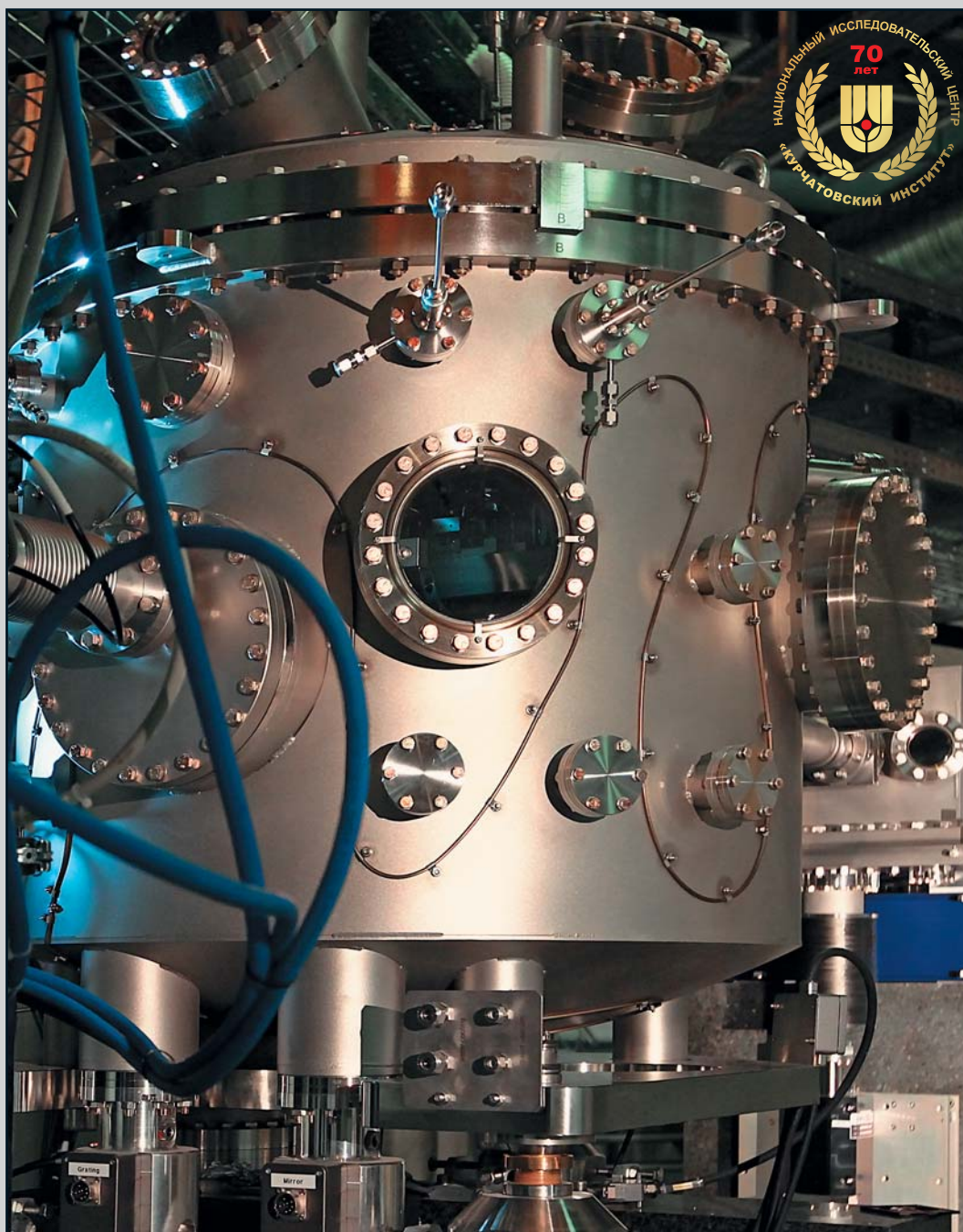


ПРИРОДА

12 13



В НОМЕРЕ:

Специальный выпуск

К 70-ЛЕТИЮ НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

- 3** Ковальчук М.В.
От атомного проекта
к «конвергенции»
- 8** Азизов Э.А., Велихов Е.П.
Долгий путь к гибриду
- 17** Штромбах Я.И., Гагаринский А.Ю.
Перспективы ядерной энергетики
- 25** Ковальчук М.В., Квардаков В.В.,
Корчуганов В.Н.
КИСИ вчера, сегодня, завтра
- 37** Зубавичус Я.В., Мухамеджанов Э.Х.,
Сенин Р.А.
Экспериментальные станции КИСИ
- 45** Скорехватов М.Д.
Физика нейтрино:
промежуточные итоги

- 56** Кашкаров П.К., Казанский А.Г.,
Форш П.А., Емельянов А.В.
Тонкопленочные солнечные
элементы в прошлом и будущем

- 65** Василев Р.Г., Решетилев А.Н.,
Шестаков А.И.
Биотопливные элементы

- 71** Северин С.Е., Москалева Е.Ю.,
Посыпанова Г.А.
Таргетная терапия рака

- 78** Букреева Т.В., Фейгин Л.А.
Нанокapsулы из полимеров

Научные сообщения

- 85** Инюшкин А.В.
Обогащая кристаллы изотопами,
повышаем их теплопроводность

Качалова Г.С., Новикова Н.Н.,
Крюкова М.В.

Casus цинка и серы
в болезни Паркинсона (88)

- 90**
Тематический и авторский
указатели за 2013 год

CONTENTS:

Special issue

TO 70th ANNIVERSARY OF NATIONAL RESEARCH CENTRE «KURCHATOV INSTITUTE»

- 3** **Kovalchuk M.V.**
From Atomic Project to «Convergence»
- 8** **Azizov E.A., Velikhov E.P.**
A Long Path to Hybrid Reactor
- 17** **Shtrombakh Ya.I., Gagarinskii A.Yu.**
Prospects of Nuclear Energy
- 25** **Kovalchuk M.V., Kvardakov V.V.,
Korchuganov V.N.**
**Kurchatov Synchrotron Radiation
Source Yesterday, Today, Tomorrow**
- 37** **Zubavichus Ya.V., Mukhamedzhanov E.Kh.,
Senin R.A.**
**Experimental Stations of Kurchatov
Synchrotron Radiation Source**
- 45** **Skorokhvatov M.D.**
**Neutrino Physics:
Intermediate Results**

- 56** **Kashkarov P.K., Kazanskii A.G.,
Forsh P.A., Emelyanov A.V.**
**Thin-Film Solar Cells
in the Past and Future**

- 65** **Vasilov R.G., Reshetilov A.N.,
Shestakov A.I.**
Biofuel Cells

- 71** **Severin S.E., Moskaleva E.Yu.,
Posyanova G.A.**
Target Therapy of Cancer

- 78** **Bukreeva T.V., Feigin L.A.**
Polymeric Nanocapsules

Scientific Communications

- 85** **Inyushkin A.V.**
**Enrichment of Crystals by Isotopes
Enhances Their Thermal Conductivity**

- Kachalova G.S., Novikova N.N.,
Kryukova M.V.**
**Zinc and Sulfur Partnership
in Parkinson Disease (88)**

- 90**
Subject and Author Index for 2013

От атомного проекта к «конвергенции»*



член-корреспондент РАН М.В.Ковальчук,
директор НИЦ «Курчатовский институт»

Мы отмечаем не просто юбилей научного института, пусть даже такого всемирно известного, как легендарный Курчатовский институт. 70 лет назад состоялось событие глобального масштаба — с исторической, научной, политической точки зрения.

Разрешите привести такую цитату великого немецкого философа Фридриха Энгельса из «Диалектики природы»: *«Это была эпоха, которая нуждалась в титанах и которая породила титанов по силе мысли, страсти и характеру, по многосторонности и учености»*. Он сказал это об эпохе и титанах Возрождения, как Леонардо да Винчи, Микеланджело. В эту эпоху человечество находилось на разломе, переходе от Средневековья в Новое время. И вот именно при таких цивилизационных вызовах появляются личности титанического масштаба. Это касается и времени совсем недавнего — начала атомной эры, когда на чаше весов находилась судьба всей нашей планеты.

Советский атомный проект создавало множество талантливых и самоотверженных ученых, инженеров, геологов, рабочих, солдат, лаборантов — их вклад бесценен. Но, если так можно сказать, основным «лицом» атомного проекта, его мотором был Игорь Васильевич Курчатов, и чуть позже эту эстафету подхватил Анатолий Петрович Александров. И.В.Курчатов стал одним из первых, кто не просто почувствовал новый цивилизационный вызов, сумел оценить его последствия для человечества, но и предложил пути решения этого вызова и блестяще их реализовал.

Не могу не привести еще одну цитату, на этот раз самого Игоря Васильевича — его обращение к руководству страны в 1944 году: *«Зная вашу исключительно большую занятость, я, все же, ввиду исторического значения проблемы урана решился побеспокоить вас и просить вас дать указания о такой организации работ, которая соответствовала бы возможностям и значениям нашего великого государства в мировой культуре»*. Вот такое, казалось бы, соединение несовмес-

тимых понятий — атомный проект, наше великое государство и мировая культура. А итогом стало создание 12 апреля 1943 года Лаборатории №2 — будущего легендарного Курчатовского института.

Сослагательного наклонения в истории не существует, но очевидно, что наша цивилизация сохранилась в последние 70 лет в значительной мере благодаря успешной реализации советского атомного проекта, который позволил на долгие годы сохранить паритет среди ядерных держав. И в 1990-е годы, тяжелейшие для России, мы сохранились как суверенное государство во многом потому, что у нас было атомное оружие. 70 лет назад наши предшественники с нуля, в тяжелейших условиях войны, создали такую совершенную научную систему, которая позволила не только решить в кратчайшие сроки конкретную военную задачу по созданию ядерного оружия, но и дала взрывное развитие уникальным технологиям, научным направлениям, составляющим нашу гордость и по сей день.

Советская атомная бомба была взорвана 29 августа 1949 года, но уже в 1954 году, основываясь прежде всего на военных наработках, Курчатов запускает первую в мире атомную промышленную электростанцию в Обнинске — и с нее начинается эра атомной энергетики. Затем логика развития энергетических исследований менялась от деления атомного ядра к синтезу, термоядерной энергетике, управляемому термоядерному синтезу, для чего было необходимо освоить магнитное удержание плазмы, и в Курчатовском институте был создан первый в мире ТОКАМАК. В связи с этим возникла потребность в новых материалах со сверхпроводящими свойствами, что сегодня дало развитие новой электроэнергетике, электродвижению. Затем на основе оружейных разработок было создано ядерное энергетическое устройство (ЯЭУ), и в 1958 году спущена на воду первая отечественная подводная лодка «Ленинский комсомол». В 1959 году мы создали первый в мире атомный ледокол «Ленин», и сегодня наш атомный ледокольный флот обеспечивает нам абсолютный приоритет на шельфе в Арктике.

Методы математического моделирования, компьютеры, интернет — все это появилось в ответ на вызовы атомного и космического проектов. Принципиально новые материалы, современное

* Доклад на торжественном заседании, посвященном 70-летию «Курчатовского института». Москва, Дом Ученых, 16 апреля 2013 г. Авторская сокращенная версия.



Научно-технологические прорывы XX века.

материаловедение также возникли для обеспечения этих проектов, что в свою очередь, потребовало создания различных ускорителей, источников синхротронного излучения и нейтронов. В рамках атомного проекта мы создали самую совершенную и сегодня промышленность по разделению изотопов, что обеспечило развитие ядерной медицины. Все это зримое доказательство того, что реализация глобального проекта обеспечивает множество научных и технологических прорывов. И сегодня, спустя десятилетия, мир во многом пользуется «плодами» атомного проекта. Существенная часть сегодняшней цивилизации так или иначе связана с реализацией И.В.Курчатовым, А.П.Александровым и их сподвижниками атомного проекта, который обеспечил обороноспособность и независимость страны, ее технологическое развитие и нашу сегодняшнюю конкурентоспособность на глобальных высокотехнологичных рынках.

Но сегодня, спустя 70 лет мы пришли к новому цивилизационному разлому, связанному с непреодолимыми противоречиями между природой и созданной человеком техносферой и в конечном итоге с очевидной исчерпаемостью ресурсов. Наш великий соотечественник академик В.И.Вернадский ввел понятие ноосферы, где «разумная деятельность социального человека» является определяющим фактором развития. После Второй мировой войны странами «золотого миллиарда» была запущена модель расширенного экономического воспроизводства, а фактически началось массовое истребление ресурсов. После включения в эту модель таких стран, как Китай и Индия,

общий кризис цивилизации перешел в новую фазу. Можно констатировать, что за последние десятилетия созданная человечеством технологическая сфера вступила в антагонистическое противоречие с природой, биосферой. Сегодня стоит вопрос: возможно ли вообще преодоление этого кризиса и в конечном счете — выживание человечества? Очевидно, что это возможно только при принципиальной перестройке базовых составляющих существующей цивилизационной модели: наука, образование, технологии. В этом и заключается новый вызов, сформировавшийся к концу XX века — не столь очевидный, но в каком-то смысле более глубокий и значительный, чем все предшествующие.

Речь идет о создании принципиально новой техносферы, которая станет органической частью природы. Это, в свою очередь, возможно путем конвергенции нано-, био-, инфо-, когнитивных (НБИК) наук и технологий.

Нанотехнологии — это метод получения материалов любого вида путем атомно-молекулярного конструирования. Биотехнологии вводят сюда органические компоненты, и сочетание нано-с био- дает возможность получить гибридный материал (например, полупроводник с детектором из биоорганического материала). Информационные технологии дают нам возможность сделать создаваемый объект «интеллектуальным», который не только измеряет конкретный параметр, но и обрабатывает его. И, наконец, когнитивные исследования, основанные на изучении сознания, дают возможность выработать алгоритмы «одушевления» создаваемых систем.



Научно-технологические прорывы XXI века: НБИКС-конвергенция.

Устройства и системы, создаваемые с помощью НБИКС-технологий, должны иметь в корне отличающиеся от современных механизмы потребления энергии. В созданной нами техносфере мы сегодня используем машины и механизмы, потребляющие колоссальное количество энергии, для их работы в принципе не может хватить природоподобных энерготехнологий. И по сей день все разрабатываемые альтернативные технологии так и не стали мощным энергетическим ресурсом.

Энергетика будущего — это создание природоподобных систем генерации и потребления энергии на основе гибридных материалов, на порядки более экономных, действующих по законам «живой природы». Основа НБИКС-конвергенции — соединение возможностей современных технологий, прежде всего микроэлектроники, с конструкциями, созданными живой природой. Крайне важно, что конвергенция НБИКС наук и технологий имеет ярко выраженную социальную направленность: речь идет о новых материалах и системах, необходимых прежде всего для высокотехнологичной, персональной медицины, транспорта, связи, охраны окружающей среды и т.д.

Для решения этих задач нами несколько лет назад был создан уникальный Курчатовский НБИКС-центр. Его главная цель — разработать научные и технологические основы для создания природоподобных технологий и систем. Ядром НБИКС-центра являются мегаустановки: Курчатовский специализированный источник синхротронного излучения (КИСИ), исследовательский нейтронный реактор ИР-8, суперкомпьютерный центр. Кроме того, в состав НБИКС-центра входят отделения: мо-

лекулярной биологии, белковой кристаллографии (белковая фабрика), физико-химических технологий, робототехнических и электромеханических систем. В биологическом комплексе мы можем проводить весь спектр работ: от создания белковых субстанций до геномных исследований. Сегодня генетика — это естественная наука, с хорошо отработанными технологиями, в частности, по полной расшифровке генома. Но еще в XIX веке общие закономерности наследственности и изменчивости изучали с помощью таких гуманитарных дисциплин, как антропология, этнография, археология, лингвистика.

А в XX веке, благодаря успехам молекулярной биологии, нанотехнологий, генетика стала естественнонаучной дисциплиной. То есть мы наблюдаем сращивание естественнонаучного и гуманитарного знания в единое целое.

Благодаря современному оборудованию Курчатовского НБИКС-центра мы можем решать и такую социально важную задачу, как ускоренный дизайн лекарств — наш набор междисциплинарных инструментов позволяет осуществлять весь цикл: от идеи до производственной технологии. Одним из ключевых подразделений НБИКС-центра является отделение робототехники и микро-нано-электромеханических систем. Непосредственная задача этого подразделения — создание антропоморфных биоробототехнических систем.

Крайне важной и интересной является работа нашего отделения когнитивных исследований, где выстроена технологическая цепочка от исследований нейрофизиологических основ когнитивной деятельности до создания искусственных уст-



Слияние гуманитарного и естественнонаучного знания.

ройств. Исследовательская инфраструктура для когнитивных наук является и базой для развития ядерной медицины. Сочетание потенциала Курчатова института в области ядерных технологий и возможностей НБИКС-центра открывает принципиально новые возможности, например, при исследовании воздействия малых доз радиации на живые организмы. Мы имеем возможность исследовать воздействие любого рода частиц и любого вида излучения на стволовые клетки, на генетическую, иммунную систему, структуру белков, когнитивные функции. Такие знания необходимы при планировании полетов в дальний космос, когда космонавты будут годами находиться в условиях слабой радиации, и надо ясно понимать последствия этого для здоровья, влияния на когнитивные функции человека. Эти исследования важны также для развития ядерной медицины и лучевой терапии.

Конвергенция наук и технологий, с одной стороны, безусловно открывает перед людьми новые перспективы выживания, развития цивилизации, но и таит в себе новые угрозы, что в свою очередь требует изменения наших подходов к окружающему миру, его изучения как единого целого.

В когнитивных науках наиболее ярко проявляется «конвергенция» естественных дисциплин с гуманитарными. До недавнего времени работу мозга изучали исключительно по реакциям человека, его эмоциям на какое-то внешнее раздражение или информацию, выраженным лингвистически, психологически, социологически. Но сегодня мы можем изучать работу мозга уже с помощью позитронно-эмиссионного или ядерно-магнитного томографа — видеть до мельчайших деталей, как реагируют различные участки мозга при какой-либо ситуации. Здесь налицо конвергенция гуманитарного и естественно — научного знания, и превращения гуманитарного знания в технологии.

Таким образом нано-, био-, информационные технологии дополняются методами когнитивных наук, изучающих и моделирующих сознание чело-

века и соединяются с достижениями социально-гуманитарных наук. То есть пространство конвергентных технологий приобретает еще одно измерение — социально-гуманитарное, а конвергентное единство нано-, био-, инфо-, когнитивных технологий дополняется социально-гуманитарными технологиями, становясь уже НБИКС-технологиями. Это расширение конвергентных наук в далекую, казалось бы, от них гуманитарную область стало логическим итогом первого этапа развития НБИКС-наук и технологий в Курчатове центре. Социогуманитарное подразделение работ

тает в самой тесной связи с отделением нейробиологии, молекулярной визуализации, математического моделирования и информационных технологий, робототехники и микросистем. Среди основных направлений его деятельности — исследование когнитивных и коммуникативных процессов у человека, прежде всего с точки зрения процессов принятия решений и разработки человеко-машинных интерфейсов. Отдельное направление изучает обобщение курчатова опыта НБИКС-конвергенции, ее исторических и философских предпосылок. Это крайне важно с точки зрения социологии и методологии для задач образования и организации будущих научных исследований

Для обеспечения кадрами нашего нового направления НБИКС-конвергенции мы создали за несколько лет мощную образовательную базу. Начинали с кафедры физики наносистем в МГУ — пожалуй, первой междисциплинарной естественнонаучной кафедры такого рода в стране. А несколько лет назад был открыт НБИКС-факультет в МФТИ (пока единственный в мире), студенты и аспиранты которого учатся и работают в Курчатове НБИКС-центре. Начата работа и на физическом факультете СПбГУ, который уже активно задействован в практической работе в Петербургском институте ядерной физики в г.Гатчина, тоже теперь входящем в НИЦ «Курчатова институт».

В этом нашем институте находится уникальная мегаустановка — высокопоточный реактор нейтронов ПИК, который уже прошел физический пуск. Еще несколько лет потребуются для следующего этапа — его энергетического пуска. В результате это будет самый современный исследовательский нейтронный реактор в мире, на базе которого создастся международный центр нейтронных исследований.

Вообще реализация любого крупного научного проекта всегда связана с созданием мегаустановок, где концентрируются многие технологические достижения. Мегаустановки являются свиде-

тельством научно-технологического потенциала, конкурентоспособности страны и элементом национальной безопасности. В НИЦ “Курчатовский институт” существует уникальная комбинация мегаустановок мирового класса: источники синхротронного и нейтронного излучения, суперкомпьютер, установки термоядерного синтеза ТОКАМАК, суперсовременная приборная база. Не случайно именно на базе Курчатовского института в апреле 2008 года был образован первый в России национальный исследовательский центр. Разработана и утверждена общая научная программа институтов, входящих сегодня в НИЦ: Курчатовского института, Института физики высоких энергий (ИФВЭ), Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), Петербургского института ядерной физики (ПИЯФ), в которой первое и главное — разработка и создание принципиально новых национальных мегаустановок мирового класса, научные исследования на них как в России, так и за рубежом. Вторая задача — модернизация уже существующих в Российской Федерации мегаустановок и вывод из эксплуатации устаревших научных комплексов, чего раньше мы никогда не делали, в отличие от других стран. По инициативе правительства сегодня в России уже реализуется наиболее перспективные проекты по созданию мегаустановок. Помимо нейтронного реактора ПИК в ПИЯФ НИЦ КИ Курчатовский институт совместно с Росатомом и итальянскими коллегами участвует также в проекте по разработке термоядерной мегаустановки принципиально нового типа ТОКАМАК “Игнитор”. Также НИЦ “Курчатовский институт” планирует создавать специализированный источник синхротронного излучения четвертого поколения. Этот проект уже получил поддержку на международном уровне от партнеров из ведущих синхротронных центров мира.

Мы также активно участвуем в самых значимых международных мегапроектах. Как уже говорилось, советским ученым принадлежит идея овладения процессами термоядерного синтеза, и первый в мире ТОКАМАК был создан в Курчатовском институте еще в 1950-х годах. Сегодня международная кооперация из восьми стран работает над созданием международного термоядерного реактора ITER на юге Франции. Также очень значительную роль Россия и конкретно НИЦ “Курчатовский институт” играет в проекте Большого адронного коллайдера в центре европейских ядерных исследований CERN в Швейцарии. На базе Курчатовского института сегодня создается компьютерный центр первого уровня (Tier-1) сети распределенных вычислений (GRID), которая обрабатывает и хранит данные от экспериментов, выполняющихся на БАК. Подобных центров первого уровня в мире всего 11.

Тесно сотрудничает НИЦ “Курчатовский институт” и с крупнейшим синхротрон-электронным центром Германии DESY. На базе DESY сегодня развивается еще один международный мега-



Мегаустановки для конвергентных исследований. Высокопоточный исследовательский реактор ПИК.

проект рентгеновского лазера на свободных электронах XFEL, где роль России является ключевой. Участие России в проекте XFEL было инициировано Курчатовским институтом, на который правительство возложило роль научного координатора и руководителя от России. Фактически это будет принципиально новый источник синхротронного излучения нового типа, очень высокой яркости, что позволит изучать процессы, происходящие в веществе, в очень короткие (фемтосекундные) временные промежутки. Использование этого лазера сулит революционные прорывы во многих областях науки, в первую очередь, в материаловедении, нанотехнологиях, биотехнологиях. Россия участвует в проекте XFEL во всех аспектах и на всех уровнях, кроме того, в этот проект вовлечено много российских ученых, живущих и работающих в Германии. Все это уникальные, очень сложные, дорогостоящие проекты, и реализация их немыслима без интеллектуального вклада российских ученых и, в значительной степени, материального вклада российской стороны.

Таким образом, следуя двум главным приоритетам своего научного развития, Курчатовский институт продолжает развивать и блок атомной энергетики, ядерные технологии, и одновременно готовить базу для энергетики будущего, создавая природоподобные системы ее генерации и потребления, на порядки более экономичные, действующие по законам живой природы.

