие в работах О.А. Берестецкого (директор института в 1974–1986 гг.) и Л.В. Кравченко. Эти исследования привели к выводу о том, что циркуляция микроорганизмов в системе «растение-почва» представляет собой основной фактор функциональной интеграции агроценоза, который должен быть положен в основу формирования экологически устойчивых систем земледелия [6].

Надорганизменные генетические системы

Успешное развитие Института было основано на том, что возникновение новых научных направлений органично сочеталось с продолжением начатых ранее исследований и использовало логику их развития. Плодотворность этого подхода можно видеть на примере генетических исследований, становление которых в Институте началось с организации лаборатории генетики и селекции микроорганизмов, которую в 1977 г. возглавил Б.В. Симаров. Основным объектом генетического анализа стали клубеньковые бактерии [7], изучение которых создало основу для комплексного развития генетики симбиоза как целостной биосистемы. Оно было тесно связано с исследованием «симбиотических» генов растений, организованным И.А. Тихоновичем (руководил Институтом в 1986–2017 гг.) в отделе Биотехнологии [8].

Эти работы стали основой для постановки принципиально новых задач, связанных с изучением генетической интеграции организмов в системах симбиоза.

Она явилась предметом нового раздела науки об изменчивости и наследственности – симбиогенетики [9, 10]. В рамках этой дисциплины взаимная дополнительность геномов партнеров [11], рассматривается как условие для образования ими глубоко интегрированных надорганизменных систем наследственности – симбиогеномов и хологеномов.

Развитие симбиогенетики осуществлялось в тесной кооперации ВНИИСХМ и биологического факультета Санкт-Петербургского госуниверситета (СПбГУ). Исторически эта кооперация связана с теорией симбиогенеза, которая была создана в стенах СПбГУ на рубеже XIX и XX веков трудами А.С. Фаминцына [12] и К.С. Мережковского [13]. Хотя строгое обоснование теории симбиогенеза стало возможным лишь в конце XX века, уже в 1900-х годах К.С. Мережковским была дана генетическая аргументация этой теории, которая в значительной степени предвосхитила возникновение симбиогенетики [14].

Практическая значимость подходов симбиогенетики стала очевидной после того, как выяснилось, что многие широко возделываемые сорта бобовых значительно уступают по симбиотической активности своим дикорастущим сородичам [15]. Необходимость восстановления симбиотического потенциала, утраченного сортами интенсивного типа, потребовала организации широкомасштабных работ по координированной селекции растений и микроорганизмов. Она проводилась в тесной кооперации ВНИИСХМ с Всероссийским НИИ генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова и создала основу для направленного конструирования симбиотических систем, в которых микроорганизмы в значительной степени, а иногда и полностью замещают удобрения и средства защиты растений.

В настоящее время разработки в области симбиогенетики проводятся в большинстве подразделений института. В дополнение к микробно-растительным симбиозам все более активно изучается такая важнейшая категория надорганизменных систем наследственности как метагеномы микробных сообществ почвы и внутренней среды растений [16]. К настоящему времени два базовых направления Института – «почвенное» и «симбиотическое» – объединились для изучения феномена генетической интеграции организмов, находящихся на разных уровнях клеточной организации. Важнейшим подходом для решения этой задачи стало развитие эволюционной генетики симбиоза, которое привело к созданию моделей для реконструкции основных этапов симбиогенеза [17], а также алгоритмов для конструирования агрономически ценных микробно-растительных комплексов [18]. В настоящее время эти исследования существенно расширились благодаря использованию методов протеомики, которые позволили создать целостную картину экспрессии генов партнеров в ходе развития симбиоза [19], а также показать возможность прионизации ряда растительных белков, выполняющих жизненно важные, например, запасающие функции [20].

Итак, в основе развития научной программы ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии лежат новые генетические подходы к изучению симбиотических комплексов, образуемых растениями и животными с полезной микрофлорой. В настоящее время в институте осуществляется полный цикл исследований – от изучения клеточной биологии и молекулярной генетики симбиоза, проводимого на самом современном методическом уровне, до разработки технологий производства микробных препаратов, обеспечивающих создание экологических устойчивых систем земледелия и растениеводства.