За последние годы Курчатовский институт значительно изменился — построены новые корпуса, обновляется экспериментальная база, вновь в лаборатории идет поток молодых ученых, аспирантов. Нам за короткое время, действительно, удалось создать базу для принципиально новой “конвергентной” науки — инфраструктурную, идеологическую и кадровую. Мы по-прежнему являемся флагманом российской науки и с гордостью носим имя своего великого основателя. ■

Долгий путь к гибриду

Э.А.Азизов, Е.П.Велихов

И зучая документы, связанные с историей электромагнитного разделения изотопов, поражаешься объему, многогранности и сложности проблем, которые приходилось решать Игорю Васильевичу Курчатову в Атомном проекте. Одной из самых трудных проблем, стоявших перед ним, было получение делящегося вещества — ядерной взрывчатки [1]. Такого изотопа — ^{235}U — в естественном уране содержится около 0.7%. Другое вещество, о котором стало известно позже, — плутоний — практически отсутствовал в природе и нарабатывался в ядерных реакторах (выделялся радиохимически).

Стояла цель выделить ^{235}U из естественного урана в количестве, необходимом для создания ядерного заряда. По расчетам на основе известных в то время сечений деления ядра нейтронами, оно составляло от 9 до 43 кг. Быстро разработать методы разделения изотопов в тяжелейших условиях военного времени было очень сложно. Понимая это, Курчатов привлек к решению задачи известных ученых и инженеров страны. Существовало несколько методов разделения изотопов урана, перспективных для получения требуемого количества материала с необходимой степенью обогащения: газодиффузионный, центрифужный и электромагнитный [2]. Работы по электро-



Энгилен Атакузиевич Азизов, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института физики токамаков Курчатовского центра ядерных технологий, директор Отделения физики токамаков-реакторов ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований». Лауреат Государственной премии СССР и премии Правительства РФ. Специалист в области физики и техники управляемого термоядерного синтеза.



Евгений Павлович Велихов, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, президент НИЦ «Курчатовский институт», Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, Государственных премий СССР и РФ, Международной премии «Глобальная энергия». Область научных интересов — физика плазмы и астрофизика, управляемый термоядерный синтез, энергетика.

магнитному разделению урана были поручены Л.А.Арцимовичу, как лучшему специалисту по электронной оптике [3].

Цель — изотоп ^{235}U

Идея электромагнитного разделения восходит к масс-спектропии, предложенной в 1918 г. А.Демпстером и получившей развитие в работах американских и европейских ученых [4].

Разделение изотопов в электромагнитном методе происходит при движении предварительно ускоренных ионов из мощного источника в поперечном магнитном поле. Радиус движения ионов определяется отношением заряда к массе. При достаточно больших скоростях ионов и размерах полюсов электромагнитов можно достичь требуемого пространственного разделения изотопов по

атомной массе (рис.1) [2, 4–6]. При всей кажущейся простоте электромагнитный метод потребовал решения ряда сложнейших научных и технических задач. Среди них создание мощных источников ионов урана, системы ускорения и эффективной ионной оптики, крупных электромагнитов с профилированием полюсов, высокостабилизированных источников тока и напряжения, качественных вакуумных камер большого объема и высокопроизводительных вакуумных насосов, создающих вакуум не хуже 10 мм рт. ст. Для решения этих задач Курчатов мобилизовал группу молодых талантливых ученых, инженеров и конструкторов: И.Н.Головина, П.М.Морозова, Г.Я.Щепкина, А.М.Андрианова, В.С.Золотарева, С.Ю.Лукьянова, Б.Г.Брежнева, А.К.Спиридонова и др. Позже к ним присоединился ряд специалистов из Всероссийского электротехнического института (ВЭИ) во главе с Н.А.Явлинским.

Работы по электромагнитному разделению урана начались в ноябре 1944 г. в закрытой Лаборатории №2 в Москве. Нетрудно представить, какими техническими средствами и возможностями располагали в самом начале участники работ. Но уже через короткое время благодаря их квалификации, энтузиазму и упорству, постоянно поддерживаемым Курчатовым, были созданы установки, на которых обогащение вышло на уровень 90% для урана-235, предварительно обогащенного диффузионным методом до 40% [7]. В этом им помогло подключение специалистов как по вакуумной технике, создавших мощные высоковакуумные агрегаты и оборудование, так и из электротехнической промышленности, изготовивших крупные электромагниты, системы питания и др. (рис.2).

Распоряжением правительства* при заводе «Электросила» было организовано специальное ОКБ, которое возглавил Д.В.Ефремов. В дальнейшем ОКБ было преобразовано в Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры (НИИЭФА). Также была организована Центральная вакуумная

* Постановление Совета народных комиссаров № 3176-964 сс/оп от 27 декабря 1945 г. и Постановление Совета министров СССР № 655-231 сс от 24 марта 1947 г.



Л.А.Арцимович и И.В.Курчатов на скамейке «у хижины лесника». 1959 г.

лаборатория (впоследствии — Институт вакуумной техники) под руководством С.А.Векшинского. Благодаря слаженной совместной работе ученых, инженеров, конструкторов и производителей в течение трех лет удалось перейти от лабораторных установок к настоящим промышленным электромагнитным масс-сепараторам. В декабре 1950 г. на построенном по постановлению правительства заводе (завод №814 в Нижней Туре Свердловской обл.), на установке по электромагнитному разделению изотопов СУ-20, была получена первая партия высокообогащенного ^{235}U . И хотя в получении промышленных количеств урана электромагнитный метод разделения изотопов уступил газодиффузионному и центрифужному, он сыграл важную роль в создании водородной бомбы. Именно с помощью электромагнитного метода было получено требуемое для первой

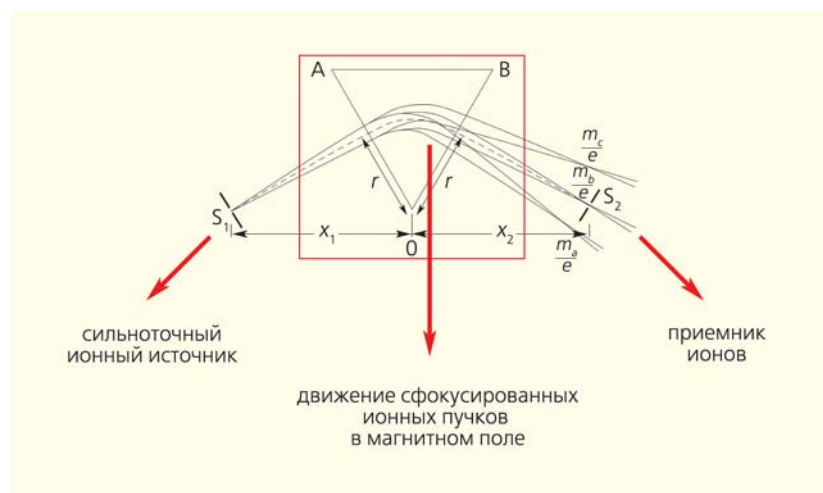


Рис.1. Принцип электромагнитного разделения изотопов.



И.Н.Головин, П.М.Морозов, Н.А.Явлинский.

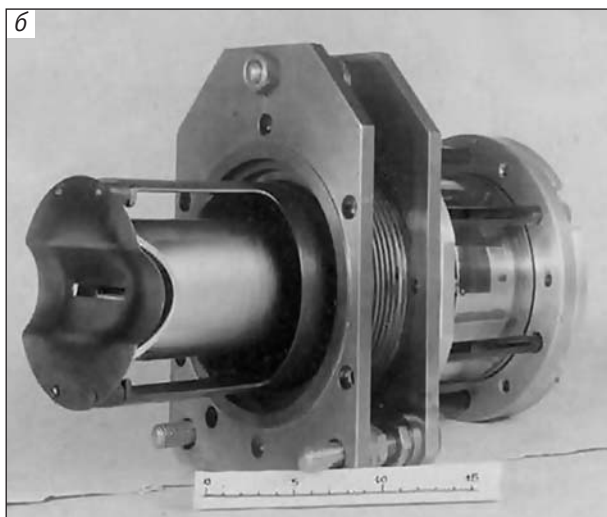
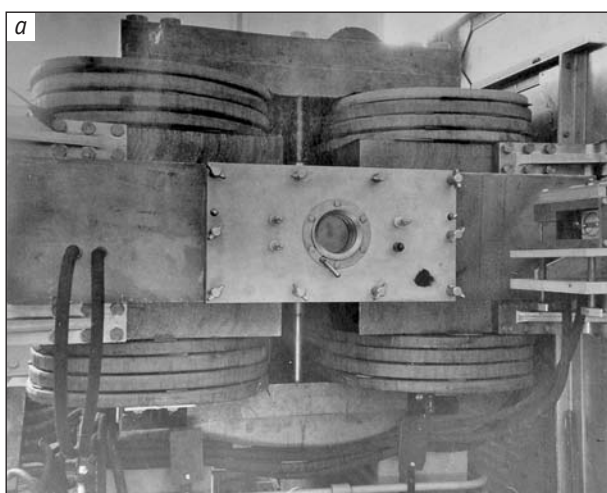


Рис.2. Опытная установка №5 по электромагнитному разделению изотопов: а — электромагнит, б — ионный источник.

бомбы количество изотопа ${}^6\text{Li}$. Эти достижения ученых и специалистов электромагнитного метода были заслуженно отмечены правительством*, а установка СУ-20 до сих пор используется при производстве стабильных изотопов для медицины, фундаментальных исследований и прикладных целей [8].

Роль и результаты работ по электромагнитному разделению изотопов вышли далеко за рамки первоначальной задачи. Благодаря им были разработаны основы и технологии ряда научных направлений (в том числе электрофизики мощных систем) и развита промышленность, позволившие уже в 1950-х годах создать циклотроны и уникальный синхрофазотрон, нейтронные генераторы, крупные линейные ускорители и ряд других электрофизических установок. Но самым важным следствием работ по электромагнитному методу разделения изотопов стало то, что они послужили кадровым, научным и техническим фундаментом для начала и последующего развития работ по управляемому термоядерному синтезу.

Курс на термояд

К октябрю 1950 г. А.Д.Сахаров и И.Е.Тамм, используя предложение из июльского письма в ЦК партии О.А.Лаврентьева, который служил солдатом на Сахалине, подготовили теоретическое обоснование магнитного термоядерного реактора (МТР) и сделали оценки его параметров. Реактор был задуман на основе синтеза изотопов водорода в плазменном разряде в камере, снабженной тороидальным электромагнитом. Уже в начале 1951 г.

* Постановление Совета министров СССР №2140-562сс/оп от 19 июня 1947 г.



Инициаторы исследований по управляемому термоядерному синтезу: О.А.Лаврентьев, А.Д.Сахаров, И.Е.Тамм.

Курчатов организовал обсуждение проекта с ведущими физиками Атомного проекта. Обсуждение носило секретный характер, так как МТР рассматривался как источник нейтронов для наработки делящегося вещества, а затем и трития (в результате реакции ${}^6\text{Li} + n$) [9, 10].

К идее МТР Игорь Васильевич Курчатов подошел с более широких позиций. В письме «О возможности создания магнитных термоядерных реакторов» [11] на имя начальника Первого главного управления Б.Л.Ванникова (для Берии) от 04.01.1951 г. Курчатов совместно с Головиным впервые дал описание устройства с тороидальной вакуумной камерой, помещенной в сильное магнитное поле, в которой возбуждаемым трансформатором продольным током создается, нагревается и удерживается дейтериевая плазма при температуре в миллионы градусов. При таких условиях в плазме происходят реакции синтеза ядер с образованием изотопов ${}^3\text{He}$, трития, протонов, нейтронов и избыточной энергии. В письме была представлена программа создания гибридных (синтез—деление) реакторов для производства искусственного топлива в торий-урановом и уран-плутониевом циклах, а также для наработки трития и выработки энергии. Курчатов понимал, что управляемый термоядерный синтез может стать источником ядерной энергии с практически неисчерпаемым ресурсом и таким образом решить проблему энергообеспечения человечества на все времена. По его инициативе в 1951 г. было принято постановление правительства*, и в Лаборатории №2 (позже Лаборатория измерительных приборов АН СССР, затем Институт атомной энергии — ИАЭ) были развернуты работы по управляемому термо-

ядерному синтезу (УТС). Общим руководителем этих работ в Советском Союзе был назначен Л.А.Арцимович, а теоретических разработок — М.А.Леонтович. Практически все основные участники работ по электромагнитному разделению были вовлечены Игорем Васильевичем в работы по УТС. Исследования велись по нескольким направлениям, но прежде всего — по изучению плазменных процессов в тороидальной камере, окруженной катушками, которые создавали тороидальное магнитное поле так, как это было предложено Сахаровым и Таммом и развито Курчатовым и Головиным. Ток в плазме возбуждался вихревым электрическим полем с помощью индуктора, работавшего по существу первичной обмоткой воздушного или железного трансформатора. Ток, текущий по плазменному каналу (служившему вторичным витком), не только нагревал ее омически, но и создавал полоидальные поля, компенсирующие тороидальный дрейф.

Первая тороидальная установка с сильным продольным магнитным полем, известная как ТМП (тор в магнитном поле, рис.3), была построена в Лаборатории измерительных приборов в 1954 г. под руководством Головина и Явлинского. Она имела следующие параметры: большой радиус плазменного шнура $R = 0.8$ м, малый радиус шнура $a = 0.13$ м, магнитное поле на оси $B_z = 1.5$ Тл, ток плазмы $I = 260$ кА. Объем плазмы составлял всего 0.27 м³ (объем в МТР превосходил его более чем в 3500 раз). Камера ТМП была выполнена из фарфора, что определило низкую температуру плазмы (из-за больших потерь на примесное излучение); ее окружал медный кожух с разрезами для стабилизации равновесного положения шнура по большому радиусу. Последующие установки такого типа, при разработке которых учитывались результаты предыдущего изучения процессов, задающих пара-

* Постановление Совета министров СССР № 1463-732сс/оп от 5 мая 1951 г.

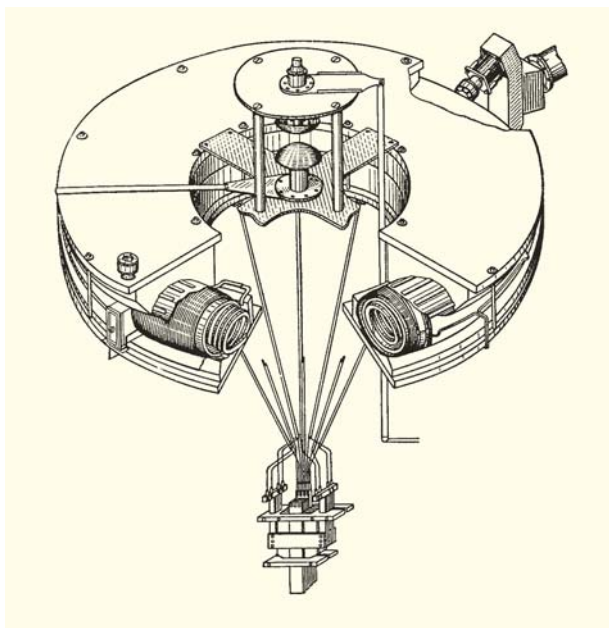


Рис.3. Установка ТМП (1954—1957).

метры плазмы, получили по предложению Головина и Явлинского название «токамак» — по первым слогам словосочетания «тороидальная камера магнитная» (буква *г* в последнем слове заменена на *к*). В период 1955—1965 гг. в ИАЭ было построено восемь токамаков (Т-1, Т-2, Т-3, Т-3А, Т-5, ТМ-1, ТМ-2, ТМ-3, рис.4, 5), на которых выполнены обширные исследования. Появилось понимание процессов, которые влияют на поведение и параметры горячей плазмы в магнитных полях, сформировалась теория и наметились средства, позволяющие повысить температуру плазмы и время ее удержания, родились соответствующие методы диагностики. На конференции МАГАТЭ в Новосибирске в 1968 г. были представлены результаты экспериментов на

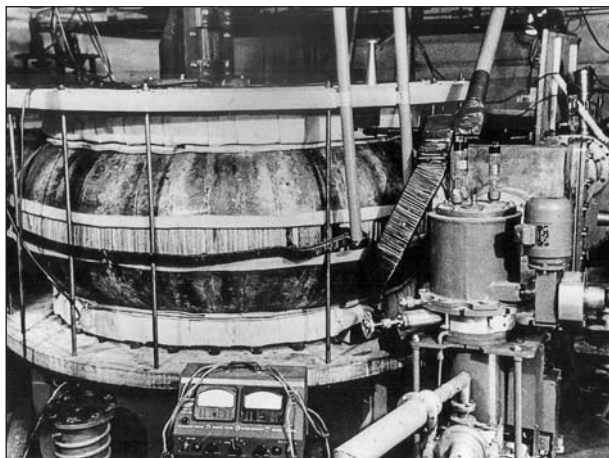


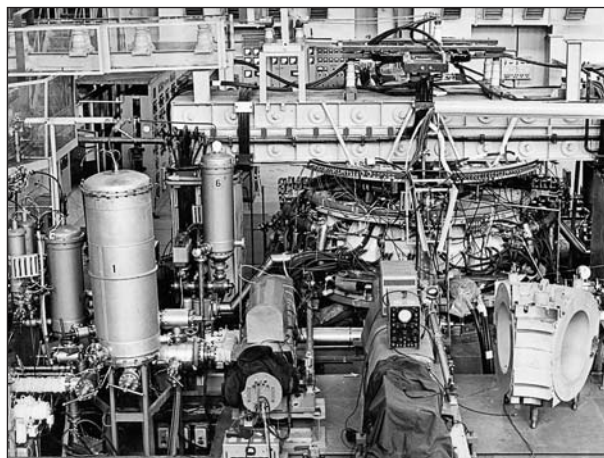
Рис.4. Токamak Т-1 (1957—1959) — первая тороидальная установка, получившая название «токамак».

токамаке Т-3А ($R = 1.0$ м; $a = 0.15$ м; $B_T = 3.8$ Тл; $I = 0.14$ МА), из которых следовало, что характерное время удержания плазмы t_E в магнитном поле значительно превышает так называемые боровские потери энергии, что позволило достичь температуры в более чем 10 млн градусов [12]. Измерения электронной температуры в токамаке Т-3А методом томсоновского рассеяния лазерного излучения, выполненные по предложению Арцимовича совместно английскими и советскими физиками, подтвердили диамагнитные и интерферометрические данные наших исследователей. Параллельный контроль абсолютной величины нейтронного излучения и характера его изменения во времени позволил сделать вывод, что на токамаке Т-3А впервые в мире осуществлена термоядерная реакция в плазме, удерживаемой магнитным полем (рис.5).

Эти результаты, доложенные на симпозиуме в Дубне в 1968 г. [13, 14], дали мощный толчок к сооружению токамаков во всех ведущих лабораториях мира, и установка такого рода была признана наиболее перспективной конструкцией для решения проблем УТС. Курчатовский институт стал признанным лидером экспериментальных и теоретических исследований физики токамаков в мире. Уникальным же центром конструирования и изготовления установок в области УТС в нашей стране стал НИИЭФА им.Д.В.Ефремова.

Токамаки — больше и мощнее

В течение последующих лет были созданы новые токамаки: первый сверхпроводящий токамак со стационарным магнитным полем, создаваемым катушками из NbTi Т-7 (СССР; $R = 1.2$ м, $a = 0.3$ м, $B_T = 3$ Тл, $I = 0.3$ МА, рис.6,а), Т-10 (СССР), TFTR (США; $R = 2.4$ м, $a = 0.8$ м, $B_T = 6$ Тл, $I = 3$ МА, мощность высокочастотного нагрева $W_{ICRH} = 11$ МВт, мощ-

Рис.5. Токamak Т-3А (1961—1971) с параметрами $R = 1.0$ м, $a = 0.15$ м, $B_T = 3.8$ Тл, $I = 0.14$ МА).

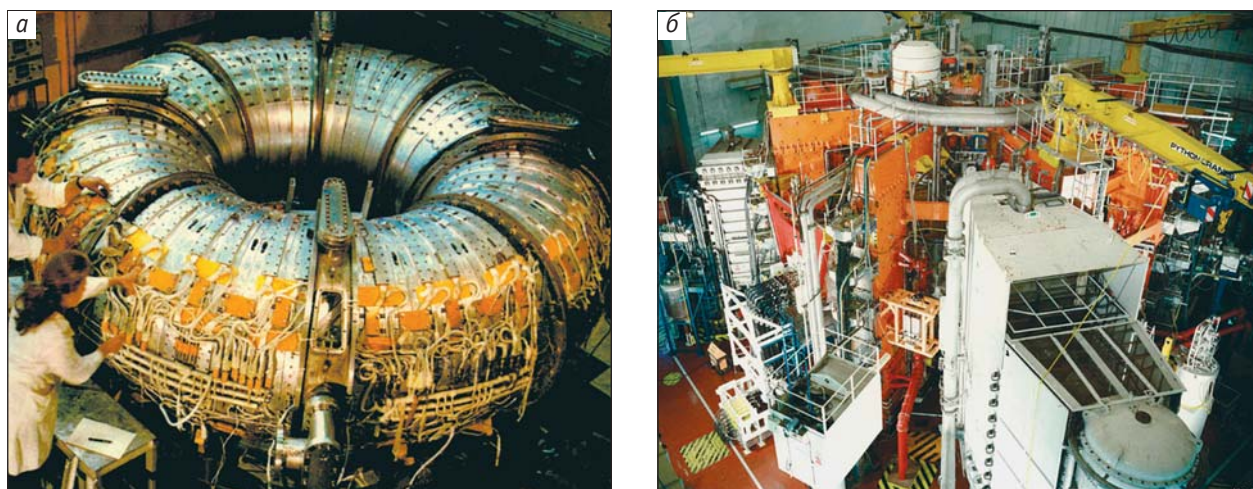


Рис.6. Токамак Т-7 (ИАЭ им.И.В.Курчатова, 1979 г.) — первый сверхпроводящий токамак со стационарным магнитным полем, использующий сверхпроводник из NbTi (а); JET (Англия, после 1992 г., б).

ность инъекции быстрых частиц $W_{\text{NBI}} = 39$ МВт), D-IIID (США), JET (Европейский Союз, $R = 2.96$ м, $a = 0.96$ м, $B_T = 4$ Тл, $I = 6$ МА, с суммарной мощностью дополнительного нагрева плазмы 43 МВт, рис.6,б), JT-60 (Япония), крупнейший сверхпроводящий токамак Т-15 (СССР), токамак с сильным полем и мощным адиабатическим нагревом ТСП (СССР). По параметрам они вплотную приблизились к достижению условий, необходимых для возбуждения интенсивных термоядерных реакций. Это условие заключается в том, что энергия, выделяемая в результате термоядерных реакций в дейтерий-тритиевой плазме, должна превышать затраты на их возбуждение. Количественно оно выража-

ется так называемым критерием Лоусона $nT\tau > 10^{21}$, где n — концентрация частиц в плазме (м^{-3}), T — ее температура (кэВ), τ — время удержания энергии плазмы, характеризующее качество термоизоляции (с). Для токамаков при концентрации плазмы $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и средней температуре 8 кэВ (~90 млн градусов) время удержания τ должно быть не менее 6 с. Это и было продемонстрировано в экспериментах на американской установке TFTR, а затем — на европейской JET и японской JT-60. Как параметры плазмы в токамаках приближаются к значениям, которых надо достичь, чтобы обеспечить горение стационарной термоядерной реакции, показано на рис.7, 8 [15, 16].

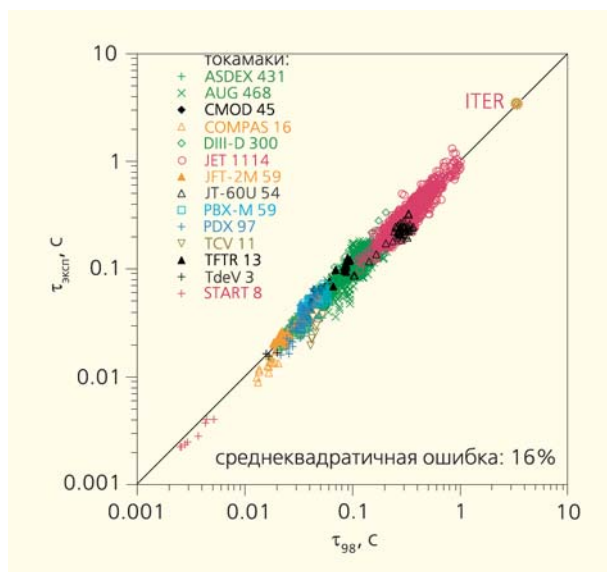


Рис.7. Сравнение времени удержания тепловой энергии плазмы $\tau_{\text{эксп}}$ с эмпирической масштабной зависимостью, τ_{98} , связывающей время с параметрами установки.

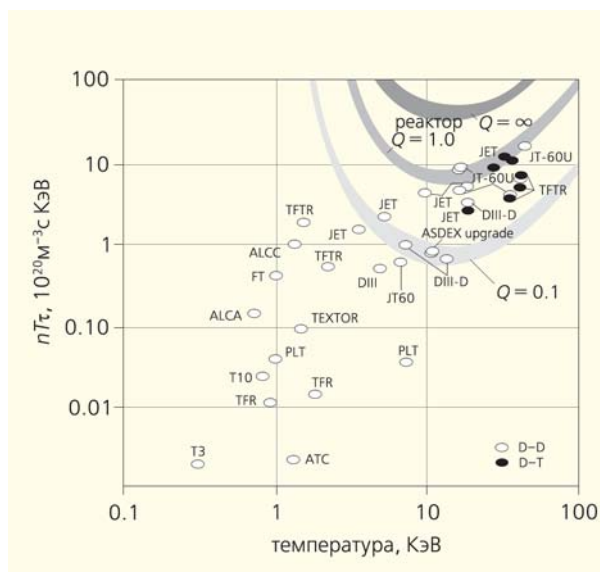


Рис.8. Экспериментальные значения $nT\tau$ в зависимости от центральной ионной температуры. Показаны зоны с величинами коэффициента усиления затраченной мощности 0.1; 1.0 и ∞ .

Грандиозные успехи физики и техники токамаков позволили США, Японии и Евросоюзу принять выдвинутое Е.П.Велиховым от имени СССР предложение о создании Международного термоядерного реактора ИТЭР [16, 17]. Позже к этим странам присоединились Китай, Корея и Индия. В настоящее время Международная организация ИТЭР (МО ИТЭР) в Кадараше (Франция) ведет строительство комплекса ИТЭР (рис.9). С участием домашних агентств стран-участниц МО ИТЭР организует изготовление систем и компонентов токамака. Согласно последнему графику, физический пуск планируется в 2021 г., а работа с тритием, так называемая активная фаза функционирования ИТЭР, намечена на 2027 г. В активной фазе мощность термоядерных реакций будет достигать 500 МВт, из них в нейтронах около 400 МВт [18]. Таким образом, ИТЭР продемонстрирует, что, как и полагали пионеры УТС, токамаки могут быть мощными источниками нейтронов. Энергия термоядерных нейтронов преобразуется в бланкете в тепло и далее в электричество. Термоядерные нейтроны могут также использоваться для наработки ядерного топлива (плутония из ^{238}U и ^{235}U из тория), для утилизации (трансмутации) долгоживущих высокоактивных продуктов облученного ядерного топлива, а также в подкритических реакторах деления для производства энергии.

Вопрос об использовании токамаков как источников нейтронов для расширенной наработки ядерного топлива вновь (после МТР) возник в 1970-х годах, когда была поставлена задача быстрого развития атомной энергетики в Советском Союзе.

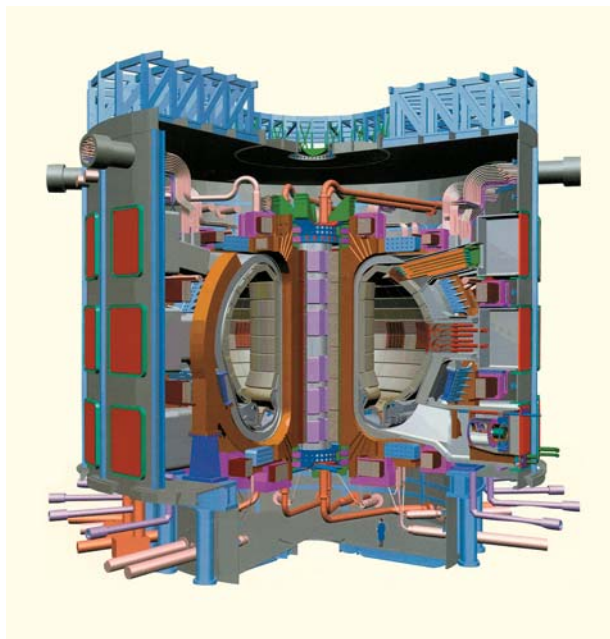


Рис.9. Токamak ИТЭР — крупнейший современный международный научно-технический проект.

Под руководством Велихова, Головина и впоследствии В.В.Орлова в 1970—1980-х годах был разработан ряд проектов термоядерных реакторов на основе токамаков: демонстрационный (Т-20), гибридный (ГТРТ) и опытный (ОТР) [17]. Наиболее мощный из них — гибридный (синтез—деление) реактор-токамак ГТРТ имел следующие плазмозфизические параметры: $R = 6.4$ м, $a = 1.5$ м, $B_T = 6.0$ Тл, $I = 9.3$ МА, $n = 0.8 \cdot 10^{20}$ м $^{-3}$, $T_e = T_i = 11$ кэВ, тепловая мощность $W_{\text{тепл}} = 6.9$ ГВт. Главной характеристикой служит количество нарабатываемого Pu. При загрузке в бланкет гибридного реактора 1110 т естественного урана будет произведено 4.2 т плутония в год. Обращает на себя внимание близость ряда базовых параметров МТР, ГТРТ и ИТЭР: $R = 6.2$ м; $a = 2.0$ м; $B_T = 5.3$ Тл; $I = 15$ МА, $n = 10^{20}$ м $^{-3}$, одинаковые электронная и ионная температуры $T_e = T_i = 20$ кэВ, термоядерная мощность $W_{\text{я}} = 500$ МВт, $t = 400$ с, что свидетельствует о научной прозрачности Курчатова, который уже тогда понимал, какими должны быть масштабы установок с использованием энергии управляемого термоядерного синтеза.

По причинам политического характера, связанным с подписанием Договора о нераспространении ядерного оружия, проект ОТР в СССР был закрыт. Были также остановлены аналогичные проекты, разрабатывавшиеся в США.

Несмотря на прекращение работ в этом направлении, интерес к токамакам как к источникам термоядерных нейтронов (ТИН) не спал. Ведущие центры в области УТС разрабатывали концепции токамаков не только для исследований процессов зажигания термоядерных реакций (FIRE), но и в качестве источников нейтронов (STF, JUST) для испытаний материалов и компонентов будущих термоядерных реакторов при высоких нейтронных потоках. Большое внимание также уделялось возможности использования токамаков — источников нейтронов для решения ряда важных задач ядерной энергетики, например для утилизации высокоактивных продуктов отработанного ядерного топлива путем трансмутации (JUST-T, CFNS, SABR).

По мере развития работ по этому направлению, а также из-за задержек в реализации международного проекта ИТЭР и нерешенности проблем материалов, обеспечивающих стационарность работ для ДЕМО, в мировых термоядерных центрах все более активно обсуждается возврат к гибридным системам как к наиболее быстрому пути практического использования энергии УТС.

В нашей стране работы в этом направлении были вновь начаты в 1995 г. Велихов предложил рассмотреть вопрос, могут ли быть в компактных токамаках (с аспектным отношением 1.6—2.2 и умеренными размерами) реализованы условия возбуждения и поддержания стационарных термоядерных реакций с коэффициентом усиления затраченной мощности $Q = 1-10$. Такие источни-

ки термоядерных нейтронов могли бы стать важным фактором в развитии ядерной энергетики на новом уровне (сочетание безопасности и топливного обеспечения).

В помощь ядерной энергетике

Кооперация российских институтов (НИЦ «Курчатовский институт», ГНЦ РФ ТРИНИТИ, НИИЭФА, Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им.Н.А.Доллежалы (НИКИЭТ), Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им.А.А.Бочвара) разработала на основе международной базы данных и моделирования несколько концептуальных проектов компактных ТИН. Прделанный анализ позволил конкретизировать область параметров, а также оценить объемы, последовательность и сроки выполнения работ. В одном из вариантов ТИН при стационарном потоке нейтронов 0.2 МВт/м^2 возможна наработка 36 кг Pu и $23 \text{ кг } ^{235}\text{U}$ в год. Результаты нашли отражение в предложениях межведомственной комиссии ГК «Росатом» в 2009 г. и в планах работ, утвержденных ГК «Росатом» и принятых правительством (для исполнения пока только в рамках Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения» — ФЦП ЯЭНТП). Первым шагом служит перевооружение токамака Т-15 с модернизацией электромагнитной системы, вакуумной камеры, системы электропитания и инженерно-технического обеспечения установки. Это задание, в соответствии с утвержденным проектом технического перевооружения комплекса Т-15, выполняется в НИЦ «Курчатовский институт» с 2011 г. В 2012 г. в НИИЭФА уже приступили к изготовлению электромагнитной системы (ЭМС) и вакуумной камеры Т-15. Кроме задачи поддержки проекта ИТЭР, у токамака Т-15 есть другая цель — стать водородным прототипом демонстрационного ТИН для гибридного реактора — наработчика ядерного топлива или трансмутатора. В 2012 г. Курчатовский институт при участии НИКИЭТ и НИИЭФА разработал эскизный проект демонстрационного ТИН (рис.10). В следующие два года совместными усилиями подразделений нашего института, а также институтов и проектных организаций ГК «Росатом» должен быть выполнен технический проект ДемоТИН, включающий плазмозащитную и ядерно-технологические части. Уровень проблем, связанных с первой из них, в настоящее время определен. В то же время разработка ядерно-технологической части ставит ряд сложнейших вопросов, которые требуют проведения серьезных НИР и ОКР при соответствующей финансовой поддержке. Финансирование этих работ, к сожалению, в федеральной программе не предусмотрено. Есть надежда, что ГК «Росатом» и Минобрнауки совмест-

но смогут решить этот вопрос. Важный фактор реализации задачи проекта — наличие НИИЭФА, созданного для решения задачи электромагнитного разделения, который выступает единым центром проектирования и изготовления уникальных электрофизических установок и оборудования. Совершенно очевидно, что только путем укрепления этого института и развития в нем научной, конструкторской, технологической и производственной составляющих можно решить задачи национальной программы УТС.

В последнее время, как следствие аварии на атомной станции «Фукусима», вновь вспыхнула жесткая дискуссия о будущем ядерной энергетики. На повестку дня опять поставлен принципиальный вопрос: способна ли атомная энергетика полностью избежать аварий с катастрофическими последствиями для населения и экологии? Ряд стран планируют полностью от нее отказаться, выводя из эксплуатации действующие атомные электростанции. Ответом на этот вопрос может быть предложение сотрудников НИЦ «Курчатовский институт»: только гибридная система (синтез—деление) с подкритическим бланкетом на основе жидкосолевых технологий поможет реализовать так называемую зеленую ядерную энергетику. В жидкосолевом гибридном токамаке-реакторе (Molten Salt Hybrid Tokamak — MSHT) жидкая соль при температуре $500\text{--}600^\circ\text{C}$, содержащая растворенное ядерное топливо, постоянно прокачивается через активную зону, одновременно выполняя функцию теплоносителя. Благодаря непрерывной циркуляции растворенного топлива и продуктов деления возможны коррекция состава

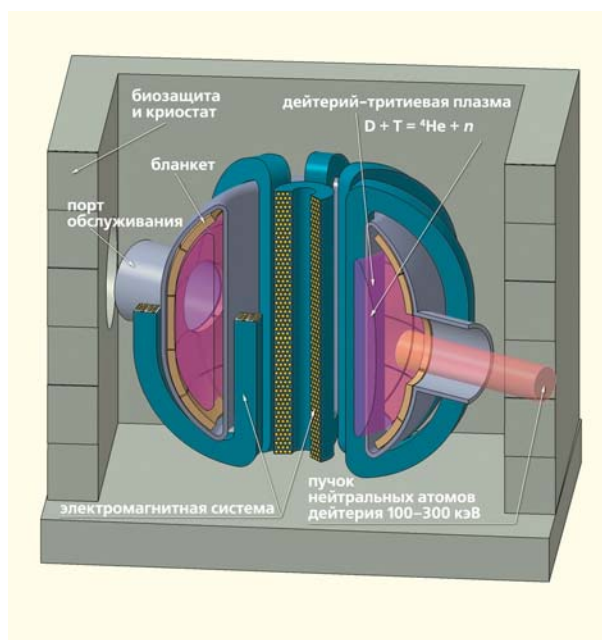


Рис.10. Термоядерный источник нейтронов со сверхпроводящей электромагнитной системой.

ва и постоянная очистка от радиоактивных веществ, что решает проблему съема остаточного энерговыделения. MSHT может работать в нескольких режимах: как источник энергии и как наработчик топлива в U—Pu- и Th—U-циклах. Он также способен обеспечить замкнутость топливного цикла. Достоинство жидкосолевой технологии — отсутствие повышенного давления в первом контуре гибридного реактора, что позволяет снизить риски. Комплекс MSHT может избавить ядерную энергетику от двух фундаментальных пороков, которые представляют практически неустранимую угрозу катастрофических аварий, — от потенциального неконтролируемого разгона и потери теплоносителя.

В настоящее время ИТЭР — наиболее физически обоснованный и технологически подготовленный проект источника термоядерных нейтронов, который способен обеспечить на бланкете поток $2 \cdot 10^{15}$ н/с·м² в течение 400-секундного цикла. Это-

го вполне достаточно для демонстрации как наработки Pu и ²³³U, так и производства энергии. Именно поэтому Велихов предложил использовать ИТЭР в качестве основы для демонстрации зеленой ядерной энергетики на базе жидкосолевой технологии, т.е. в качестве ДемоMSHT. В результате ИТЭР продемонстрирует два основных направления УТС — «чистое» и гибридное.

* * *

Нет никаких сомнений, что оба главных направления мирного использования энергии термоядерного синтеза в ядерной энергетике, которые с самого начала определил и поддержал Курчатов, будут доведены до практического воплощения. Для этого российским ученым и инженерам необходимо предпринять усилия для решения тех грандиозных задач по освоению ядерной и термоядерной энергетики, решение которых завещал великий ученый. ■

Литература

1. Курчатов И.В. Собрание научных трудов: В 6 т. Т.3: Атомный проект. Ядерные реакторы / Отв. ред. Н.Н.Пономарев-Степной; сост. Р.В.Кузнецова, В.К.Попов, Н.В.Селезнева. М., 2009.
2. Изотопы: свойства, получение, применение / Под ред. В.Ю.Баранова. М., 2000.
3. Записка И.В.Курчатова Л.П.Берии об ученых, привлечение которых необходимо для работ по проблеме, с рекомендацией назначить Л.А.Арцимовича на роль руководителя 24 ноября 1944 г. Сов. секр. // Атомный проект СССР. Кн.1. Ч.2. М.; Саров, 1999. С.162—164.
4. Dempster A.J. A new method of positive ray analysis // Phys. Rev. 1918. V.11. №4. P.316—325.
5. Шемя М., Перье Ж. Разделение изотопов. М., 1980.
6. Мартыненко Ю.В. Электромагнитное разделение изотопов // Наука в России. 2009. №6. С.54—59.
7. Докладная записка М.Г.Первухина, И.Г.Кабанова, И.В.Курчатова, Л.А.Арцимовича и Г.В.Алексенко Л.П.Берия от 16 сентября 1946 года. Сов. секр. Особая папка // Атомный проект СССР. Т.2. Кн.3. М.; Саров, 2002. С.490—491.
8. Морозов П.М., Маков Б.Н., Иоффе М.С., Фрадкин Г.Н. // Труды II Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958 г. Доклады советских ученых. 1959. Т.6. С.111.
9. Сахаров А.Д. Воспоминания. Ч.1. Гл.9. М., 2011.
10. Сахаров А.Д. Теория магнитного термоядерного реактора // Физика плазмы и проблема управляемых реакций / Отв. ред. М.А.Леонтович. М., 1958. Т.1. С.20.
11. Курчатов И.В., Головин И.Н. О возможности создания магнитных термоядерных реакторов // Курчатов И.В. Собрание научных трудов: В 6 т. Т.5: Управляемый термоядерный синтез / Отв. ред. Е.П.Велихов; сост. Р.В.Кузнецова, В.К.Попов, Н.В.Селезнева. М., 2012. С.77—81.
12. Арцимович Л.А., Бобровский Г.А., Горбунов Е.П. и др. Экспериментальные исследования на установках токамак // Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res. 1969. V.1. P.157—172.
13. Peacock N.J., Robinson D.C., Forrest M.J. et al. Measurement of the electron temperature by Thomson scattering in tokamak T3 // Nature. 1969. V.224. №5218. P.488—490.
14. Арцимович Л.А., Анашкин А.М., Горбунов Е.П. и др. Исследование нейтронного излучения плазмы в установке токамак Т-3А // ЖЭТФ. 1971. Т.61. №2. С.575—581.
15. Unterberg B., Samm U. Overview of tokamak results // Transactions of fusion science and technology. 2006. V.49. P.415—424.
16. ITER Physics Basis Editors et al. Chapter 1: Overview and summary // Nucl. Fusion. 1999. V.39. P.2137—2174.
17. Голубчиков Л.Г. ИТЭР. Решающий шаг. М., 2004.
18. Mukhovatov V., Shimada M., Lackner K. et al. Chapter 9: ITER contribution for Demo plasma development / In Progress in ITER Physics Basis // Nucl. Fusion. 2007. V.47. P.S404—S414.

Перспективы ядерной энергетики

Я.И.Штромбах, А.Ю.Гагаринский

Наличие достаточного и стабильного энергоснабжения всегда имело фундаментальное значение для развития общества. Рост мирового валового продукта, как и ВВП конкретной страны, четко коррелирует с ростом энергопотребления.

Современное потребление энергетических ресурсов сосредоточено главным образом на органическом топливе, запасенном за миллионы лет «удачно» расположенной в Солнечной системе планетой. Возобновляемые ресурсы (вода, ветер, геотермальные источники, энергия океана и т.д.) и деление ядер включены в «энергетическую корзину» пока в относительно скромных масштабах (рис.1).

В течение почти всей своей истории человечество развивалось, не расходуя исчерпаемые источники, пользуясь только возобновляемыми процессами, питаемыми солнечной энергией. Сегодня же огромный и прогнозируемый на многие годы поток потребляемой энергии определяется ископаемым топливом: нефтью, газом, углем.

Энергетические сценарии

За последние 30 лет XX в. мировое потребление энергетических ресурсов выросло почти в два раза и к 2012 г. составило 13 млрд т нефтяного эквивалента.

© Штромбах Я.И., Гагаринский А.Ю., 2013



Ярослав Игоревич Штромбах, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по направлению «Ядерные технологии» НИЦ КИ — директор Курчатовского центра ядерных технологий. Лауреат Государственной премии Российской Федерации в области науки и технологий. Президент Ядерного общества России. Занимается ядерной энергетикой, реакторным материаловедением, радиационными нанотехнологиями.



Андрей Юрьевич Гагаринский, доктор физико-математических наук, советник директора НИЦ КИ. Награжден орденами Мужества и «Знак почета». Вице-президент Ядерного общества России. Область научных интересов — системные энергетические исследования, ядерная энергетика.

По данным Мирового энергетического агентства Организации экономического сотрудничества и развития (МЭА ОЭСР), органическое топливо составляет порядка 90% в структуре мирового потребления первичной энергии, причем 80% из них приходится на ископаемую органику (нефть, газ, уголь) и 10% на биотопливо (растения, отходы животноводства и др.). Последнее используется для обогрева и приготовления пищи в развивающемся мире, заметной части которого пока не доступно даже электричество. На все остальное — атомную энергию, гидроэлектростанции, другие возобновляемые источники — приходятся те же 10% (см., например, [1]).

Сегодня ископаемое углеводородное топливо — главный источник энергии, и будет оно таковым еще долго. «На нефтяной игле» человечество сидит очень надежно: нефть на 95% покрывает все транспортные потребности в мире.

Угрозу цивилизации со стороны сжигания ископаемой органики видят не столько в принципиальной исчерпаемости этого ресурса.

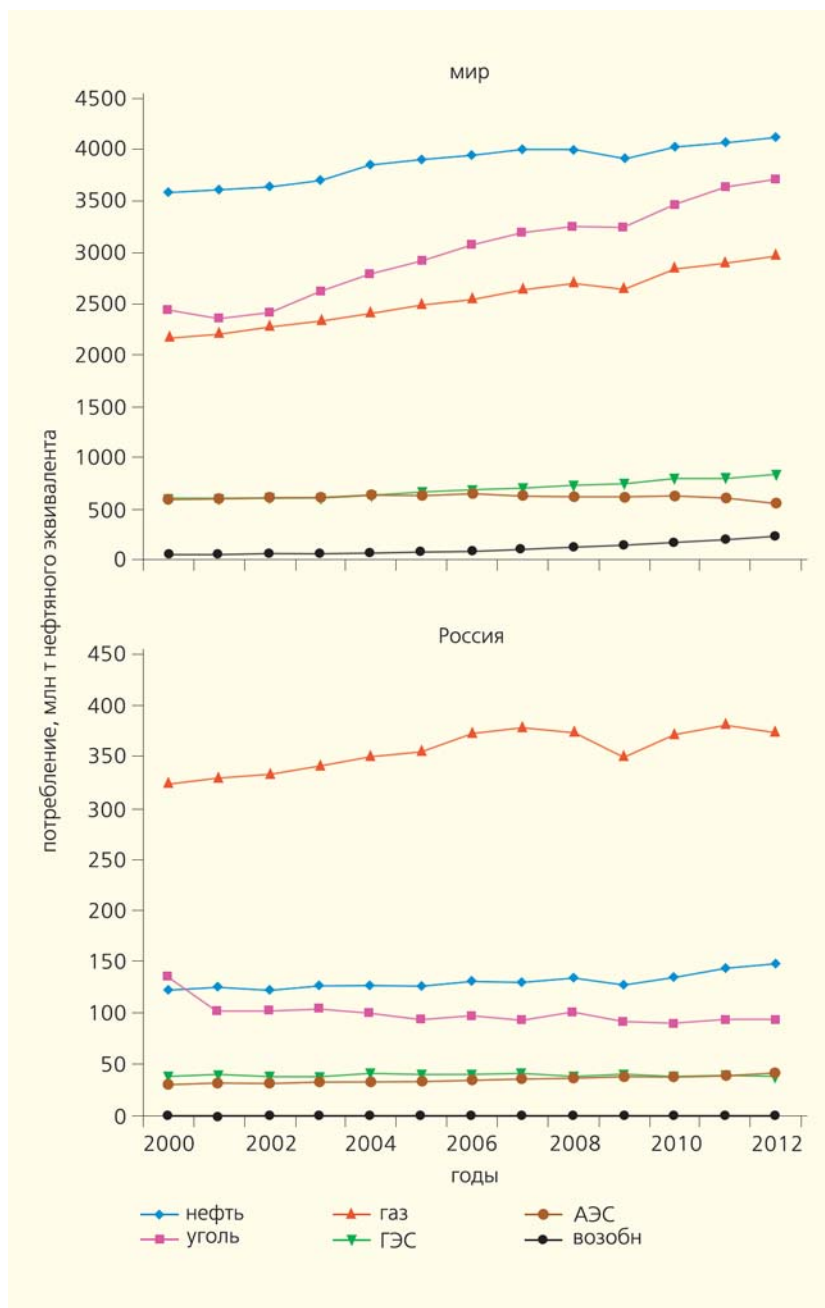


Рис.1. Потребление первичной энергии в XXI в.

са, сколько в его угрожающем влиянии на климат планеты. Глобальное потепление в связи с большим антропогенным воздействием современной экономики на окружающую среду — один из наиболее веских аргументов в пользу развития как возобновляемой, так и ядерной энергетики.

Надежды решить энергетические проблемы человечества за счет возобновляемых источников энергии и при этом противодействовать климатическим изменениям широко распространены в современном обществе и популярны среди политиков (но не среди специалистов-энергетиков).

Возобновляемые источники энергии (без гидроэнергетики и биомассы) в 2012 г. обеспечивали около 2% потребностей человечества в первичной энергии. Однако все ближние прогнозы указывают на рост их доли в общей выработке электричества, особенно стремительный в Западной Европе. Там развитие соответствующих технологий имеет большую государственную поддержку, хотя их применение не может гарантировать ни стабильной генерации, ни экономически оправданных тарифов.

Популярна идея добиться подавляющего преимущества возобновляемой энергетики над всеми остальными источниками энергии уже к середине века, с прекращением использования атомной энергии уже к 2030 г. Мировое экспертное сообщество обоснованно отказывается признать подобные сценарии реалистичными.

Последние 50 лет в мире фиксируются статистические данные о росте мировой экономики и стоимости энергии, которая этот рост обеспечивает. Как показано в [2], если вместо «среднестатистических» 5% цена энергии возрастает до 10% от мирового валового продукта, это совпадает по времени с мировым кризисом. Так было и в 1980-х годах, и в 2009 г.