Литература

1. *Костычев П.А.* Почвоведение. М.: СельхозГИз, 1940. 226 с.
2. *Костычев С.П.* Избранные труды по физиологии и биохимии микроорганизмов. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 3-17.
3. *Круглов Ю.В.* Микробное сообщество почвы: физиологическое разнообразие и методы исследования // *Сельскохозяйственная биология*. 2016. Т. 51. № 1. С. 46-59.
4. *Доросинский Л.М.* Клубеньковые бактерии и нитрагин. Л.: Колос, 1970. 191 с.
5. *Возняковская Ю.М.* Микрофлора растений и урожай. М.: Колос, 1969. 240 с.
6. *Тихонович И.А., Прворов Н.А.* Сельскохозяйственная микробиология – основа экологически устойчивого агропроизводства: фундаментальные и прикладные аспекты // *Сельскохозяйственная биология*. 2011. № 3. С. 3-9.
7. *Симаров Б.В., Аронитам А.А., Новикова Н.И., Шарыпова Л.А., Баженова О.В., Прворов Н.А.* Генетические основы селекции клубеньковых бактерий. Л.: Агропромиздат, 1990. 192 с.
8. *Тихонович И.А., Прворов Н.А.* Симбиозы растений и микроорганизмов: молекулярная генетика агросистем будущего. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2009. 210 с.
9. *Тихонович И.А., Прворов Н.А.* Симбиогенетика микробно-растительных взаимодействий // *Экологическая генетика*. 2003. Т. 1. № 0. С. 36-46.
10. *Тихонович И.А., Прворов Н.А.* Развитие подходов симбиогенетики для изучения изменчивости и наследственности надвидовых систем // *Генетика*. 2012. Т. 48. № 4. С. 437-450.
11. *Тихонович И.А., Андронов Е.Е., Борисов А.Ю., Долгих Е.А., Жернаков А.И., Жуков В.А., Прворов Н.А., Румянцева М.Л., Симаров Б.В.* Принцип дополнительности геномов в расширении адаптационного потенциала растений // *Генетика*. 2015. Т. 51. № 9. С. 973-990.
12. *Фаминцын А.С.* О роли симбиоза в эволюции организмов // *Зап. Импер. акад. наук, физ.-мат. отд. Серия 8*. 1907. Т. 20. № 3. С. 1-14.
13. *Мережковский К.С.* Теория двух плазм как основа симбиогенезиса, нового учения о происхождении организмов. Казань: Типо-литография импер. ун-та, 1909. 102 с.

14. Проворов Н.А. К.С. Мережковский и происхождение эукариотической клетки: 111 лет теории симбиогенеза // Сельскохозяйственная биология. 2016. Т. 51. № 5. С. 746-758.
15. Provorov N.A., Tikhonovich I.A. Genetic resources for improving nitrogen fixation in legume-rhizobia symbiosis // Genet. Res. Crop Evolut. 2003. V. 50. N 1. P. 89-99.
16. Першина Е.В., Кутовая О.В., Козут Б.М., Андронов Е.Е. Основные достижения и перспективы почвенной метагеномики. СПб: Информ-Навигатор, 2017. 288 с.
17. Проворов Н.А., Тихонович И.А., Воробьев Н.И. Симбиоз и симбиогенез. СПб.: Информ-Навигатор, 2018. 464 с.
18. Проворов Н.А., Онищук О.П. Эволюционно-генетические основы симбиотической инженерии растений: мини-обзор // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 3. С. 464-474.
19. Антонец К.С., Онищук О.П., Курчак О.Н., Волков К.В., Лыхолай А.Н., Андреева Е.А., Андронов Е.Е., Пинаев А.Г., Проворов Н.А., Нижников А.А. Протеомный профиль бактерии *Sinorhizobium meliloti* зависит от ее жизненной формы и от вида растения-хозяина // Молекулярная биология. 2018. Т. 52. № 5. С. 898-904.
20. Antonets K.S., Belousov M.V., Sulatskaya A.I., Belousova M.E., Kosolapova A.O, Sulatsky M.I., Andreeva E.A., Zykin P.A., Malovichko Y.V., Shtark O.Y, Lykholay A.N, Volkov K.V., Kuznetsova I.M, Turoverov K.K., Kochetkova E.Y., Bobylev A.G., Usachev K.S., Demidov O.N., Tikhonovich I.A., Nizhnikov A.A. Accumulation of storage proteins in plant seeds is mediated by amyloid formation // PLoS Biology. 2020. V. 18. № 7. Article № e3000564.

Сведения об авторах

- | | |
|--|-------------------------------|
| А Агрузов П.М. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Аладов А.В. – к.ф.-м.н. | НТЦ микроэлектроники РАН |
| Александров Е.Б. – д.ф.-м.н., академик РАН | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Алексенский А.Е. – к.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Андреев В.М. – д.т.н., член-корр. РАН | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Антропова Т.В. – д.х.н. | ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН |
| Арсентьев И.Н. – д.т.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Аруев Н.Н. – д.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Ащеулова Н.А. – к.с.н. | СПбФ ИИЕТ РАН |
| Б Баньковская И.Б. – д.х.н. | ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН |
| Бельков В.В. – д.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Беляев К.Г. – к.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Богданов А.А. – к.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Богуславский О.И. – к.и.н. | ИИМК РАН |
| Брылевский В.И. – к.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Бубнова Р.С. – д.х.н. | ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН |
| Бурков А.Т. – д.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Быков А.М. – д.ф.-м.н., член-корр. РАН | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| В Вавилова Л.С. – к.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Варламов А.В. – к.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Варфоломеев В.И. – к.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Векслер М.И. – д.ф.-м.н., проф. РАН | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Вербицкая Е.М. – к.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Веселов Д.А. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Власов А.С. – к.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Вуль А.Я. – д.ф.-м.н., проф. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Г Галль Н.Р. – д.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Ганичев С.Д. – д.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Голубева О.Ю. – д.х.н. | ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН |
| Горбатюк А.В. – д.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Грехов И.В. – д.ф.-м.н., академик РАН | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Гусаков Е.З. – д.ф.-м.н., проф. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Гусаров В.В. – д.х.н., член-корр. РАН | ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН |
| Гусев В.К. – д.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе |
| Д Данилов И.Г. – к.б.н. | ЗИН РАН |

	Дворников А.Ю. – к.ф.-м.н.	СПбФ ИО РАН
	Дидейкин А.Т. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Донченко В.К. – д.э.н.	НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН
	Дьяченко В.В. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Е	Ерёмин В.К. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Ерёмин И.В. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
З	Забродский А.Г. – д.ф.-м.н., академик РАН	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Закгейм А.Л. – к.т.н.	НТЦ микроэлектроники РАН
	Запасский В.С. – д.ф.-м.н., проф.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Зимин А.В. – д.т.н.	СПбФ ИО РАН
	Зиновьев А.Н. – д.ф.-м.н., проф.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Золотарев В.В.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
И	Иванов П.А. – д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Иванов С.В. – д.ф.-м.н., проф.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Иванов Ю.В. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Иванова А.Г. – к.х.н.	ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН
	Иванчик А.В. – д.ф.-м.н., член-корр. РАН	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Ивченко Е.Л. – д.ф.-м.н., член-корр. РАН	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Ильичёв И.В. – к.х.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
К	Калинина Е.В. – д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Калинова М.В. – к.х.н.	ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН
	Калиновский В.С.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Калюжный Н.А. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Кардо-Сысоев А.Ф. – д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Кондратьев С.А. – д.ф.-м.н.	ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН
	Константинов П.П. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Копытенко Б.А. – д.ф.-м.н., проф.	СПбФ ИЗМИРАН
	Коренев В.Л. – д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Королёв О.А.	ИПТ им. Н.С. Соломенко РАН
	Коротков С.В. – д.т.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Кочина Т.А. – д.х.н.	ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН
	Кручинина И.Ю. – д.т.н.	ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН
	Кузьмин М.В. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Кумзеров Ю.А. – д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Курские Г.С. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Кусраев Ю.Г. – д.ф.-м.н., проф.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Л	Ларионов В.Р. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе

	Лебедев А.А. – д.ф.-м.н., проф.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Лебедев В.В. – д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Лебедев С.П. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Левинштейн М.Е. – д.ф.-м.н., проф.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Лешко А.Ю. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Лундин В.В. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Люблинский А.Г.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Лютецкий А.В. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
М	Малевский Д.А.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Малова Т.И.	СПбФ ИО РАН
	Мальгин И.Г. – д.т.н., проф.	ИПТ им. Н.С. Соломенко РАН
	Мезенцева Л.П. – к.х.н.	ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН
	Мизеров М.Н. – к.ф.-м.н.	НТЦ микроэлектроники РАН
	Микушкин В.М. – д.ф.-м.н., проф.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Минаев В.Б. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Минтаиров С.А. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Митина Д.Д.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Н	Николаев В.И. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Николаев Д.Н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
О	Орлова М.И. – д.б.н.	СПбНЦ РАН
П	Павлов В.В. – д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Парфёнов М.В.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Патров М.И. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Перечёсова А.Д. – к.т.н.	СПбФ ИЗМИРАН
	Писарев Р.В. – д.ф.-м.н., проф.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Пихтин Н.А. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Подоскин А.А. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Прицекер В.И. – к.т.н., доцент	ИПТ им. Н.С. Соломенко РАН
	Проров Н.А. – д.б.н.	ВНИИСХМ
	Прядко А.И. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Пульнев С.А. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Пшенай-Северин Д.А. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Р	Рахлин М.В. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Родин П.Б. – д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Родионов А.А. – д.т.н.	СПбФ ИО РАН
	Родионов М.А. – к.ф.-м.н.	СПбФ ИО РАН
	Романенков Д.А. – к.т.н.	СПбФ ИО РАН