Дорогая энергия просто недоступна современной экономике. Этот эмпирический факт, подтвержденный полувековым опытом, позволяет «оценить сверху» приемлемость для человечества известных ему источников. Темпы роста мировой

экономики довольно устойчивы. Это значит, что доступные сегодня и в перспективе затраты на необходимое людям количество энергии можно более или менее надежно рассчитать. Тогда появляется база для оценки возможностей различных энергетических технологий, так как цены единицы энергии от разных источников известны энергетикам неплохо.

И получается, что справиться с ценой возобновляемой энергетики (даже при очень оптимистической оценке ее стоимости) человечество сможет, лишь утроив либо валовой продукт, либо

долю в нем энергетических затрат. Поэтому ожидать «полной победы» возобновляемых источников, даже с учетом повышения энергетической эффективности экономики, по крайней мере в этом веке не приходится.

Согласно достаточно консенсусным реалистическим сценариям мирового энергетического развития, ответственные за эмиссию парниковых газов органические источники энергии (включая биомассу) до середины века останутся преобладающими в энергетическом наборе человечества: ископаемая органика — 60% (при стабилизации роли нефти и значительном росте потребления угля), биомасса — еще 10–15%, остальные возобновляемые источники — чуть больше биомассы.

Еще до середины века будет пройден максимум добычи нефти, несколько позже — природного газа, увеличится кратно добыча угля, примерно вдвое — мощности гидроэнергетики, примерно на порядок — использование возобновляемых источников энергии (главным образом ветровой энергетики). Однако даже при таком оптимистическом прогнозе роста практически всех энерготехнологий удовлетворить все возрастающие потребности человечества в первичной энергии в полном объеме будет исключительно сложно.

Ядерный выход

Перспективы ядерной энергетики в наибольшей степени зависят от политических решений. Тем не менее ядерный источник может рассчитывать к середине века на долю 10–15% в первичной энергии, а это уже трехкратный рост от современного состояния.

Сегодня ядерная энергетика — это апробированная, не дающая выбросов парниковых газов технология производства энергии, обеспечивающая в высшей степени стабильное энергоснабжение по сравнению с возобновляемыми источниками, доказавшая свою работоспособность и уже сейчас развернутая достаточно широко. Оценки возможного масштаба развития ядерной энергетики весьма противоречивы и сильно зависят от экспертных групп, которые ими занимаются. Исследования, представленные в МАГАТЭ экспертами из Курчатовского института в рамках Международного проекта по инновационным реакторам и топливным циклам (ИНПРО), дают следующие возможные сценарии ядерно-энергетического развития мира [3].

Низкий сценарий — 2000 ГВт(э) ядерных мощностей к концу века — предполагает, что доля ядерной энергетики в общем объеме энергопотребления сохранится примерно на современном уровне. Сферой использования атомной энергии останется электроэнергетика. Для минимального варианта развития ядерной энергетики без замыкания ядерного топливного цикла (т.е. возврата

в цикл воспроизводимого в реакторах ядерного горючего) практически нет перспектив сколь угодно масштабного ее использования за пределами XXI в.

Умеренный сценарий — 5000 ГВт(э) — предполагает, что масштаб роста ядерной энергетики будет ориентироваться на замещение различных видов органического топлива в электроэнергетике, и, возможно, самой серьезной мотивацией такого решения станут экологические преимущества.

Высокий вариант — 10 000 ГВт(э) — ориентируется на крупномасштабное развитие ядерной энергетики с быстрыми темпами во второй половине текущего столетия. При этом атомная энергия, кроме сферы электроэнергетики, начнет использоваться и для неэлектрических целей (для производства пресной воды, искусственно-моторного топлива, в технологических процессах, требующих высокого температурного потенциала).

Отметим, что данный сценарный вариант развития ядерной энергетики в текущем столетии следует рассматривать как верхнюю границу ее возможностей. В то же время такой высокий масштаб ее распространения не нужно считать за предельным с точки зрения удовлетворения энергетических потребностей, которые могут сложиться в мире к концу века. Нарастание проблем, связанных с использованием органического топлива, только повышает требования к развитию альтернативных энергоисточников. В таком «максимальном», но еще теоретически возможном сценарии развития атомная энергия давала бы к концу века порядка 25% первичной энергии для мировой экономики.

Принципиально то, что существует четкая корреляция между масштабами развития и структурным наполнением ядерной энергетики. Для реализации достаточно высоких ядерно-энергетических сценариев интенсивные ядерные программы должны стартовать уже сейчас, а перестройка структуры на замкнутый топливный цикл — в ближайшие десятилетия.

Энергетический комплекс России занимает в настоящее время принципиальные позиции в мире и подвержен тем же эволюционным тенденциям, что и мировая энергетика (конечно, с учетом особенностей российской ресурсной базы и современного состояния отечественной экономики).

Страна, при всех ее огромных запасах углеводородов, стратегически заинтересована в ускоренном развитии собственной ядерной энергетики, чтобы обеспечить энергетическую безопасность, сохранить и эффективно использовать свои ресурсы, увеличить потенциал экспорта природного газа, а также экспорта высокотехнологичной продукции машиностроения.

Россия — один из основных поставщиков энергоресурсов на мировой энергетический ры-

нок; в этом качестве она обеспечивает энергетическое благополучие практически всего Европейского континента, включая и страны бывшего СССР. Энергетическая политика России ориентирована на расширение поставок энергоресурсов на мировой рынок, что в значительной степени оказывает влияние на гарантии экономической стабильности и устойчивости роста отечественной экономики в ближайшей перспективе, особенно в свете тенденции удорожания энергетических ресурсов и затруднения доступа к ним.

В то же время сырьевая обеспеченность экономики страны на ближайшие десятилетия позволяет «царствовать, лежа на боку» — не форсировать развитие современных высокотехнологичных производств. Это порождает негативные тенденции и диспропорции, в том числе и в социальной сфере, вымывает из отечественной экономики стимулы к модернизации производства, консервирует отставание в передовых технологиях.

Наш мирный атом в ближней перспективе

Ядерная энергетика — высокотехнологичная сфера, способная преодолеть геологические ограничения и негативные географические факторы, и ее адекватное и эффективное развитие может стать локомотивом перехода нашей страны с ее уникальными ресурсными возможностями и проблемами к инновационному пути развития.

Россия примерно так и поступает, развернув сегодня второе в мире (после Китая) ядерное

строительство. События на АЭС «Фукусима» не привели к какому-либо изменению российских генерирующих мощностей и не оказали заметного влияния на планы нового ядерного строительства в ближайшей перспективе до 2030 г. (рис.2).

Программа роста установленных мощностей ядерной энергетики России предполагает их увеличение до 50—60 ГВт к 2030 г. Одновременно с этим Россия реализует намерения в течение того же временного интервала построить за пределами своей территории около 20 ГВт ядерно-энергетических мощностей.

В российском ядерном сообществе достигнут консенсус относительно двух принципиальных положений, выдвинутых Курчатовским институтом:

- формирование крупномасштабной ядерной энергетики невозможно без организации замкнутого топливного цикла с переработкой ядерного топлива и надежным захоронением радиоактивных отходов;

- на первом этапе до 2030 г. практически единственной технологической базой для роста установленных мощностей будут реакторы с водой под давлением (ВВЭР). Реакторы на быстрых нейтронах в этом временном диапазоне смогут быть представлены единственным блоком или, в лучшем случае, малой серией установок (БН-800, БН-1200).

Таким образом, основу российской, как и мировой, ядерной энергетики в настоящее время составляют корпусные водоохлаждаемые реакторы на тепловых нейтронах. В России весомую долю ядерного электропроизводства пока обеспечивают каналные графитовые реакторы РБМК, но они до-

рабатывают свой ресурс, а перспектива связывается с прогрессом направления ВВЭР. И хотя базовой линией пока остается разработка блоков большой мощности (1200—1300 МВт(э)), уже на видимом горизонте просматривается, что она будет дополнена серийным промышленным производством реакторов средней и малой мощности для регионального и локального энергоснабжения. Создание системы ядерной энергетики средних и малых мощностей в топливно-энергетическом комплексе России опирается на наличие достаточного потенциала необходимых реакторных технологий и соответствующего машиностроения.

Россия обладает уникальным опытом промышленного серийного производства ядерных энергетических установок для атомных подводных лодок, над-

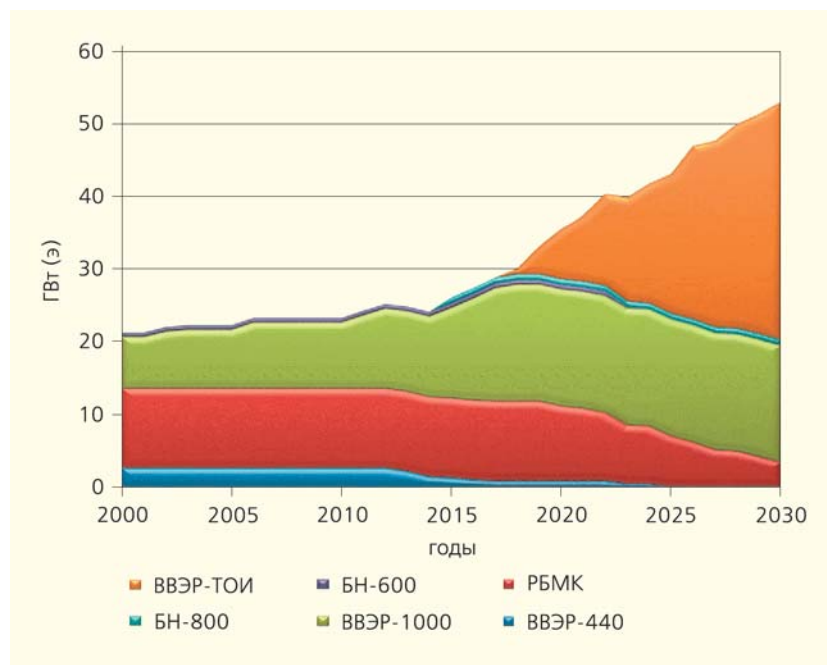


Рис.2. Установленные мощности АЭС России в краткосрочной перспективе.



Российская экспансия на рынок АЭС развивающихся стран. Первый блок АЭС «Куданкулам» в Индии запущен в 2013 г.

водных кораблей, ледоколов и судов, общая наработка которых превышает 6000 реакторо-лет, а также мощной научной, проектной и производственной инфраструктурой атомного судостроения, которая может быть вовлечена в общегражданское ядерное энергетическое строительство. На базе технологий атомного судостроения предложены ядерные энергетические установки и плавучие/наземные атомные электростанции малой (от 6 до 100 МВт(э)) и средней (до 600 МВт(э)) мощности. Это открывает путь к серийному индустриальному производству реакторных установок таких мощностей с чрезвычайно высоким уровнем безопасности и надежности, в том числе для снабжения стран, которые пожелают их приобрести.

Уже на этом этапе (до 2030 г.) в структуре ядерной энергетики должно создаваться новое технологическое ядро с реакторами, использующими топливо из рециклированного урана и плутония, с соответствующей опытно-промышленной инфраструктурой замкнутого топливного цикла. Тепловые и быстрые реакторы будут не конкурировать друг с другом, а друг друга дополнять, выполняя функции производства энергии и воспроизводства ядерного топлива, причем их оптимальное соотношение будет определяться критериями экономичности и безопасности. Масштаб ядерной энергетики, при котором замыкание

ядерного топливного цикла становится экономически оправданным, оценивается примерно в 30 ГВт. Если первый этап замыкания ядерного топливного цикла будет реализован по оптимистическому сценарию, количество отработавшего ядерного топлива в хранилищах начнет снижаться примерно с 2025 г.

Стратегическое направление модернизации ядерной энергетики — переход к реакторам, способным снабжать всю ядерно-энергетическую систему новым топливом, которое превращает ее в квазивозобновляемую, было задумано практически на старте мирного использования атома. За 60 лет мировым реакторным сообществом (начало было положено в США, но лидерство по результату, безусловно, принадлежит России и Франции) был разработан и реализован тип реактора, обеспечивающий эту линию развития, — реакторы на быстрых нейтронах, охлаждаемые натрием.

Роль России в развитии этого направления весьма впечатляюща: только у нас имеется двадцатилетний опыт эксплуатации реактора БН-350 с опреснительной установкой, более 30 лет успешно эксплуатируется реактор БН-600. Этот подход поддерживается практически всем «реакторным миром»: в Индии, Китае, Японии, в той же Франции, после многих лет отторжения вновь пробивает себе дорогу в США.

Научный задел по высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам, предназначенным для производства высокопотенциального тепла (950°C) и электроэнергии, в стране составляет около 50 лет научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок. Работы доведены до технических проектов для энерготехнологического применения, а также действующего прототипа космической двигательной установки с уникальной температурой на выходе 3100 К. Выход мирного атома за пределы электроэнергетики, в область широкого набора энергетических технологий, связывается именно с этим направлением.

Так в общих чертах выглядит стратегическая линия технологического реакторного развития ядерной энергетики, недавно вновь проанализированная курчатовскими экспертами [4].

Дальние горизонты

Взгляд из Курчатовского института на «дорожную карту» освоения ядерных технологий в России представлен на рис.3. Он учитывает как федеральные программы и решения Росатома, так и инициативные проекты разной степени обоснованности, предлагаемые российским ядерным сообществом.

Ключевой элемент технологической платформы ядерной энергетики — реакторы для генерации энергии — выбраны человечеством в довольно узком спектре из «океана» возможностей. С учетом имеющегося опыта выделились несколько типов реакторов, которые и рассматриваются в качестве перспективных, по крайней мере на ближайшие десятилетия: реакторы на тепловых нейтронах (в основном легководные, отчасти тяжеловодные) и реакторы на быстрых нейтронах (охлаждаемые натрием). В ближней перспективе возможны реакторы, охлаждаемые свинцом-висмутом (для малых и средних мощностей), а в дальней — жидкотопливные реакторы (на расплавах солей) для выжигания долгоживущих изотопов и эффективной утилизации минорных актинидов.

Вместе с тем как на концептуальном уровне, так и на уровне НИР и ОКР в ядерной энергетике не иссякает поток предложений по различным конструкциям, включая довольно экзотические, которые, по замыслу разработчиков, решали бы все проблемы, причем раз и навсегда.

Наиболее известно среди российских специалистов предложение о разработке и реализации проекта быстрого реактора со свинцовым теплоносителем, являющегося, по мнению разработчиков, самым безопасным из всех известных и к тому же способным заменить собой практически всю существующую структуру ядерной энергетики. В отличие от других альтернативных вариантов реакторов на быстрых нейтронах, техническая осуществимость реакторов со свинцовым теплоносителем пока экспериментально не доказана.

Для отказа от переработки облученного топлива предлагаются также «бесхимические бридеры», куда загружается отвалный или слабо обогащенный уран, и где затем накапливаются и выгорают изотопы плутония и других актинидов (до такой глубины выгорания, при которой дальнейшая переработка топлива считается нецелесообразной). К этому же направлению относятся реакторы, работающие по типу волны горения ядерного топлива. Такая волна распространяется по реактору от топлива обогащенного, служащего для поджига, в сторону природного или отвалного урана, в котором постепенно накапливаются делящиеся изотопы, затем они в нем сгорают, а волна горения уходит дальше («реакторы с бегущей волной»). Подобные реакторы в практической реализации требуют еще более сложных технологических решений, в частности по регулированию нейтронного поля и отводу энергии.

Предлагается также использовать электро-ядерные установки, в которых протоны разгоняются до энергии выше 1 ГэВ и направляются в мишени, где рождаются порядка 20–30 нейтронов на один протон пучка. Эти нейтроны предлагается использовать как для наработки ядерного горючего, так и для трансмутации опасных радионуклидов. За предложением стоит красивая физическая идея, но, если такие установки рассматривать в качестве энергетических, видно множество трудностей, которые пока не понятно как преодолеть.

Современные достижения физики плазмы как в теории, так и в эксперименте, а также ход реализации международного проекта экспериментального термоядерного реактора ИТЭР дают основания полагать, что ядерная энергетика синтеза (термоядерная энергетика) может стать реальностью во второй половине XXI в. Правда, оценки показывают: суммарная электрическая мощность термоядерных станций, на которую, возможно, удастся выйти к концу столетия, находится на уровне не более 100 ГВт. Зато у термоядерных источников нейтронов есть значительные перспективы в плане улучшения нейтронного баланса ядерной энергетики деления. Этот вариант связан с развитием технологии термоядерного синтеза для целей производства нейтронов*. Идея использования термоядерного реактора как эффективного источника нейтронов (ТИН) для наработки ядерного топлива была высказана И.В.Курчатовым еще в начале в 1950-х годов, однако первая большая публикация относится к 1978 г. [5]. По инициативе курчатовских экспертов она вошла в проект ИНПРО по глобальному видению ядерно-энергетической системы XXI в. [3].

* Подробнее об этом см. статью Э.А.Азизова и Е.П.Велихова «От разделения изотопов до гибридного реактора» в этом номере журнала.

Производство нейтронов в термоядерном реакторе с последующим их использованием в преобразовании сырьевых материалов (урана-238 и тория-232) в делящиеся изотопы (плутоний-239 и уран-233) — очень серьезная альтернатива быстрым реакторам. Если нейтроны, предназначенные для производства нового топлива, генерируются в термоядерном реакторе, совокупная мощность такой энергетической установки будет примерно в 10 раз меньше мощности быстрого реактора. В этом случае в системе ядерной энергетики будут присутствовать тепловые реакторы разного назначения и небольшое количество термоядерных реакторов-гибридов, обеспечивающих наработку нового топлива из сырьевых изотопов.

Поскольку доля ТИН в системе невелика, их можно размещать на территориях очень небольшого количества стран. При использовании ТИН максимум годовой добычи природного урана и работы разделения может быть практически в два раза ниже, чем при использовании очень хороших быстрых реакторов в системе ядерной энергетики. Это принципиально облегчает решение проблем нераспространения и экологической приемлемости, поскольку и количество плутония, и особенно количество минорных актинидов при использовании ТИН с ториевым blanketом будет на несколько порядков меньше, чем при использовании уран-плутониевого ядерного топливного цикла с быстрыми реакторами.

Данный набор предложений и возможностей должен учитываться при формировании планов долгосрочных НИР и ОКР.

Важным инновационным потенциалом обладает быстро развивающаяся область конструирования реакторных материалов с заданными свойствами, что связано с выходом этих технологий на нануровень. Здесь расчет идет на развитие принципиально новых подходов в создании материалов для инновационной ядерной энергетики. В случае успеха мы получим новое ядерное топли-

во с повышенным энерговыделением и ресурсом, новые радиационно-стойкие конструкционные материалы, реакторные корпуса, мало подверженные радиационному охрупчиванию и обладающие малой наведенной активностью, нанокompозиты для защиты от излучения и многое другое.

Есть несколько задач, решение которых позволит ответить на принципиальные вопросы

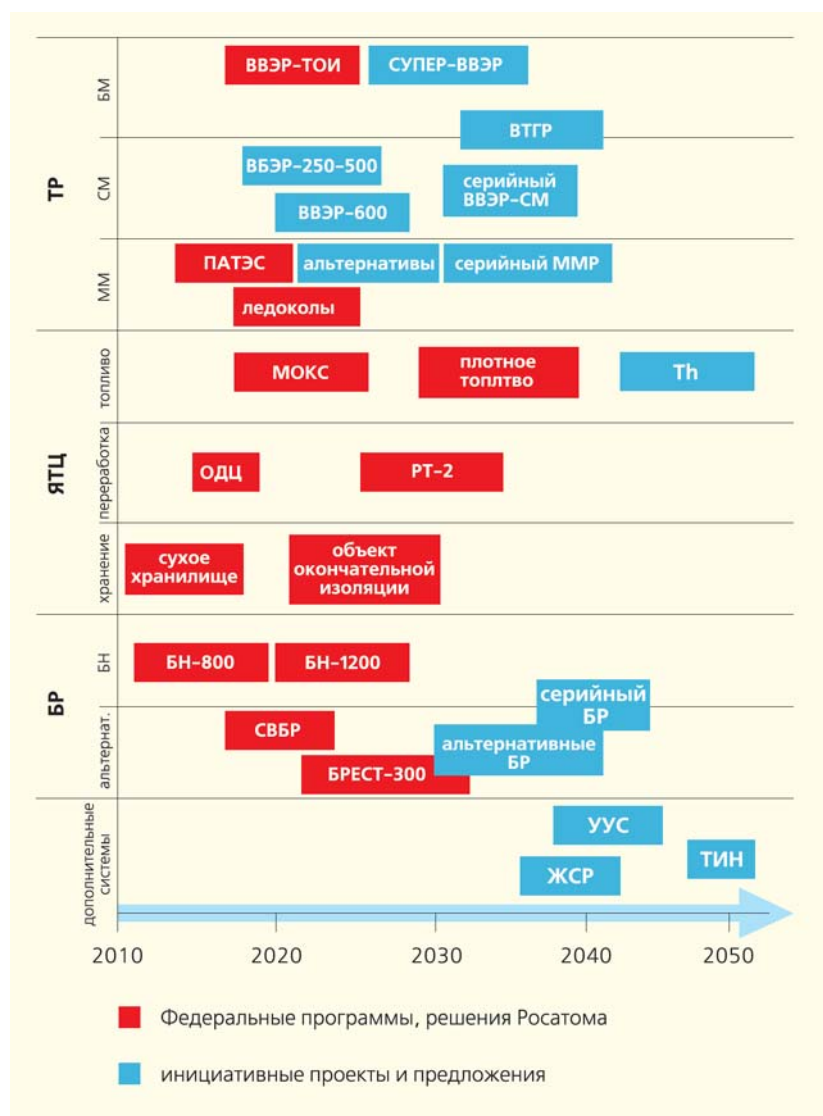


Рис.3. Дорожная карта освоения ядерных технологий в России.

ПАТЭС — плавучая атомная теплоэлектростанция;

ММР — реактор малой мощности;

МОКС — смешанное уран-плутониевое топливо;

Th — включение тория в ядерный топливный цикл;

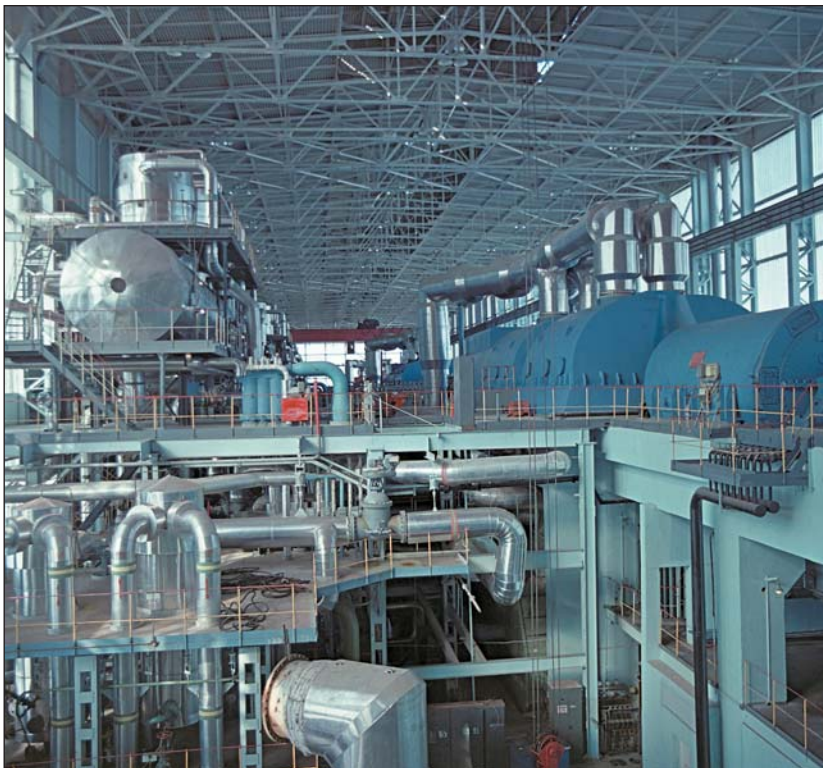
ОДЦ — опытно-демонстрационный центр;

СВБР — свинцово-висмутовый быстрый реактор;

УУС — ускорительно управляемые системы;

ЖСР — жидкосолевой реактор;

ТИН — термоядерный источник нейтронов.