	Румынин В.Г. – д.г.-м.н., член-корр. РАН	ИГЭ РАН
	Румянцев В.А. – д.г.н., академик РАН	СПбНЦ РАН
С	Садчиков Н.А. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Сахаров А.В. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Сахаров Н.В. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Свиридов С.И. – д.х.н.	ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН
	Седова И.В. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Синёв С.Ю. – д.б.н.	ЗИН РАН
	Синельникова Е.Ф. – к.и.н.	СПбФ ИИЕТ РАН
	Слипченко С.О. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Смирнова И.А.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Соколова З.Н. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Сорокин С.В. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Степанов А.В. – д.ф.-м.н., член-корр. РАН	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Столярова В.Л. – д.х.н., член-корр. РАН	ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН
	Сычёва Г.А. – к.х.н.	ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН
Т	Тарасенко С.А. – д.ф.-м.н., проф. РАН	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Теруков Е.И. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Тихонович И.А. – д.б.н., академик РАН	ФГБОУ ВО СПбГУ
	Торопов А.А. – д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Тронев А.В. – к.т.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Тронин А.А. – д.г.-м.н.	НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН
	Тубольцев Ю.В. – к.т.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
У	Урюпин О.Н. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Усикова А.А. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Устинов В.М. – д.ф.-м.н., член корр. РАН	НТЦ микроэлектроники РАН
	Устинов В.М. – член-корр. РАН	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Ф	Фадеева Н.Н. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Фирсов Ю.А. – д.ф.-м.н., проф.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Фокин А.В.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Фредерикс Д.Д. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Х	Хвостиков В.П. – д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Ц	Цацульников А.Ф. – д.ф.-м.н.	НТЦ микроэлектроники РАН
Ч	Чернецов Н.С. – д.т.н., член-корр. РАН	ЗИН РАН
	Черняков А.Е. – к.ф.-м.н.	НТЦ микроэлектроники РАН
Ш	Шамрай А.В. – д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе
	Шашкин И.С. – к.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Шварц М.З. – к.ф.-м.н.

Швидченко А.Е. – к.ф.-м.н.

Шепелев А.С.

Шилова О.А. – д.х.н.

Шубина Т.В. – д.ф.-м.н.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

ИХС им. И.В. Гребенщикова РАН

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

ПЕТЕРБУРГСКАЯ АКАДЕМИЧЕСКАЯ НАУКА

Альманах

Выпуск 1

К 30-летию Российской академии наук 1991–2021

**Под общей редакцией академика РАН В.А. Румянцева,
доктора биологических наук М.И. Орловой**

Издательство Санкт-Петербургского государственного экономического университета
191023 Санкт-Петербург, наб. канала Грибоедова, д. 30/32, литер А

Тел.: (812) 458-97-76

E-mail: print@unecon.ru

Сайт: www.print.unecon.ru

Подписано в печать 30.03.2022. Формат 70×108/16

Усл. печ. л. 27,39. Тираж 300 экз. Заказ 280

Отпечатано с оригинал-макета СПбНЦ РАН

При оформлении 1-ой страницы обложки использован фрагмент карты

«Планъ столичнаго города Санктпетербурга. Изданный 1830 года.

Седьмаго класса и кавал. А. Савинковымъ». Подарочная надпись:

«Его высокопревосходительству С.Петербургскому военному

Генераль-губернатору и кавалеру Петру Кириловичу Эссену от издателя» //

[Электронный ресурс]. URL: <http://www.kupsilla.ru/map.htm>,

<https://disk.yandex.ru/d/f7xFEelk4iceu>, свободный. Яз. рус.

(дата обращения: 30.08.2021).

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются.

Авторы несут ответственность за достоверность сведений, изложенных в статьях.

Мнение редакции может не совпадать с мнением их авторов.

При использовании материалов ссылка на Альманах

«Петербургская академическая наука» обязательна

ISBN 978-5-7310-5690-8

Петербургская академическая наука. Альманах 2022. Выпуск 1

Содержание выпуска

- Основные этапы становления и реформирования Российской академии наук
- Важнейшие достижения Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук за 1991-2021 гг.
- Широкозонные III-N наногетероструктуры: от эпитаксии до систем освещения
- Основные достижения СПбФ ИЗМИРАН с 1991 по 2021 год
- Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН – история создания и развития
- Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова: тридцать лет вместе с Российской академией наук
- Зоологический институт Российской академии наук в постсоветский период
- Санкт-Петербургское отделение ИГЭ РАН: научные результаты и прикладные исследования
- Многомасштабные процессы и явления в исследованиях Санкт-Петербургских океанологов
- Научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук в решении проблем экологической безопасности
- Институт истории материальной культуры РАН на рубеже тысячелетий
- Санкт-Петербургский филиал Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук в 1991-2021 гг.
- От сельскохозяйственной микробиологии к симбиогенетике

ISBN 978-5-7310-5690-8



<http://www.spbrc.nw.ru>

© Санкт-Петербургский научный центр РАН, 2022
© Коллектив авторов, 2022
© Издательство СПбГЭУ, 2022