Мирный атом за Полярным кругом. Машинный зал Кольской АЭС.

ядерной энергетики. Это, например, замена материала оболочек твэлов в водо-водяных реакторах на другой материал, который, с одной стороны, обладал бы низким сечением поглощения нейтронов, а с другой — исключал бы известную пороговую реакцию циркония с водой, усугубляющую аварийные ситуации в реакторах данного типа. Очевидно, поиск должен вестись в широком круге материалов, среди которых перспективным считается создание композита на основе карбида кремния (SiC).

По пути ухода от классических металлов в область, близкую к порошковой металлургии, развивается и технология оболочек твэлов быстрых реакторов. Так, предлагается переход к технологии дисперсного уплотнения ферритно-мартенситных сталей окислами редкоземельных металлов (ДУО). Этот материал показывает высокую устой-

чивость к распуханию до высоких доз облучения.

Разработка концепции конструирования реакторных материалов с заданными свойствами — актуальная задача создания прорывных технологий, для успешного решения которой уже получены достаточно обнадеживающие результаты при проведении соответствующих фундаментальных исследований. Исследования, ориентированные на поддержку инноваций в ядерной энергетике, и изучение природы ядерных взаимодействий и элементарных частиц могут вместе стать основой будущих прорывов в энергетике на новых физических принципах, поскольку они дают новые знания о природе атомной энергии и ядерных превращений.

* * *

Взвешенное сопоставление различных подходов и выбор практических путей и технических решений должны быть основными при формировании государственной стратегии развития ядерной энергетики. Ее следует основывать на принципиальных достоинствах ядерных технологий в энергообеспечении, а также на реальной гибкости и широких возможностях маневра в структуре ядерного топливного цикла и в преодолении экономических рисков. При этом необходимо обеспечить ядерную безопасность и экологическую приемлемость в согласии с международными тенденциями и практическими подходами.

Еще есть достаточно времени для выбора ядерного топливного цикла далекого будущего. Однако, учитывая инерционность развития ядерных технологий и занимающий многие десятилетия жизненный цикл ядерных установок, некоторые решения по принципиальному выбору придется принимать уже в ближайшие годы. ■

Литература

1. World Energy Outlook 2012, OECD/IEA. Публикация Международного энергетического агентства ОЭСР.
2. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. // Энергетика в экономике XXI века. М., 2010.
3. Nuclear Energy Development in the 21st Century: Global Scenarios and Regional Trends, IAEA Nuclear Energy Series, NP-T-1.8, 2010. Публикация Международного агентства по атомной энергии.
4. Алексеев П.Н., Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю. и др. О стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 года // Атомная энергия. 2011. Т.111. Вып.4. С.183—196.
5. Велихов Е.П., Глухих В.А., Гурьев В.В., Кадомцев Б.Б. Гибридный термоядерный реактор-токамак для производства делящегося вещества и электроэнергии // Атомная энергия. 1978. Т.45. Вып.1. С.3—9.

КИСИ вчера, сегодня, завтра

М.В.Ковальчук, В.В.Квардаков, В.Н.Корчуганов

Ряд прорывных научных открытий XX в. показал, что рентгеновское излучение, несомненно, — универсальный инструмент как для исследования материи, так и для развития новых технологий. С его помощью удалось увидеть, как на атомном уровне устроено вещество, в том числе биоорганического происхождения (белок, ДНК, вирус); расшифровать электронную зонную структуру; изучить поведение вещества в экстремальных состояниях; усовершенствовать технологии синтеза перспективных материалов микро- и наноэлектроники, космических и ядерных технологий; разработать новые методы медицинской диагностики и терапии; изучить механизмы функционирования лекарств и методы их целевой доставки и многое другое.

От рентгеновской трубки к синхротрону

До начала 1960-х годов в качестве источников рентгеновского излучения использовали рентгеновские трубки, в которых электроны, испущенные катодом, ускорялись в вакууме электрическим полем при пролете между катодом и анодом до энергий в десятки килоэлектронвольт, фокусировались и тормозились в материале анода. При этом возникало тормозное рентгеновское излучение с широким энергетическим спектром и появлялись узкие характеристические



Михаил Валентинович Ковальчук, член-корреспондент РАН, директор НИЦ КИ, руководитель межведомственной рабочей группы по направлению «Приоритетные и междисциплинарные научные исследования» Совета при Президенте РФ по науке и образованию, декан физического факультета Санкт-Петербургского университета. Лауреат премий правительства РФ в области науки и техники, в области образования, премии им.Е.С.Федорова РАН.

Кавалер орденов «За заслуги перед отечеством» III и IV степеней. Область научных интересов — кристаллография и кристаллохимия, физика конденсированного состояния, нанобиоорганические материалы и системы, применение рентгеновского, синхротронного излучения и нейтронов в материаловедении.



Владимир Валентинович Квардаков, член-корреспондент РАН, заместитель директора НИЦ КИ по синхротронно-нейтронным исследованиям, заместитель председателя Совета Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ). Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники. Занимается применением синхротронного излучения и нейтронов в материаловедении.



Владимир Николаевич Корчуганов, доктор физико-математических наук, заместитель директора НБИКС-Центра НИЦ КИ. Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники. Специалист в области физики пучков заряженных частиц, синхротронного излучения, динамики движения заряженных частиц.

© Ковальчук М.В., Квардаков В.В., Корчуганов В.Н., 2013

спектральные линии, сопутствующие переходам электронов внутри ионизованных атомов материала анода. Рассеяние этого излучения исследуемым образцом приводило к образованию разнообразных дифракционных картин, регистрируемых рентгеновской пленкой или детектором, которые и служили источником информации о структуре образца. В классическом случае дифракционная картина состоит из набора дополнительных рефлексов, возникающих в соответствии с условиями Брэгга для данной периодической структуры, когда рассеянное излучение отдельных атомов когерентно складывается.

Рентгеновские лучи не зря называют просвечивающими: они довольно слабо взаимодействуют с веществом, проникая на значительную глубину, в отличие от видимого излучения или пучков электронов. Следовательно, для образования сильных дополнительных рефлексов и формирования дифракционной картины излучение должно достаточно глубоко проникнуть в кристалл. Поэтому первоначально излучение рентгеновских трубок использовалось для изучения только объемных структур, кристаллов толщиной по крайней мере в несколько миллиметров. Таким образом, с одной стороны, рентгеновские лучи визуализируют атомную структуру вещества (благодаря тому, что длина волны сравнима с межатомным расстоянием), а с другой стороны, вещество должно быть кристаллическим и его должно быть много (иначе не будет рефлексов и дифракционной картины из-за небольшого процента рассеянных фотонов). При исследовании поверхностей, тонких слоев и тем более отдельных атомных слоев на поверхности кристалла или жидкости (объектов с относительно малым числом рассеивателей) кажется естественным попытаться повысить интенсивность рентгеновского излучения, падающего на единицу площади, т.е. увеличить количество рассеянных фотонов за счет увеличения числа падающих.

Однако повышение интенсивности и яркости рентгеновских трубок путем увеличения тока электронного пучка, напряжения между катодом и анодом трубки и оптимизации фокусировки наталкивается на ограничение, связанное с нагревом и разрушением анода, поскольку эффективный отвод тепла от узкого пятна фокуса электронного пучка затруднен. Многочисленные технические усовершенствования рентгеновских трубок, включая использование вращающегося анода, дали за 100 лет выигрыш в яркости излучения всего на два порядка величины.

При использовании другого механизма, когда генерация излучения происходит при движении заряженных частиц по криволинейным траекториям под воздействием внешних электрического и магнитного полей, можно существенно увеличить яркость фотонного пучка. Например, в постоянном магнитном поле заряженная частица дви-

жется по круговой траектории с центростремительным ускорением и генерирует излучение в широком спектральном диапазоне — так называемое магнитотормозное излучение [1, 2].

Если траектория частицы — электрона или позитрона — замкнута при помощи так называемых поворотных магнитов, как в кольцевых ускорителях заряженных частиц, то частица может двигаться до тех пор, пока за счет столкновения с атомами остаточного газа в вакуумной камере кольца и потерь на излучение ее энергия не уменьшится на величину, определяемую энергетической апертурой кольца. При этом периодически, с частотой обращения, при прохождении частицы через поворотные магниты, будет генерироваться импульсное широкополосное излучение, угловое распределение которого из-за релятивистских эффектов сконцентрировано вблизи плоскости вращения. Благодаря тому, что это излучение впервые наблюдалось в циклическом ускорителе — электронном синхротроне, в настоящее время его называют синхротронным излучением (СИ). Оно было теоретически предсказано Д.Д.Иваненко и И.Я.Померанчуком в 1944 г. [1], свойства его были описаны А.А.Соколовым и И.М.Терновым [2], а в основе конструкции современных многополюсных вставных устройств лежат идеи В.Л.Гинзбурга [3].

У истоков

Первые синхротроны создавались для экспериментов по физике высоких энергий, когда основной задачей было обеспечить максимальную энергию сталкивающихся частиц и высокую частоту столкновений. Но оказалось, что достижимая в электронных и позитронных синхротронах энергия частиц ограничена потерями именно на синхротронное излучение, прозванное за это паразитным.

Однако вскоре выяснилось, что паразитное излучение, если его вывести из вакуумной камеры ускорителя по специальным каналам, может использоваться для экспериментов в другой, не менее актуальной области науки — в рентгеновских исследованиях. Российские ученые внесли заметный вклад в развитие как ускорительной физики, так и синхротронных исследований [4].

Циклические ускорители, работающие в стационарном режиме, т.е. при неизменной энергии электронов (позитронов) и при постоянных магнитных полях в поворотных магнитах и фокусирующих магнитных линзах, называются накопителями. Первые накопители — коллайдеры, на которых начались эксперименты на выведенных пучках СИ, относятся к источникам СИ 1-го поколения. Рабочие энергии электронов, в зависимости от магнитной структуры и размеров ускорителей, охватывают диапазон от сотен мегаэлектронвольт до нескольких гигаэлектронвольт.

По мере возрастания энергии электронов в накопительных кольцах максимум интенсивности в спектральном распределении СИ сдвигается последовательно от инфракрасного к видимому диапазону, далее к ультрафиолетовому, жесткому (вакуумному) ультрафиолетовому, к мягкому рентгеновскому и рентгеновскому диапазону.

Поток синхротронного излучения увеличивается на порядки величины за счет как увеличения энергии и тока частиц, так и релятивистских эффектов, поскольку излучение концентрируется в узком конусе по касательной к траектории частицы, подобно тому, как это происходит с брызгами воды от быстро вращающегося колеса. На рис.1 показаны диаграммы мгновенной мощности излучения частицы (индикатрисы) при движении в магнитном поле под действием центробежной силы Лоренца в зависимости от направления излучения в осях, которые образуются векторами скорости β (измеряемой в единицах скорости света), ускорения \mathbf{a} и внешнего магнитного поля \mathbf{H} . При малой скорости ($\beta = 0.01$) поперечное сечение диаграммы мгновенной мощности излучения напоминает бублик, ось которого совпадает с вектором ускорения. При этом интенсивность излучения нерелятивистской частицы в направлении вектора ускорения равна нулю. Для релятивистской частицы (рис.2) вследствие кинематических эффектов излучение испускается вперед в основном в угол $\theta = \pm 1/\gamma$ в лабораторной системе. Здесь величина $\gamma = E/mc^2$, так называемый релятивистский фактор, равна отношению полной энергии электрона к его энергии покоя. В современных источниках СИ $\gamma = 1000-14000$. При этом характерная энергия ϵ_c фотонов растет с ростом индукции магнитного поля B в месте нахождения частицы и энергии частицы E как $\epsilon_c \sim BE^2$, а потери энергии частицей на излучение за время одного оборота составляют $\Delta W \sim BE^3$.

Таким образом, чем больше энергия электронов, тем выше яркость излучения отдельного электрона. Яркость излучения растет также и при уменьшении поперечных размеров пучка и угловых разбросов (эмиттанса) излучающих частиц в электронном накопителе.

По сравнению с излучением рентгеновских трубок синхротронное излучение обладает уникальными характеристиками. Во-первых, яркость СИ современных синхротронов превышает яркость рентгеновских трубок в $10^{10}-10^{12}$ раз (рис.3). Такая яркость требуется, прежде всего, при изучении тонких слоев и наносистем с малым числом атомов [6, 7]. Во-вторых, спектральные и пространственные характеристики конкретного источника СИ позволяют использовать его в качестве эталона, подобно эталонному спектру абсолютно черного тела. В-третьих, СИ обладает широким спектральным диапазоном, высокой степенью поляризации и коллимации (расходимость — менее угловой минуты), что дает возмож-

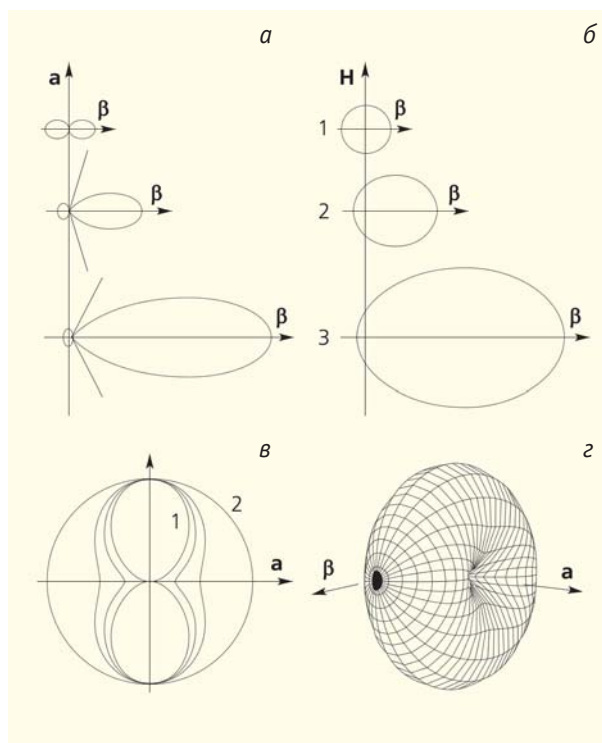


Рис.1. Сечения индикатрисы синхротронного излучения плоскостями $\mathbf{a}\beta$ (а), $\mathbf{H}\beta$ (б) при $\beta = 0.01$ (1), $\beta = 0.3$ (2) и $\beta = 0.5$ (3) и плоскостями \mathbf{aH} (в) для значений β от 0.01 (1) до 1 (2) с объемным изображением (г) при $\beta = 0.01$ [5].

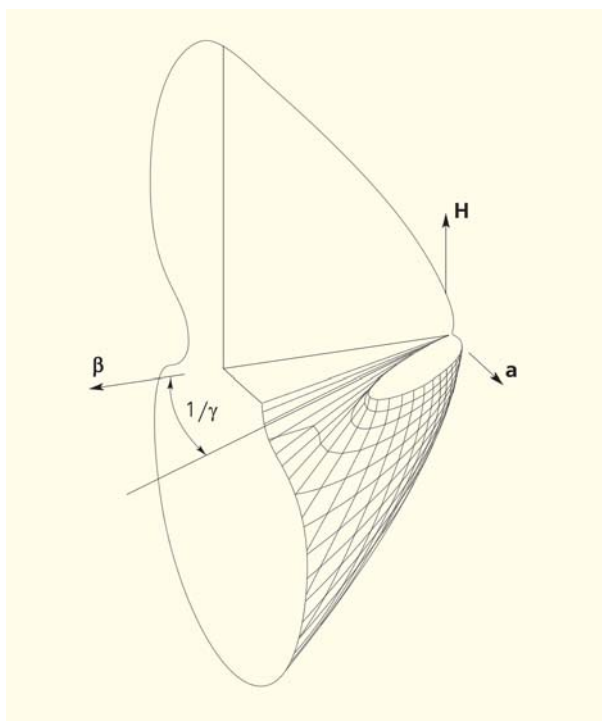


Рис.2. Сечения индикатрисы синхротронного излучения плоскостями $\mathbf{a}\beta$, $\mathbf{H}\beta$ и плоскостью, параллельной \mathbf{aH} , для $\beta = 0.9$ [5].

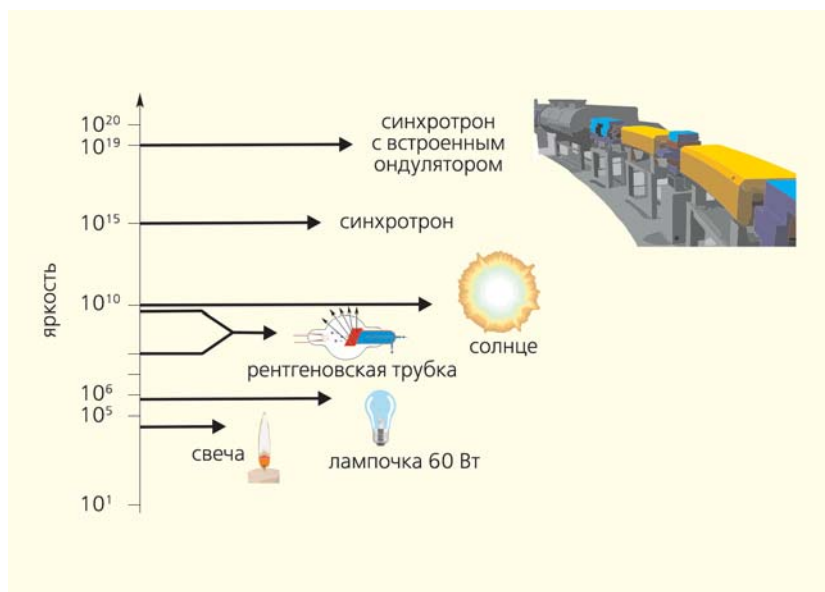


Рис.3. Яркость различных источников в единицах «фотон/с·мм²·мрад²·(0.1%)».

ность работать на разных длинах волн и с небольшими образцами, далеко отстоящими от накопительного кольца. В-четвертых, излучение можно использовать для экспериментов с временным разрешением, так как оно имеет импульсную структуру, поскольку электроны следуют вдоль кольца в виде цуга коротких сгустков.

Вследствие того, что излучающие частицы в накопительных кольцах движутся в глубоком вакууме (давление $<10^{-7}$ Па), и фон от рассеяния на остаточном газе в кольце достаточно мал, время жизни пучка может составлять десятки часов. Малые поперечные размеры электронного сгустка (сотни микрометров и меньше) и большие длины каналов вывода (десятки метров) позволяют «приготавливать» в экспериментальных станциях пучок СИ, обладающий необходимой пространственной когерентностью, который можно аппроксимировать плоской волной. И, наконец, из-за «круговой» геометрии орбиты пучка частиц вокруг источника СИ размещается большое количество (до нескольких десятков) независимых экспериментальных станций, которые не мешают друг другу.

С переходом от неорганических образцов с десятками атомов в элементарной ячейке к биологическим кристаллам с десятками тысяч атомов и наносистемам возрастают и требования к таким параметрам источников синхротронного излучения, как поток и яркость, ширина спектрального диапазона, пространственная и временная когерентность.

Количество приложений СИ в различных областях науки и техники огромно, поэтому источники синхротронного излучения на базе накопителей электронов стали настоящими фабриками

знаний. Мировая практика показывает, что современные источники СИ функционируют как *центры коллективного пользования* (ЦКП), машинное время которых распределяется для сторонних пользователей СИ (экспериментаторов) на основе оценки научной значимости предлагаемых исследований. В ЦКП размещается до нескольких десятков исследовательских установок — станций: многие экспериментальные станции действуют непрерывно, на них посменно работают специалисты в различных отраслях знания — от ядерной физики до молекулярной биологии и материаловедения.

Благодаря своим уникальным характеристикам синхротронное излучение стало универсальным инструментом для

проведения широкого круга междисциплинарных исследований. Особенно активно оно используется в области структурной диагностики наноматериалов и биоорганических систем. Отметим, что всего несколько стран в мире могут самостоятельно разрабатывать и эксплуатировать источники СИ, которые служат показателем технологического развития государства. В числе этих стран особое место занимает Россия, которая уделяет особое внимание созданию новой ускорительной техники. Участие РФ в таких проектах, как Рентгеновский лазер на свободных электронах, открывает новые перспективы для развития этой деятельности.

Первые источники СИ, электрон-позитронные коллайдеры, стали называть неспециализированными источниками синхротронного излучения, или источниками синхротронного излучения первого поколения. На таких установках было реализовано много перспективных идей в области генерации излучения, которые потом использовались на источниках следующих поколений. В частности, в России на электрон-позитронном коллайдере с названием «Встречные электрон-позитронные пучки — 3» (ВЭПП-3) в Институте ядерной физики им.Г.И.Будкера (ИЯФ) СО РАН (Новосибирск) были разработаны технологии сверхпроводящих магнитных змеек (вигглеров) и лазеров на свободных электронах.

Однако экспериментальная работа с пучками СИ на неспециализированных синхротронах всегда происходила «на вторых ролях», так как приоритет отдавался экспериментам по физике высоких энергий. Поэтому с 1970-х годов стали сооружаться специализированные ускорительно-накопительные комплексы, магнитная структура кото-

рых была изначально оптимизирована для получения как можно более ярких пучков, выходящих из поворотных магнитов. Такие источники получили название источников второго поколения, к которому на начальном этапе относился и Курчатовский источник синхротронного излучения (КИСИ).

Наш источник

В 1978 г. директором Института атомной энергии им. И.В.Курчатова (ИАЭ, в настоящее время — НИЦ «Курчатовский институт») академиком А.П.Александровым и директором ИЯФ СО АН академиком А.Н.Скринским был подписан договор о совместном создании в ИАЭ первого в СССР специализированного источника СИ. По своим параметрам он должен был стать на тот момент одним из лучших в мире [8].

Ускорительно-накопительный комплекс (УНК) был создан в ИЯФ СО АН, смонтирован и запущен для работы с электронным пучком в ИАЭ совместно сотрудниками ИЯФ и ИАЭ. Он включает в себя линейный ускоритель (ЛИНАК) на энергию электронов 80–100 МэВ в качестве форинжектора и два накопителя электронов: малый накопитель-бустер с периметром 8.68 м на энергию 450 МэВ и большой накопитель с периметром 124.13 м на энергию 2.5 ГэВ (рис.4). Синхротронное излучение из обоих накопителей выводится по каналам в экспериментальные залы.

Малый электронный накопитель одновременно служит источником СИ с критической длиной волны излучения* 61 Å, его спектр перекрывает вакуум-

* Критическая длина волны, по определению, разделяет спектр на две части — условно длинноволновую и коротковолновую, интегральные мощности в которых равны друг другу: $\lambda_c = 4\pi R / (3\gamma^3)$, где R — радиус поворота. Она связана с длиной волны, при которой спектр имеет максимум, λ_{max} , выражением $\lambda_c \approx 0.28\lambda_{max}$.



Академики А.П.Александров и А.Н.Скринский.



Рис.4. Ускорительно-накопительный комплекс источника СИ.

ный ультрафиолетовый (ВУФ) и мягкий рентгеновский (МР) диапазон.

Большой накопитель — источник СИ в спектральной области 0.1—2000 Å, позволяющий работать как в мягком, так и в жестком рентгеновском диапазоне, с критической длиной волны СИ из поворотных магнитов, равной 1.75 Å. Горизонтальный эмиттанс пучка электронов на энергии 2.5 ГэВ равен 78—100 нм·рад.

Оптимизированная магнитная структура состоит из шести зеркально-симметричных суперпериодов. Каждый суперпериод содержит по два трехметровых промежутка, предназначенных для размещения инжекционных магнитов, ВЧ-резонаторов и дополнительных многополюсных магнитов — источников СИ, так называемых вставных устройств — вигглеров и ондуляторов. На рис.5 показан один из суперпериодов большого накопительного кольца.

Длительность импульса синхротронного излучения составляет около 140 пс, что соответствует стандартному продольному размеру сгустка электронов 1.8 см. Внутри накопительного кольца могут быть одновременно один или несколько электронных сгустков. При работе в многосгустковом режиме минимальный временной интервал между импульсами СИ равен периоду ВЧ-генератора и составляет около 5.5 нс. В односгустковом режиме импульсы СИ следуют с периодом обращения 414 нс. Каналов вывода СИ запроектировано 39, среди которых 24 предусмотрены для вывода СИ из поворотных магнитов, а остальные — из вставных устройств.

Установка создавалась в несколько этапов, и этот процесс, к сожалению, затянулся в связи с негативной экономической ситуацией в нашей

стране в 90-х годах. Первый электронный пучок, ускоренный до 2.5 ГэВ в большом накопителе, был получен в 1994 г. Сейчас время жизни электронного пучка, которое определяется как время, за которое первоначальное количество излучающих электронов уменьшается в e раз ($e = 2.718$), задается уровнем вакуума в накопителе и составляет несколько десятков часов. Перенакопление пучка происходит, как правило, два раза в сутки, в начале работы очередной смены.

Первые экспериментальные станции КИСИ были созданы в России в 90-х годах прошлого столетия на базе отечественных разработок и заработали на полную мощность через три-пять лет после пуска большого накопителя. Ведущую роль здесь играл Институт кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН.

В связи с усложнением станций и требованиям по унификации экспериментов в России и за рубежом последние станции КИСИ укомплектованы узлами от ведущих мировых производителей, таких как HUBER, что позволяет проводить на этих станциях уникальные эксперименты.

Каналы вывода СИ

Как уже говорилось, на стадии проекта в магнитной структуре КИСИ были предусмотрены восемь прямолинейных промежутков для вставных устройств — вигглеров и ондуляторов (точнее — слабopoлевых вигглеров). Внутри такого ондулятора, вследствие знакопеременного постоянного магнитного поля, траектория электронного пучка имеет вид змейки. Эти вставные устройства призваны резко улучшить качество фотонных пучков — увеличить потоки фотонов и яркость источника. Они характеризуются параметром

$$K = eV_m \lambda_{\text{ин}} / 2\pi mc,$$

где V_m — амплитуда знакопеременной индукции магнитного поля вставного устройства, а $\lambda_{\text{ин}}$ — период изменения этого поля. Величина K определяет амплитуду угла отклонения равновесной орбиты в многополюсном устройстве вставки.

Если $K < 1$, то вставное устройство называется ондулятором. В ондуляторе амплитуда угла отклонения меньше или порядка угла естественной расходимости излучения, что обеспечивает условия интерференции излучения одного электрона от различных полюсов. Интерференция в ондуляторе, в свою очередь, приводит к появлению узких спектральных линий, от-



Рис.5. Один из суперпериодов ускорительно-накопительного большого кольца. Поворотные магниты показаны оранжевым цветом; одиночные квадрупольные линзы, дублеты и триплеты — синим; секступольные линзы — желтым. Видны каналы вывода СИ, проходящие сквозь биозащиту.

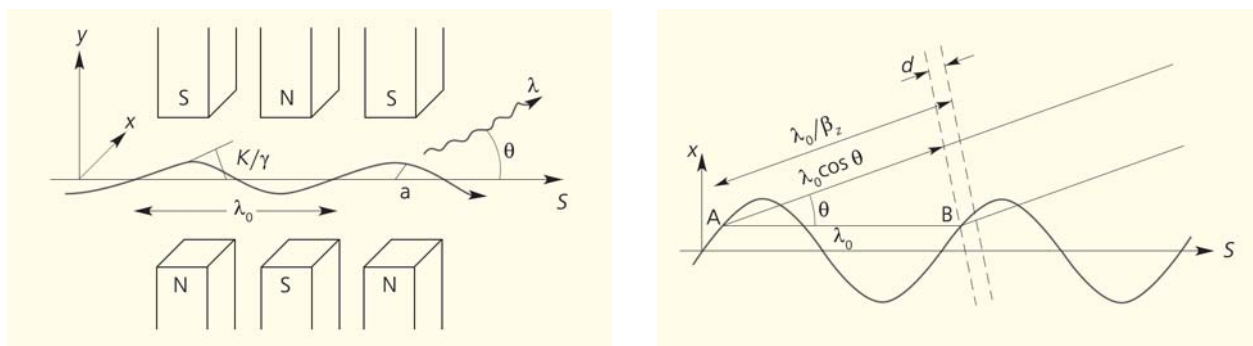


Рис.6. Схема плоского ондулятора (или вигглера) и система координат (слева). Интерференция в ондуляторе (справа).

вечающих нечетным гармоникам фундаментальной частоты (рис.6). В пределе $K \ll 1$ спектр ондулятора представлен одной линией на частоте фундаментальной гармоники.

Если $K \gg 1$, то вставное устройство имеет на порядок более высокое магнитное поле, чем в ондуляторе, больший пространственный период магнитного поля и называется вигглером. В вигглере размер области, где формируется излучение, много меньше периода изменения магнитного поля; интерференция излучения отдельного электрона на длине вигглера отсутствует (кроме очень длинноволнового хвоста спектра). Спектр излучения вигглера под нулевым углом к оси по форме похож на спектр СИ поворотного магнита, но, как правило, смещен в более жесткий диапазон, а интенсивность излучения растет пропорционально числу полюсов.

Многополюсные устройства позволяют получать на порядки величины более яркие пучки СИ, чем поворотные магниты, а также управлять интенсивностью и формой спектра излучения путем изменения напряженности поля.

В одном из прямолинейных промежутков большого накопителя КИСИ уже установлен сверхпроводящий вигглер (рис.7), который в ноябре 2009 г. дал первое излучение, распределенное по трем каналам, расположенным к оси промежутка под углами -13 , 0 и $+17$ мрад (рис.8).

Использование вигглеров позволяет называть КИСИ источником поколения 2+. Отметим, что наш сверхпроводящий вигглер — уникальный прибор, поскольку у него очень большое магнитное поле на орбите (до 7.5 Тл), а полная максимальная мощность СИ — до 100 кВт, и это в рентгеновском диапазоне длин волн! Так, интенсивность фотонов в относительном энергетическом

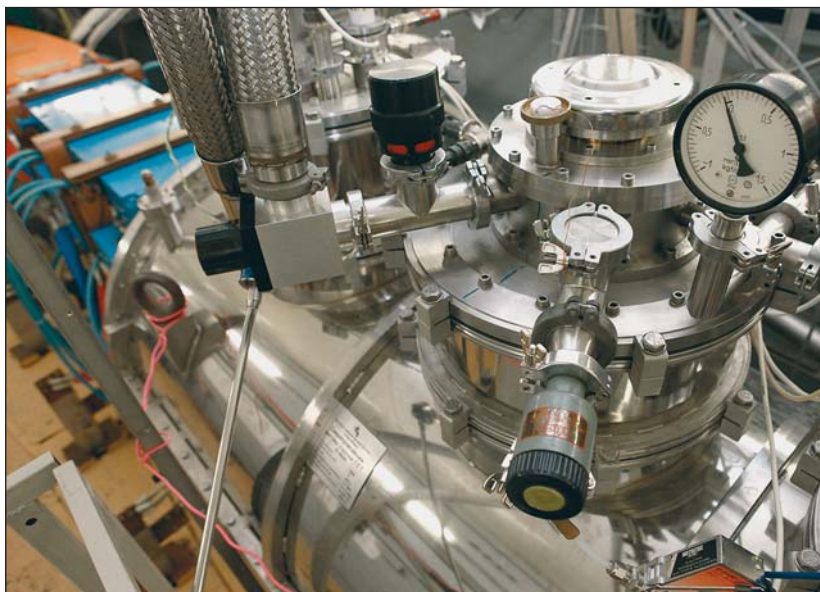


Рис.7. Сверхпроводящий вигглер на накопителе большого кольца.

диапазоне $\delta E/E \sim 0.1\%$ составляет $\sim 10^{14} - 10^{13}$ фот/с для энергии фотонов до 100 кэВ и $\sim 10^7$ фот/с для энергии фотонов до 500 кэВ. Столь жесткий спектр позволяет, в частности, проводить химические исследования веществ, состоящих практически из всех элементов таблицы Менделеева [9].

Включение в работу сверхпроводящего вигглера с полем 7.5 Тл приводит к естественному (за счет многих полюсов и более высокого магнитно-

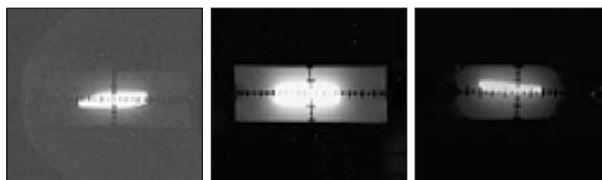


Рис.8. Излучение, выведенное из 7.5 Тл-сверхпроводящего вигглера по трем каналам (-13 , 0 , 17 мрад) в экспериментальный зал КИСИ. Показаны фотографии пучков на люминофорных датчиках, установленных на торцах каналов СИ.

го поля) росту интенсивности, яркости и увеличению жесткости рентгеновского излучения по сравнению с СИ из поворотного магнита. Кроме того, уменьшается в 1.5 раза эмиттанс (натуральный поперечный фазовый объем, т.е. произведение диаметра и угловой расходимости) электронного пучка в большом кольце КИСИ, что ведет к дополнительному увеличению яркости источника приблизительно еще в пять раз на всех каналах СИ, независимо от их расположения.

В настоящее время проводится работа по созданию двух дополнительных сверхпроводящих вигглеров с меньшим полем (3 Тл) и с большим числом полюсов (66 основных и четыре боковых)

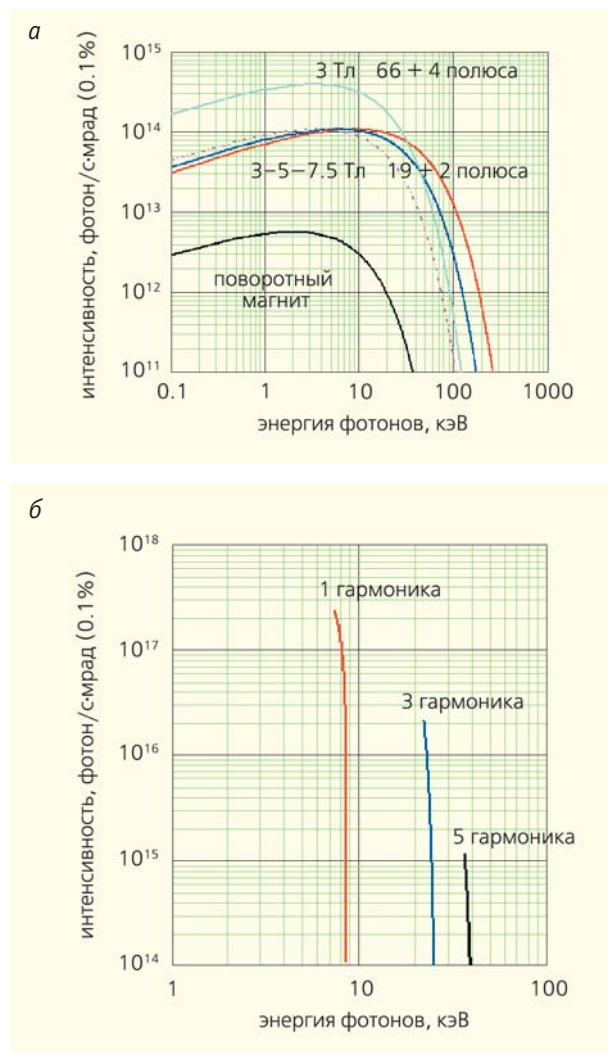


Рис.9. Интенсивность синхротронного излучения из поворотного магнита в зависимости от энергии фотонов — для сверхпроводящих 1.7 Тл- и 3 Тл-вигглера (66+4-полюсного) и 3—5—7.5 Тл-вигглера (19+2-полюсного) (а). Энергия электронов 2.5 ГэВ, ток электронов 100 мА. Расчетный линейчатый спектр излучения из ондулятора с периодом 7 мм и числом периодов 100 при энергии электронов 2.5 ГэВ и токе 100 мА (б).

на рабочий диапазон энергий фотонов до 40 кэВ, что определяется тематикой планируемых экспериментов (белковая кристаллография и вещество в экстремальных условиях).

В качестве примера на рис.9 представлены спектры синхротронного излучения основных источников СИ на большом накопителе — из поворотных магнитов, сверхпроводящих вигглеров и ондулятора. Спектры относятся к СИ, которое выводится: из поворотного магнита с индукцией магнитного поля 1.7 Тл и с критической длиной волны $\lambda_c = 1.75 \text{ \AA}$; из действующего сверхпроводящего вигглера с максимальной индукцией магнитного поля (3, 5, 7.5) Тл с пространственным периодом 16.4 см, (19+2) основными и боковыми полюсами и с соответствующими критическими длинами волн $\lambda_c = (1.0, 0.6, 0.4) \text{ \AA}$; из будущего нового 3.0 Тл-сверхпроводящего вигглера с (66+4) основными и боковыми полюсами, периодом магнитного поля 4.6 см и с критической длиной волны $\lambda_c = 1.0 \text{ \AA}$. Кроме того, на рис.9,б приведен расчетный линейчатый спектр для 1-3-5 гармоник излучения из ондулятора с периодом 7 мм и числом периодов 100 при энергии электронов 2.5 ГэВ и токе 100 мА.

Для пользователей

В октябре 1999 г. в присутствии председателя Правительства РФ В.В.Путина состоялась официальная процедура пуска Курчатковского источника синхротронного излучения, ставшего первой научной установкой для mega science, введенной в строй у нас в стране после распада Советского Союза. Это событие символизировало новый этап истории отечественной науки. Оно также продемонстрировало возрождение внимания к проблемам развития фундаментальных исследований со стороны государства.

И сейчас Курчатковский источник по-прежнему остается знаковой, уникальной установкой для российской науки. Именно в его стенах президенты страны приняли важные для российской науки решения: В.В.Путин в апреле 2007 г. — о разворачивании масштабной нанотехнологической инициативы России, а Д.А.Медведев в октябре 2009 г. — о запуске пилотного проекта по созданию первого Национального исследовательского центра на базе нескольких институтов во главе с Курчатовским институтом.

КИСИ, известный своими междисциплинарными исследованиями, стал местом, вокруг которого сформировалась технологическая, научная и организационная инфраструктура уникального Центра нано-, био-, инфо-, когно- и социогуманитарных наук и технологий, известного как Курчатовский НБИКС-центр [10].

В 2007—2009 гг. корпус Курчатковского источника был значительно расширен и приобрел современные очертания (рис.10). Площадь экспе-



Рис.10. Корпус Курчатовского источника синхротронного излучения.

риментального зала была увеличена до 4860 м², что открыло возможности для создания новых станций, появились новые лабораторные и офисные помещения, залы для организации конференций международного уровня, комнаты для пользователей, в том числе — работающих в ночное время.

В настоящее время функционирует комплекс из 18 экспериментальных синхротронных станций коллективного пользования, которые обеспечивают практически весь спектр современных диагностических методов исследования для отечественных и зарубежных специалистов*. Ведется строительство еще четырех новых экспериментальных станций для большого накопителя: рентгеноабсорбционной спектроскопии, исследования вещества в экстремальных условиях, белковой кристаллографии, малоуглового рассеяния.

В экспериментальном зале КИСИ размещена также чистая зона (8-й класс по ISO) с комплексом оборудования для на-

нотехнологий и нанодиагностики, включая атомно-силовые микроскопы, установку для производства наносистем «Нанофаб», установку молекулярно-пучковой эпитаксии и др. (рис.11). В чистой зоне ведется монтаж станции фотоэлектронной спектроскопии (ФЭС) с высоким угловым разрешением. После сопряжения станции ФЭС с установкой «Нанофаб» мы получим единственный в мире комплекс, в котором наносистемы

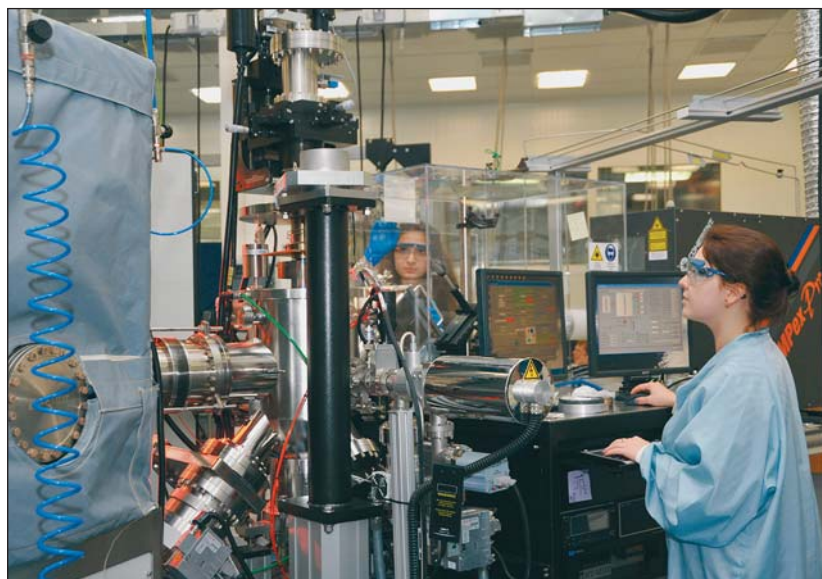


Рис.11. Чистая зона в экспериментальном зале КИСИ.

* Подробнее о станциях можно прочитать в статье Я.В.Зубавичуса, Э.Х.Мухамеджанова и Р.А.Сенина в этом же выпуске.

будут создаваться при непосредственном контроле технологического процесса современными методами диагностики и метрологии, основанными на рассеянии и поглощении синхротронного излучения.

КИСИ с середины 2000-х годов фактически работает в режиме ЦКП, что позволяет существенно сократить время экспериментов и реализовать широкий спектр экспериментальных методик. КИСИ принимает пользователей со всей России и даже из-за рубежа, но больше всего — из самого Курчатковского НБИКС-Центра.

Особенность нашего ЦКП в том, что синхротронные исследования часто ведутся комплексно с другими методиками. Например, данные рентгеновских структурных исследований дополняются нейтронными, полученными на исследовательском реакторе ИР-8 в Курчатковском институте. В мире существуют всего несколько центров, такие как Институт Лауэ-Ланжевена ILL в Гренобле и наш Курчатковский институт, где это возможно. Так как нейтроны имеют спин и рассеиваются на атомных ядрах, возникает уникальная возможность исследовать магнитные свойства образца, определить положение легких атомов, например изотопов водорода и т.д. В то же время СИ обладает более высокой яркостью, и с его помощью можно исследовать микрообразцы вплоть до отдельных атомных слоев на поверхности кристалла или жидкости. Путем комбинации взаимодополняющих методов исследователи получают уникальную структурную информацию. В ЦКП используются и другие популярные методики: электронная микроскопия (сканирующая и на просвет), комплекс атомно-силовой микроскопии и др.

КИСИ работает на пользователей более 2000 часов в год, при том, что некоторые эксперименты выполняются в очень короткие сроки — от считанных минут до нескольких часов. Рабочее время равномерно распределено по месяцам в течение года (за исключением периода отпусков), а план-график опубликован на несколько месяцев вперед на сайте ЦКП*. В случае необходимости мы помогаем нашим пользователям организовать исследования на зарубежных источниках синхротронного излучения. КИСИ активно сотрудничает с DESY (Гамбург, Германия), BESSY-2 (Берлин, Германия) и ESRF (Гренобль, Франция), где мы создаем совместные станции и участвуем в работе научных комитетов, распределяющих пучковое время.

Сейчас для ученых, работающих на синхротроне, наступает новый этап, связанный с расширением и углублением исследований в области биоорганических и гибридных систем. Задача состоит в том, чтобы научиться встраивать биоорганические молекулы в различные микроэлектронные структуры в качестве элементов для восприя-

тия изображений, звуковых и химических сигналов (биосенсоров), для преобразования сигналов в информатике (биокомпьютеров) и т.д. Как показывает опыт, при развитии гибридных технологий информация о структуре биоорганических молекул оказывается решающей.

В НИЦ «Курчатковский институт» создана вся необходимая инфраструктура для комплексного решения задач структурной биологии, в частности, функционирует Система роботизированной кристаллизации макромолекул (Белковая фабрика). Эта фабрика позволяет в полуавтоматическом режиме проводить скрининг первоначальных условий кристаллизации белков. В России систем подобного уровня больше нет. Поскольку количество белковых образцов непрерывно увеличивается, мы создаем вторую, более производительную станцию белковой кристаллографии, которая будет работать на излучении сверхпроводящего вигглера с полем 3 Тл.

В нескольких мировых научных центрах уже работают источники СИ третьего поколения. От предыдущих поколений они отличаются тем, что имеют намного больший периметр кольца, малую мощность излучения СИ из поворотных магнитов, а главными источниками интенсивного и яркого излучения служат многополюсные вигглера и ондуляторы, установленные в длинные прямолинейные промежутки. Однако здесь важно подчеркнуть, что источники третьего поколения не заменяют полностью источники предыдущих поколений (даже рентгеновские трубки по-прежнему активно используются в лабораториях), поскольку круг задач этих установок существенно отличается.

0 планах

Курчатковский источник синхротронного излучения реализует долгосрочную программу развития. Наряду с созданием новых вигглеров и экспериментальных станций, о чем уже упоминалось, предусмотрена принципиально новая система инъекции в большом накопителе. Идея основана на создании дополнительного бустерного синхротрона, работающего в интервале энергий от 70 до 2500 МэВ, и переводе большого накопителя в режим работы на постоянной номинальной энергии 2.5 ГэВ [11]. Это приведет к тому, что эффективное время жизни электронного пучка в большом накопительном кольце станет фактически бесконечным, поскольку пучок будет постоянно «подпитываться» до номинального тока из бустерного синхротрона. Данное решение улучшит стабильность орбиты электронного пучка, а пользователи получат источник, высокая интенсивность и яркость которого будут практически постоянны в течение времени эксперимента.

* <http://www.kcsr.kiae.ru>

С потребительской точки зрения основные требования к пучкам СИ — длительное постоянство пространственного положения (координаты и углы падения) фотонных пучков на исследуемых образцах при неизменной высокой интенсивности СИ. Чтобы обеспечить долговременную стабильность фотонных пучков, необходимо стабилизировать температуру основного оборудования большого кольца с точностью $\sim 0.1^\circ$, чего достичь можно лишь при неизменных токах в магнитных элементах и других нагрузках спустя примерно трое суток после включения. Инжекция из бустера на полной энергии (2.5 ГэВ) автоматически решает проблему температурной стабилизации кольца большого накопителя. Одновременно существенно повышается надежность основного силового оборудования — благодаря исключению переменных нагрузок и многочисленных переходных энергетических процессов. Кроме того, благодаря периодической «подпитке» из бустера станет возможным проведение экспериментов на СИ без технологических перерывов для повторного накопления пучка и подъема энергии. Так будет достигнут эффект «бесконечного времени жизни».

Особенно привлекательно то, что такая инжекция позволит осуществлять эффективный выпуск электронного пучка в новые оптические структуры большого накопителя, обеспечивающие натуральный горизонтальный эмиттанс пучка электронов на уровне 4–6 нм·рад на энергии 1.3 ГэВ, что уже соответствует параметрам (интенсивности и яркости) источников СИ 3-го поколения.

Дальнейшее развитие синхротронных исследований в Курчатовском институте и во всей стране мы связываем также с проектом источника синхротронного излучения более совершенного — четвертого — поколения. Мировое сообщество выработало требования к этим источникам и предложило несколько путей создания таких источников.

Строительство подобной мегаустановки, основанной на идее использования многодорожечного ускорителя (рекуператора), планируется в Курчатовском институте. Проектное название установки — «Источник специализированный синхротронного излучения четвертого поколения» (ИССИ-4) [12, 13]. На ее базе предусматривается создание уникального исследовательско-технологического комплекса с рекордными на настоящий момент параметрами синхротронного излучения (табл.).

Особенность схемы ИССИ-4 и главное его отличие от циклических ускорителей заключа-

ется в том, что он фактически является линейным ускорителем, «свернутым» в спираль. Как в линейном ускорителе, благодаря малому времени «ускорения» поперечный фазовый объем электронного пучка будет уменьшаться с ростом энергии «адиабатически», а гораздо более медленные процессы диффузии за счет квантовых флуктуаций излучения в магнитной системе, ведущие к увеличению фазовых размеров, развиваться не успевают. Поэтому ИССИ-4 будет обладать сверхмалым эмиттансом пучка электронов (~ 0.01 нм·рад) и энергетическим разбросом 0.01%. Используемые электроны замедляются в тех же ускоряющих структурах, где они разгонялись, и возвращают энергию этим же структурам (рекуперация энергии).

Источниками излучения рентгеновского диапазона будут служить как длинные ондуляторы (длиной более 1000 периодов), генерирующие полностью пространственно когерентное излучение (подобно лазерам на свободных электронах), так и поворотные магниты, задающие траекторию электронного пучка (подобно классическим источникам синхротронного излучения). Одним из преимуществ ИССИ-4 будет возможность одновременной работы 10–20 экспериментальных групп.

Когерентное излучение фотонов ИССИ-4, обладающее дополнительно такой характеристикой, как высокая частота следования импульсов излучения, должно позволить изучать динамику поведения сложных объектов, структура которых меняется с частотой в несколько гигагерц.

В частности, впервые возникнет уникальный шанс проанализировать временные эффекты самоорганизации наноструктур, динамику функционирования биологической клетки, механизм распространения возбуждений в нейронной сети, особенности формирования ближнего порядка при росте кристаллов, динамику релаксационных эффектов в кристаллической решетке при интенсивном облучении и т.д.

Основные научные направления, предполагаемые для ИССИ-4, будут связаны с исследованием структуры и динамики живой и неживой материи

Таблица

Параметры синхротронного излучения источника ИССИ-4

Максимальная энергия электронов, ГэВ	5.6–6
Энергия фотонов, кэВ	1–30
Пространственная когерентность	полная
Средняя яркость, фотон $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}$ ($\Delta\lambda/\lambda = 0.1\%$) ⁻¹	10^{24}
Пиковая яркость, фотон $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}$ ($\Delta\lambda/\lambda = 0.1\%$) ⁻¹	10^{27}
Поляризация (линейная, либо круговая)	полная
Длительность электронного сгустка, пс	0.1
Габариты установки (занимаемый участок земли), км	1×1
Общая площадь помещений, тыс. кв. м	100
Потребляемая мощность, МВт	15

с атомарным пространственным и фемтосекундным временным разрешением. Уникальные характеристики источника ИССИ-4 делают его незаменимым инструментом для большого числа научных направлений, в том числе: рентгеновской микроскопии и голографии, когерентного рассеяния от некристаллических материалов, рентгеновской спектроскопии, нелинейной рентгеновской спектроскопии, рентгеновских нанопучков, мёссбауэровской спектроскопии и многих других. Его создание потребует развития инноваций в отечественных технологиях сверхпроводников и магнитных систем, решения новых проблем в материаловедении и приборостроении.

Источник ИССИ-4 станет междисциплинарным центром коллективного пользования мирового

уровня и будет обеспечивать проведение исследований на экспериментальных станциях одновременно десятками научных коллективов. Проект планируется осуществить в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П.Константинова (г.Гатчина), который теперь входит в состав НИЦ «Курчатовский институт».

Параллельно НИЦ «Курчатовский институт» участвует в строительстве Рентгеновского лазера на свободных электронах X-FEL (Гамбург, Германия), где Россия является основным партнером Германии, а Курчатовский институт координирует российскую научную программу.

Таким образом, уже в ближайшем будущем Россия получит все шансы стать лидером в области исследований на синхротронном излучении. ■

Литература

1. *Иваненко Д.Д., Померанчук И.Я.* О максимальной энергии, достижимой в бетатроне // Докл. Акад. наук СССР. 1944. Т.44. С.343—344.
2. *Соколов А.А., Тернов И.М.* Синхротронное излучение. М., 1966.
3. *Гинзбург В.Л.* Об излучении микрорадиоволн и их поглощении в воздухе // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1947. Т.ХI. №2. С.165—181.
4. *Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н.* Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы // УФН. 1977. Т.122. Вып.3. С.369.
5. *Багров В.Г., Бисноватый-Коган Г.С., Бордовицин В.А. и др.* Теория излучения релятивистских частиц. М., 2002.
6. *Ковальчук М.В., Кон В.Г.* Рентгеновские стоячие волны - новый метод исследования структуры кристаллов // Успехи физ. наук. 1986. Т.149. Вып.1. С.69—103.
7. *Ковальчук М.В., Желудева С.И., Носик В.Л.* Рентгеновские лучи от объема к поверхности // Природа. 1997. №2. С.54—69.
8. *Korchuganov V.N., Kulipanov G.N., Mezentsev N.A. et al.* Optimization of the parameters of the dedicated synchrotron radiation source for technology // Всесоюзное совещание по использованию синхротронного излучения СИ-82. Новосибирск, 1982. С.80—102.
9. *Valentinov A., Korchuganov V., Kovalchuk M. et al.* First results of SIBERIA-2 storage ring operation with 7.5 T superconducting wiggler // XXI Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2008. Звенигород, 28 сентября — 3 октября 2008 г.
10. *Ковальчук М.В.* Конвергенция наук и технологий — прорыв в будущее // Российские нанотехнологии. 2011. Т.6. №1—2.
11. *Anoshin A., Blokhov M., Leonov V. et al.* Modernization and development of Kurchatov center of synchrotron radiation and nanotechnology // XXI Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2008. Звенигород, 28 сентября — 3 октября 2008 г.
12. *Kulipanov G., Skrinisky A., Vinokurov N.* Synchrotron light sources and recent development of accelerator technology // J. of Synchrotron Radiation. 1998. V.5. Pt.3. P.176.
13. *Kulipanov G.N., Skrinisky A.N., Vinokurov N.A.* MARS — a project of the diffraction limited fourth generation X-ray source based on supermicrotron // Nuclear Instruments and Methods in Physics research. 2001. A467—468. P.1.

Экспериментальные станции КИСИ

Я.В.Зубавичус, Э.Х.Мухамеджанов, Р.А.Сенин

Использование рентгеновского излучения позволяет неразрушающим образом определять целый спектр функционально-значимых свойств современных высокотехнологичных материалов — от химического состава до тонких деталей электронного строения. Рентгеновские методы диагностики многообразны и универсальны: они могут эффективно применяться для решения многих задач, столь различных, как промышленный и экологический контроль, с одной стороны, и фундаментальные проблемы физики твердого тела и разработка материалов с заданными свойствами — с другой. В научных, образовательных, медицинских и промышленных организациях эти методы получили достаточно широкое распространение благодаря доступности и надежности оборудования на основе рентгеновских трубок. Но современный уровень рентгеновских исследований определяется в первую очередь применением мегаустановок, вырабатывающих уникальное по своим характеристикам излучение, — синхротронных источников [1].

В настоящий момент общее число ускорительных комплексов, используемых в качестве источников синхротронного излучения для проведения научных исследований, приближается к 70 [2]. В России действуют два синхротронных центра: Сибир-



Ян Витаутасович Зубавичус, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией структурных исследований некристаллических материалов НБИКС-Центра. Занимается развитием методов структурной диагностики веществ в неупорядоченном и наноструктурированном состоянии на базе совместного использования методов спектроскопии и рассеяния синхротронного излучения.



Энвер Хамзиевич Мухамеджанов, доктор физико-математических наук, заместитель директора Института синхротронно-нейтронных исследований того же центра. Работы связаны с развитием методов структурной диагностики материалов с использованием синхротронного излучения.



Роман Алексеевич Сенин, кандидат физико-математических наук, исполняющий обязанности начальника отдела синхротронных исследований того же центра. Область научных интересов — рентгеновские изображения, микротомография, рентгеновская оптика, фазовые методы формирования контраста, математическая обработка изображений, автоматизация эксперимента.

ский центр синхротронного и терагерцового излучения на базе Института ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН (Новосибирск) [3] и Курчатовский центр синхротронного излучения (КИСИ) в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва) [4]. Сейчас на Курчатовском источнике работает более полутора десятков разнопрофильных исследовательских установок, которых по сложившейся традиции принято на-

зывать станциями. Ведется активное проектирование и строительство новых станций*.

Станция по имени Фаза

Все станции обладают своей спецификой, определяемой кругом решаемых с их помощью задач, однако принципы работы многих рентгенооптических элементов сходны. Рассмотрим для примера конструкцию и основные компоненты экспериментальной синхротронной станции фазочувствительных дифракционных методов «Фаза», введенной в эксплуатацию в 2013 г.

Станция «Фаза» расположена в обновленной части экспериментального зала, на канале вывода излучения из поворотного магнита большого накопительного кольца. Оборудование станции размещается в двух защитных домиках — «хатчах», которые обеспечивают радиационно-безопасные условия работы в экспериментальном зале. Управление аппаратурой полностью автоматизировано. Полная длина канала станции от точки излучения в поворотном магните накопительного кольца до места размещения образца составляет 36 м (по мировым меркам это далеко не рекорд).

Оптическая схема станции (рис.1) включает в себя первичное вертикально-коллимирующее зеркало, первичные щели, двухкристальный монохроматор с сагиттальным изгибом второго кристалла, вторичное вертикально-фокусирующее зеркало и вторичные щели.

Синхротронное излучение (СИ) по каналу вывода поступает из поворотного магнита на водоохлаждаемое первичное зеркало (рис.2), представляющее собой узкую пластину из монокристаллического кремния с напы-

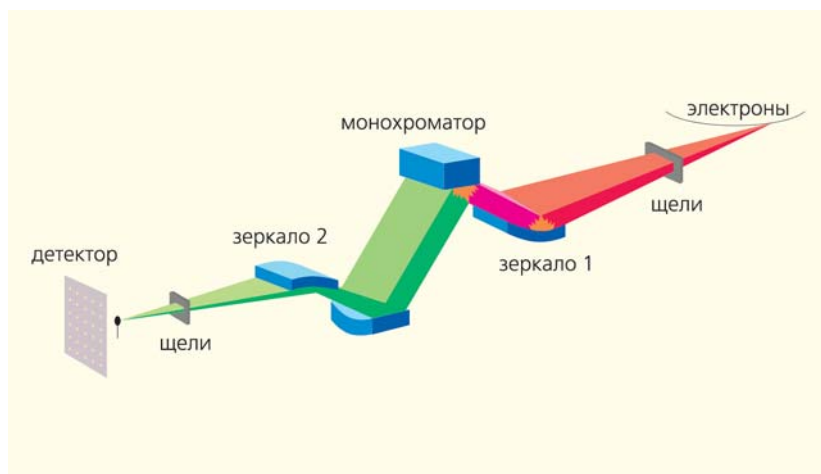


Рис.1. Рентгенооптическая схема станции «Фаза».

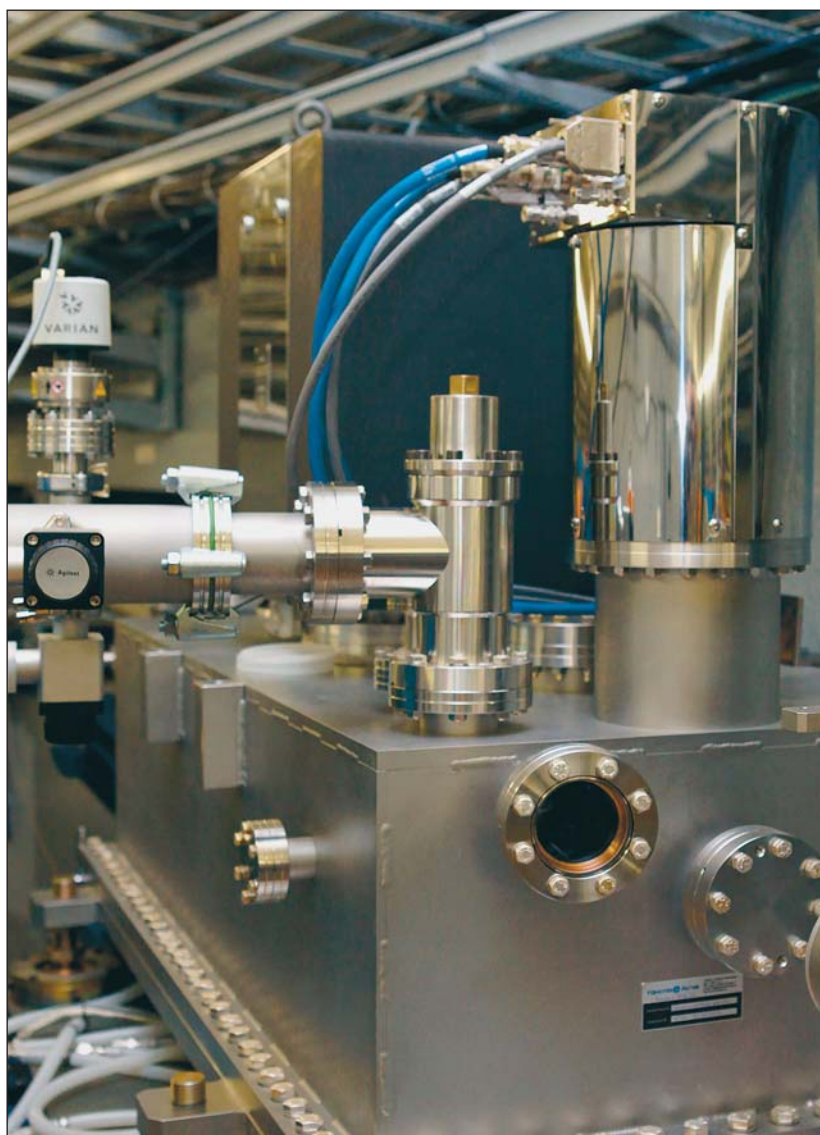


Рис.2. Коллимирующее зеркало станции «Фаза» в тоннеле ускорителя.

* Подробнее об этом см. статью М.В.Ковальчука, В.В.Квардакова и В.Н.Корчугова «КИСИ вчера, сегодня, завтра» в этом номере журнала.

ленными слоями платины и родия. Длина активной области зеркала составляет 560 мм, причем среднеквадратичная шероховатость поверхности не превышает 2.5 \AA . Зеркало располагается по отношению к пучку таким образом, что «белый» пучок СИ падает на него под скользящим углом $2-3$ мрад, при этом большая часть пучка, с длиной волны, не превышающей определенную коротковолновую границу, испытывает полное внешнее отражение. Цилиндрический изгиб зеркала в меридиональном направлении (параллельно пучку) позволяет трансформировать расходящийся в вертикальной плоскости пучок в плоскопараллельный.

Отраженный от первичного коллимирующего зеркала пучок СИ попадает на двухкристальный монохроматор, обеспечивающий выделение из «белого» спектра СИ излучения с фиксированной длиной волны в широком диапазоне энергий —

3.5 до 40 кэВ, в зависимости от угла Брэгга. С помощью второго кристалла, изогнутого в сагитальном направлении (перпендикулярно пучку), реализуется фокусировка монохроматического излучения в горизонтальной плоскости.

Монохроматическая волна попадает на вторичное эллиптически изогнутое зеркало, фокусирующее пучок СИ в вертикальной плоскости. Радиусы изгибов вторичного зеркала и второго кристалла монохроматора подобраны таким образом, чтобы «собрать» рентгеновский пучок в обеих плоскостях в одной точке — на исследуемом образце. Двойная фокусировка позволяет повысить плотность потока излучения в месте размещения образца более чем на порядок.

Исследуемый образец располагается на большом (весом 1.5 т) многокружном гониометре (рис.3), способном нести дополнительные устройства (печи, криостаты, магниты, камеры высокого давления и др.), что необходимо для контролируемого создания особых термодинамических условий на образце в ходе рентгеновского исследования. Все шесть осей гониометра пересекаются строго в одной точке — в месте расположения образца, что позволяет прецизионно задавать его угловую ориентацию в пространстве с точностью до десятых долей угловой секунды и линейную — до долей микрометра.

Задача этой станции — зарегистрировать с высокой точностью картину дифракции рентгеновских лучей от объекта. Название «Фаза» подчеркивает, что здесь приоритет отдается фазовым эффектам при рассеянии. Для анализа углового распределения излучения, упруго рассеянного образцом, используются современные энерго-дисперсионные и двумерные позиционно-чувствительные детекторы.

Станция может функционировать в нескольких режимах в зависимости от расположения ее рентгенооптических элементов и характера решаемых задач. Один из режимов обеспечивает максимальную яркость синхротронного пучка на образце, другой — оптимальное угловое разрешение дифракционного эксперимента с некоторыми неизбежными потерями интенсивности.

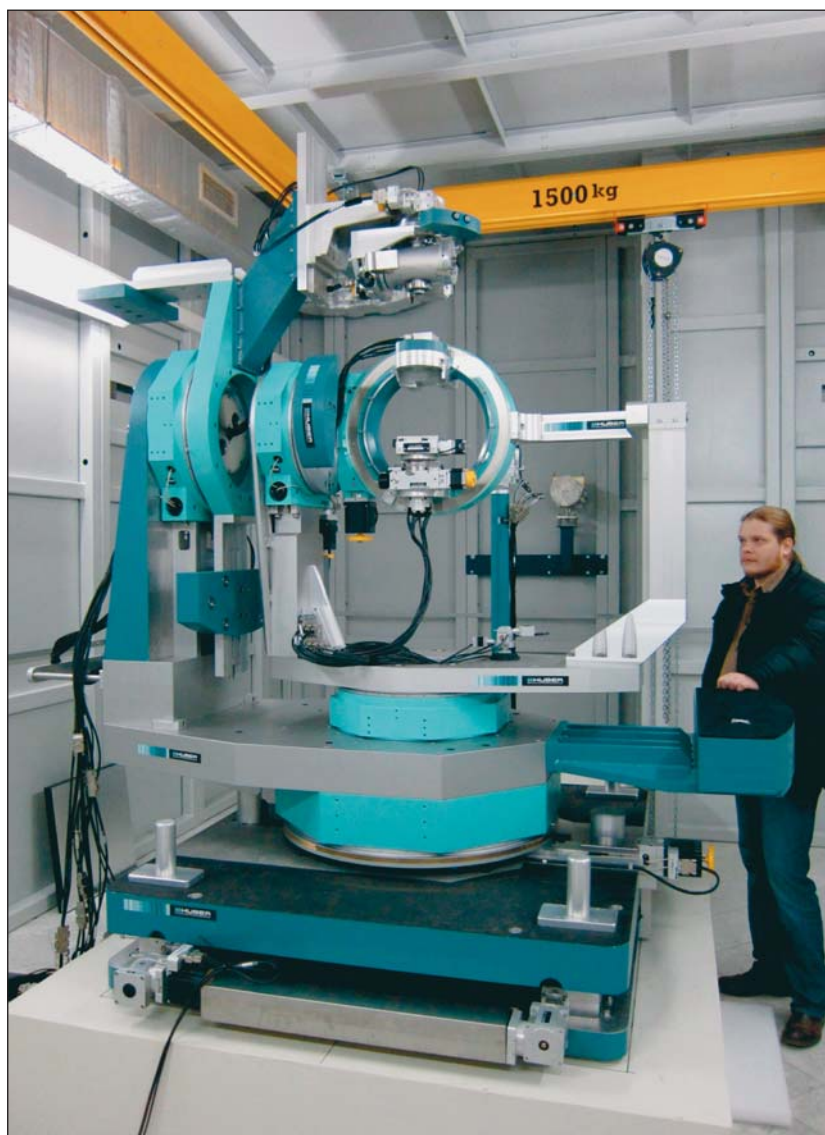


Рис.3. Многокружный гониометр производства фирмы Huber на станции «Фаза».

Что и как изучают

Если говорить в целом, на станциях Курчатовского центра синхротронного излучения реализованы все самые востребованные методики рентгеновской диагностики (рис.4), которые удобно разбить на три крупные группы: методы дифракции и рассеяния, рентгеноспектральные методы и методы прямой визуализации. Первая группа методов предусматривает регистрацию картины рассеяния излучения объектом, т.е. оперирует изображениями в обратном пространстве. Она наиболее многочисленна и включает такие направления, как белковая кристаллография, рентгеноструктурный анализ монокристаллов низкомолекулярных соединений, порошковая дифрактометрия, рефлектометрия, диффузное рассеяние, малоугловое рассеяние. Получаемая здесь информация — атомная структура кристаллического объекта, ориентация кристаллитов в поликристаллических образцах или распределение глобул высокомолекулярных соединений по размерам. На нескольких станциях Курчатовского источника (в частности, на описанной выше станции «Фаза») представлены новые, наиболее современные фазочувствительные дифракционные методы: стоячие рентгеновские волны (СРВ), многоволновая дифракция, картографирование обратного пространства, резонансная дифракция, рентгеноакустика. С их помощью удастся определять позиции внедренных атомов в кристаллической решетке, структурные характеристики нанослоев и интерфейсов, тонкие детали кристаллической и электронной структуры кристаллов. На станции «Ленгмюр» реализуются эксперименты по рассеянию рентгеновского излучения на планарных биоорганических структурах, формирующихся на границе раздела вода—воздух в геометрии скользящего падения. Благодаря им мы можем изучать

Станции КИСИ: методы и объекты

Большое кольцо:

Ленгмюр: дифракция и рассеяние в скользящей геометрии, стоячие рентгеновские волны (ленгмюровские пленки, слоистые наносистемы на поверхности жидкости)
 ДИКСИ: дифракционное кино — скоростная дифрактометрия (биологические объекты)
 СТМ: структурное материаловедение — малоугловое рассеяние, дифрактометрия и спектроскопия EXAFS
 РСА: рентгеноструктурный анализ (кристаллы и порошки)
 РТ-МТ: рентгеновская топография и микротомография
 ФАЗА: фазочувствительные дифракционные методы, плосковолновая дифракция
 НаноФАБ: дифракция в условиях высокого вакуума
 Медиана: получение изображений с применением фазового контраста (био- и наноматериалы)
 Белок: белковая кристаллография и порошковая дифракция
 РКФМ: рентгеновская кристаллография и материаловедение — дифракция
 Оптическая диагностика синхротронного пучка: диагностика режимов работы ускорителя
 Рефра: рефракционная оптика, EXAFS-спектроскопия
 EXAFS-D: EXAFS-спектроскопия с пространственной дисперсией.
 LIGA: глубокая рентгеновская литография
 НаноФЭС: фотоэлектронная спектроскопия с высоким пространственным и энергетическим разрешением
 ПРО: прецизионная рентгеновская оптика — дифракция высокого разрешения, топография, рефлектометрия, стоячие рентгеновские волны.

Малое кольцо

ФЭС: фотоэлектронная спектроскопия (твердотельные объекты)
 СПЕКТР: оптическая спектроскопия (полупроводники и диэлектрики)
 ЛОКУС: люминесценция и оптические исследования

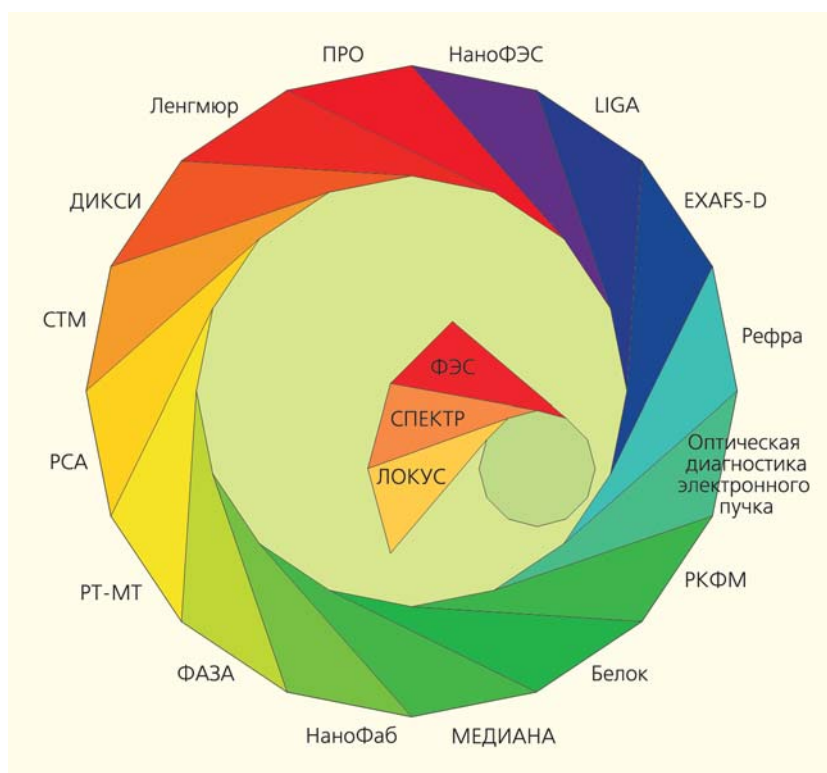


Рис.4. Схема размещения экспериментальных станций на КИСИ.

структуру белково-липидных пленок на поверхности жидкой субфазы, т.е. получать уникальную информацию о структурной организации и композиционном составе моделей клеточных мембран в физиологических условиях и при патологическом воздействии на клетку. Вторая группа — рентгеноспектральные методы — имеет дело с энергетическим распределением вторичного излучения (электронов, флуоресценции), порожденным первичным пучком синхротронного излучения. Из них в Курчатовском центре реализованы рентгеновская спектроскопия тонкой структуры в окрестности края поглощения EXAFS/XANES, а также элементный рентгенофлуоресцентный анализ. Эти методы способны с высокой степенью локальности определять химический состав образцов. Визуализационные методики дают непосредственное изображение объекта в реальном пространстве, основываясь на его поглощающей, преломляющей либо отражающей способности. Они представлены рентгеновской дифракционной топографией, микрофотографией, фазово-контрастной интроскопией.

Прикладные исследования ведутся по двум основным направлениям: во-первых, структурная диагностика функциональных материалов (сверхпроводников [5], катализаторов [6], материалов ядерного топливного цикла [7, 8] и многих других), а также объектов живой и неживой природы (тканей живых организмов [9], фрагментов окаменелостей, минералов [10] и др.). Во-вторых, в отдельное направление можно выделить изучение структуры белковых кристаллов (рис.5) [11] и упорядоченных биоорганических наносистем [12, 13]. Огромное внимание уделяется развитию инструментальной базы исследований, реализации новых методов, а также алгоритмам совместного использования разнородных методов для повышения эффективности и информативности рентгеновской диагностики. Исследования ведутся круглосуточно в режиме «фабрики научных данных» по заявкам пользователей как из других подразделений Курчатовского НБИКС-центра и НИЦ «Курчатовский институт», так и из внешних организаций. География организаций-пользователей постоянно расширяется.

Чтобы стало яснее, какого рода информацию удастся получать на станциях КИСИ, приведем лишь два примера комплексной структурной диагностики современных функциональных материалов, проводимой с одновременным использованием возможностей нескольких станций.

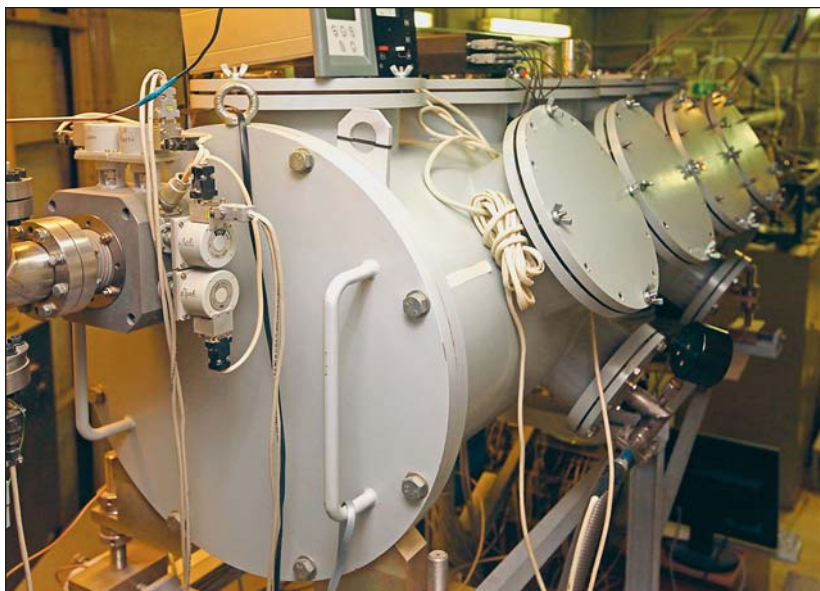


Рис.5. Вакуумная камера фокусирующего зеркала станции «Белок».

Начинка «сверхпровода»

Первый пример касается диагностики технических изделий из сверхпроводников. Сверхпроводящие материалы активно используются сегодня для изготовления источников сильных и сверхсильных магнитных полей в рамках крупных международных проектов, таких как создание экспериментального термоядерного реактора ИТЭР и тяжело-ионных ускорителей FAIR и НИКА, модернизации Большого адронного коллайдера. Всё большие объемы сверхпроводящих токоносителей требуются для производства сильнопольных МРТ-томографов для медицины.

В России под организационным руководством НИЦ «Курчатовский институт» была разработана и внедрена в производство на Чепецком механическом заводе (г.Глазов) уникальная технология изготовления сверхпроводящих кабелей на базе низкотемпературных сверхпроводящих материалов Nb_3Sn и $NbTi$ [14].

Мы исследовали тонкий поперечный срез композитного сверхпроводящего провода на основе низкотемпературной сверхпроводящей фазы Nb_3Sn , полученного по бронзовой технологии [15] (образец для исследования предоставлен Е.А.Дергуновой и др., Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им.А.А.Бочвара, Москва). На рентгенотомографической реконструкции поперечного среза сверхпроводящего провода (рис.6, слева) хорошо различимы его основные структурные элементы: центральное ядро из стрендов сверхпроводящей фазы Nb_3Sn в медной матрице, диффузионно-барьерный слой из ниобия с танталовыми вкладками, внешняя технологическая оболочка из меди.

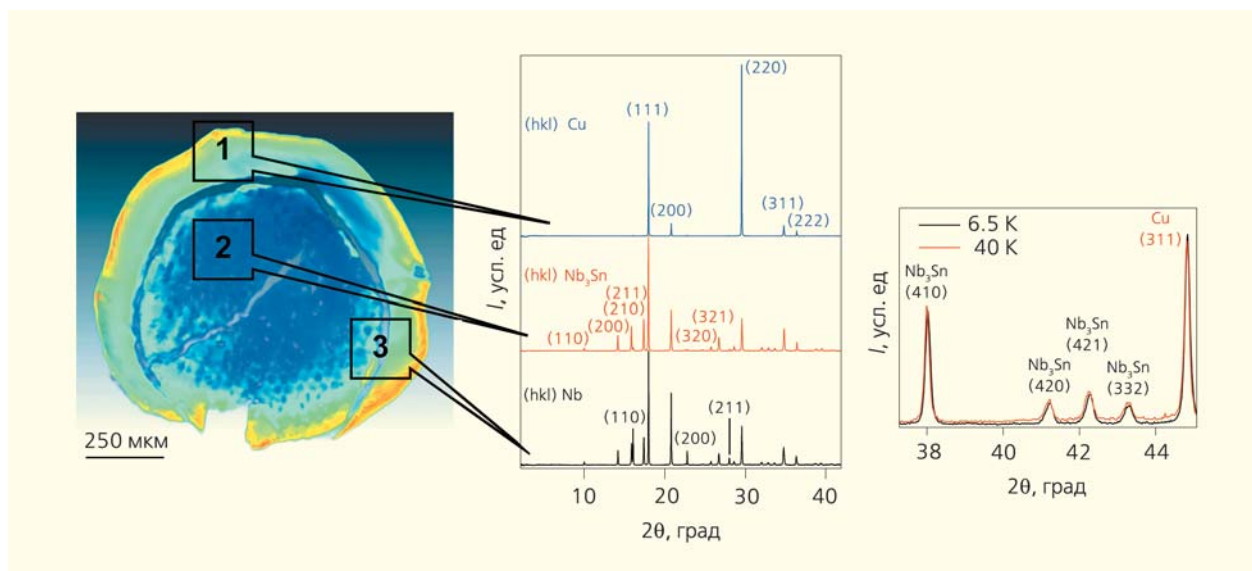


Рис.6. Исследование поперечного среза композитного сверхпроводящего провода Nb_3Sn , синтезированного по бронзовой технологии: рентгеномографическая реконструкция (слева) и данные рентгеновской микродифракции (справа).

Высококачественное рентгеновское изображение композитного сверхпроводящего провода, полученное на станции рентгеновской топографии и микротомографии (РТ-МТ) [16], позволило дополнительно провести дифракционное картографирование этого образца на станции структурного материаловедения (СТМ) [17]. В геометрии пропускания была измерена серия дифрактограмм, соответствующих разным точкам на образце (1, 2, 3 на рис.6), размер рентгеновского зонда при этом составлял 200 мкм. Состав кристаллических фаз в исследованном микрогетерогенном объекте оказался неодинаковым для разных точек. Так, например, в точке 1 наблюдается исключительно фаза меди с ярко выраженной текстурой волочения. В точке 2 наряду с изотропной фазой меди присутствует основная функциональная сверхпроводящая фаза Nb_3Sn (структурный тип A15). В точке 3 дополнительно регистрируются фазы Nb и Ta из диффузионно-барьерного слоя. Отсутствие фазы ниобия в центральном функциональном ядре служит важным критерием того, насколько оптимизирован технологический процесс получения сверхпроводника. Дело в том, что исходная заготовка состоит из композита ниобия и высокооловянной бронзы, а сверхпроводящая фаза формируется в ходе длительного термического отжига, сопровождающегося диффузией олова в ниобий. Корректная количественная оценка наличия фазы металлического ниобия из рентгеновской дифрактограммы может быть получена только при условии точного разделения вкладов барьерного слоя и функционального ядра. Наряду с составлением дифракционной карты было проведено низкотемпературное дифракционное исследование области функционального

ядра (см. рис.6). Подтвердилось предположение, что сверхпроводящая фаза Nb_3Sn не претерпевает мартенситного фазового перехода, оставаясь кубической и в сверхпроводящем состоянии. Это проявляется в том, что дифракционные пики не испытывают статистически значимого уширения или расщепления при понижении температуры ниже точки перехода в сверхпроводящее состояние. Данный вывод важен, поскольку, по некоторым данным, факт мартенситного перехода с понижением кристаллографической симметрии из кубической фазы в тетрагональную коррелирует с критическими характеристиками сверхпроводника [18].

«Киносъемка» диффузии

Еще одно исследование, проведенное совместно на станциях РТ-МТ и СТМ, касается механизма активации алюминия эвтектическим сплавом $\text{Ga}_{85}\text{In}_{15}$, жидким при комнатной температуре. Если обработать металлический образец по оригинальной активационной методике, разработанной в Институте катализа СО РАН в Новосибирске (В.И.Бухтияров, А.И.Низовский и др.), алюминий приобретает способность количественно (со 100% степенью превращения) реагировать с водой, что сопровождается выделением водорода [19]. Это может представлять интерес для разработки новых компактных источников водорода для топливных элементов.

Метод «рентгеновского кино» дает возможность проследить в режиме реального времени за эволюцией капли эвтектического сплава $\text{Ga}_{85}\text{In}_{15}$, нанесенной на поверхность алюминиевого брус-

ка. Данные получены на станции РТ-МТ с использованием специально выбранной длины волны рентгеновского излучения выше края поглощения галлия, что позволяет существенно повысить контраст картографирования локального распределения галлия (рис.7, верхняя панель). На серии снимков хорошо видно, что при проведении модельного рентгеновского эксперимента в масштабе времени десятков минут идет межзеренная диффузия эвтектического сплава в объем алюминия, проявляющаяся как равномерное потемнение Al-части образца с одновременным осветлением первоначально черной капли эвтектики. Дополнительная информация о протекающих изменениях на атомарном уровне была получена из данных рентгеноабсорбционной спектроскопии (станция СТМ, рис.7, нижняя панель). Удалось показать, что в активированном алюминии химические связи Ga–Ga, характерные для исходной эвтектики, замещаются на связи Ga–Al, т.е. движущей силой диффузии оказывается образование интерметаллидов Al–Ga–(In). В частности, видоизменение тонкой структуры спектра XANES с сохранением энергетического положения края рентгеновского поглощения при переходе от эвтектики к активированному алюминию указывает на сохранение степени окисления атомов галлия Ga^0 , но существенную модификацию их химического окружения. Вейвлет-преобразование протяженной осциллирующей части спектра поглощения (EXAFS) в наглядном виде представляет локальное окружение атомов галлия. Пятна на вейв-

лет-карте соответствуют координационным сферам — группам атомов, находящимся на определенном расстоянии от центрального. Причем координата пятна по оси ординат связана с межатомным расстоянием, а по оси абсцисс — с порядковым номером Z атома-соседа. Появление нового яркого пятна на вейвлет-карте спектра EXAFS для модифицированного алюминия говорит о том, что атомы галлия образуют химические связи преимущественно с атомами алюминия.

Разработанная комплексная методика диагностики может позволить оптимизировать процедуру активации алюминия: снизить количество необходимого для полной активации эвтектического сплава, а также уменьшить время обработки.

* * *

В рамках краткой статьи невозможно исчерпывающим образом отразить всё многообразие исследований, ведущихся и планируемых к реализации на станциях КИСИ. Оборудование станций подвергается постоянной модернизации и оптимизации. Концепция программы развития нацелена на решение ряда задач. Прежде всего, диагностика функциональных материалов должна по возможности проводиться в особых условиях, моделирующих условия их эксплуатации (сверхпроводники при низких температурах, магнитные материалы в магнитном поле, конструкционные материалы под механической нагрузкой и т.д.). Далее, большинство современных материалов нанотехнологий характеризуется микрогетероген-

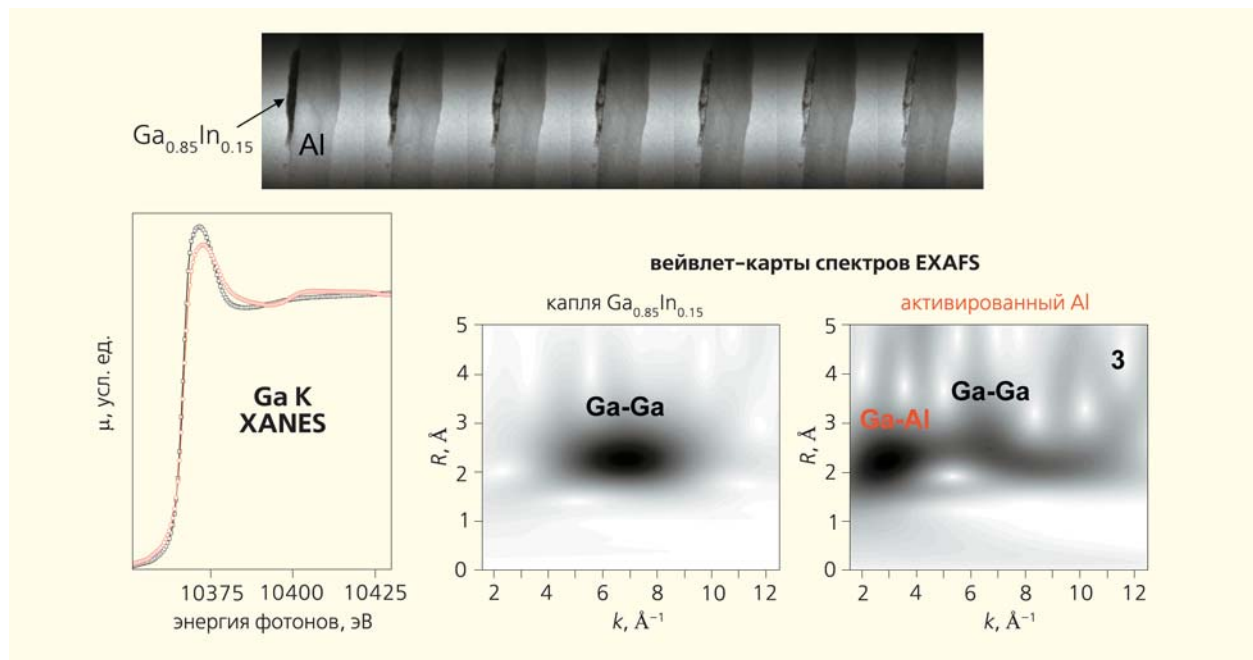


Рис.7. Исследование механизма активации технического алюминия жидким эвтектическим сплавом $Ga_{85}In_{15}$: последовательность рентгеномикроскопических снимков в режиме реального времени с шагом 10 мин (сверху) и изменение рентгеновских спектров поглощения K -края галлия (снизу).

ностью — значит, для их эффективной диагностики необходимы повышение степени локальности рентгеновских методов, переход к микророндовым методикам с фокусированными рентгеновскими пучками. Для осуществления мониторинга быстротекущих процессов структурообразования требуется развитие методов с временным разрешением, а также подходов *in situ*—*probe* (накачка—регистрация отклика). Детальная функциональная диагностика современных сложных ие-

рархически структурированных материалов невозможна без интегрированного применения всех доступных рентгеновских синхротронных методов, а также активного вовлечения других методов — нейтронных, электронно-микроскопических и др.

Научный персонал станций Курчатовского источника синхротронного излучения открыт к сотрудничеству со всеми заинтересованными организациями. ■

Литература

1. *Зубавичус Я.В., Словохотов Ю.Л.* Рентгеновское синхротронное излучение в физико-химических исследованиях // Усп. хим. 2001. Т.70. С.429—463.
2. Электронный ресурс: <http://www.lightsources.org>.
3. *Ancharov A.I., Baryshev V.B., Chernov V.A. et al.* Status of the Siberian synchrotron radiation center // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2005. V.543. № 1. P.1—13.
4. *Korchuganov V., Blokhov M., Kovalchuk M. et al.* The status-2004 of the Kurchatov center of SR // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2005. V.543. №1. P.14—18.
5. *Пряничников С.В., Титова С.Г., Зубавичус Я.В. и др.* Немонотонные структурные изменения в ВТСП-керамике Bi-2201 при изменении кислородной нестехиометрии // Физ. мет. металловед. 2012. Т.113. №8. С.821—826.
6. *Титов Д.Н., Устюгов А.В., Ткаченко О.П. и др.* Состояние активных компонентов на поверхности катализатора низкотемпературного окисления монооксида углерода PdC₁₂-CuCl₂/γAl₂O₃ // Кинет. катал. 2012. Т.53. №2. С.272—284.
7. *Momot G.V., Podurets K.M., Pogorelyi D.K. et al.* Diagnostics of coated fuel particles by neutron and synchrotron radiography // Cryst. Rep. 2011. V.56. №7. P.1104—1109.
8. *Стефановский С.В., Ширяев А.А., Зубавичус Я.В.* Структурное состояние железа в стеклах и стеклокристаллических материалах для иммобилизации радиоактивных отходов с высоким содержанием натрия и алюминия // Физ. хим. обработки материалов. 2012. №3. С.70—78.
9. *Вазина А.А., Васильева А.А., Ланина Н.Ф. и др.* Исследование молекулярной и наноструктурной динамики биологических тканей под влиянием высокочастотной электрохирургической сварки // Известия РАН, сер. физ. 2013. Т.77. №2. С.168—172.
10. *Kovalenko E.S., Shiryayev A.A., Kaloyan A.A., Podurets K.M.* X-ray tomographic study of spatial distribution of microinclusions in natural fibrous diamonds // Diam. Relat. Mater. 2012. V.30. P.37—41.
11. *Trofimov A.A., Polyakov K.M., Tikhonova T.V. et al.* Covalent modifications of the catalytic tyrosine in octahaemocytochrome c nitrite reductase and their effect on the enzyme activity // Acta Crystallogr. D. 2012. V.68. P.144—153.
12. *Новикова Н.Н., Ковальчук М.В., Юрьева Э.А. и др.* Рентгенофлуоресцентные измерения в условиях полного внешнего отражения для исследования взаимодействия белков с ионами металла в биологических системах // Кристаллография. 2012. Т.57. №5. С.727—735.
13. *Ковальчук М.В., Новикова Н.Н., Якунин С.Н.* Стоячие рентгеновские волны и биологическое материаловедение // Природа. 2012. №12. С.3—14.
14. *Abdyukhanov I.M., Shikov A.K., Vorobyeva A.E. et al.* Of 500 kg Nb₃Sn Bronze Strand Produced in Russian Federation for ITER Project // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011 V.21. №3. P.2567—2570.
15. *Tachikawa K., Itoh K., Kamata K. et al.* Improved multifilamentary Nb₃Sn conductors produced by the titanium-bronze process // J. Nucl. Mater. 1985. V.133—134. P.830—833.
16. *Сенин Р.А., Хлебников А.С., Вязовецкова А.Е. и др.* Модернизированная станция «Рентгеновская топография и микротомография» на Курчатовском источнике синхротронного излучения // Кристаллография. 2013. Т.58. №3. С.510—516.
17. *Трофимова Н.Н., Велигжанин А.А., Мурзин В.Ю. и др.* Структурная диагностика функциональных наноматериалов с использованием рентгеновского синхротронного излучения // Росс. нанотехн. 2013. Т.8. № 5—6. С.108—112.
18. *Zhou J., Jo Y., Sung Z.H. et al.* Evidence that the upper critical field of Nb₃Sn is independent of whether it is cubic or tetragonal // Appl. Phys. Lett. 2011. V.99. P.122507—122509.
19. *Низовский А.И., Бухтияров В.И., Велигжанин А.А. и др.* Особенности взаимодействия алюминия с эвтектикой Ga₈₅In₁₅ по данным рентгеновской синхротронной диагностики // Кристаллография. 2012. Т.57. №5. С.774—781.

Физика нейтрино: промежуточные итоги

М.Д.Скорохватов

Открытие нейтрино — достаточно известная история, о которой читателям «Природы» только что напомнил С.С.Герштейн [1]. Почти 25 лет, от гипотезы В.Паули до знаменитых экспериментов Ф.Райнеса и К.Коуэна, попытки зарегистрировать неуловимое нейтрино казались совершенно безуспешными. Характеризуя оценочное значение сечения (вероятности) взаимодействия нейтрино с веществом, Райнес писал: «Чтобы понять, насколько мало это взаимодействие, заметим, что средний путь нейтрино в жидком водороде составляет 1000 световых лет» [2]. И все же нейтрино было обнаружено; более того, и по сей день эксперименты, в которых детектируются нейтрино, чрезвычайно востребованы в исследованиях — в астрофизике, астрономии, космологии, геофизике, а в физике частиц изучение свойств и взаимодействий нейтрино занимает одно из центральных направлений.



Михаил Дмитриевич Скорохватов, доктор физико-математических наук, заместитель директора Центра фундаментальных исследований, директор Отделения физики частиц НИЦ КИ, заведующий кафедрой физики элементарных частиц Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Область научных интересов — ядерная физика и физика частиц, в том числе физика нейтрино и астрочастиц.

нов и кварков. Массы частиц в СМ генерируются с помощью гипотетического поля Хиггса; поиски скалярного бозона, кванта этого поля, недавно завершились успехом на ускорителе в ЦЕРНе [3].

Нейтрино в Стандартной модели

По современным представлениям, окружающий нас материальный мир состоит из фермионов — лептонов и кварков — элементарных частиц со спином $1/2$, взаимодействующих посредством полей, квантами которых являются фотоны (электромагнитное взаимодействие), W - и Z -бозоны (слабое взаимодействие), а также глюоны (сильное взаимодействие). Данные о наиболее элементарной структуре материи обобщены в так называемой Стандартной модели (далее СМ, рис.1), с высокой точностью описывающей совокупность свойств и взаимодействий известных нам лепто-

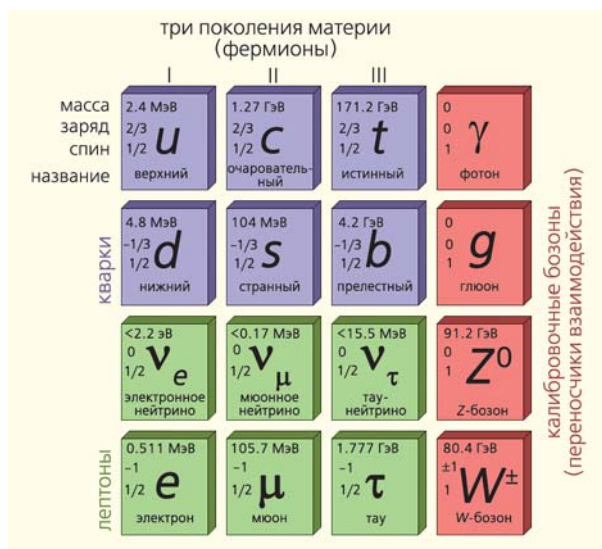


Рис.1. Структура Стандартной модели.

Надежно установлено, что нейтрино и его античастица (антинейтрино) — это нейтральные лептоны, принимающие участие только в слабом взаимодействии. В научной литературе состояние, в котором нейтрино рождается или аннигилирует, называется флэйворным (flavour — аромат). В результате исследований были обнаружены три разных флэйворных состояния — электронное (ν_e), мюонное (ν_μ) и тау- (ν_τ) нейтрино и соответствующие им антинейтрино. Вместе с другими фермионами они образуют три семейства, или поколения. Заряженные частицы в каждом поколении обладают одинаковыми характеристиками, за исключением масс: частицы младших поколений легче. Это делает возможным распады частиц старших поколений, а стабильная материя во Вселенной практически полностью состоит из лептонов и кварков первого поколения.

После открытия нейтрино много усилий было потрачено на измерение их масс, но проведенные эксперименты показали, что масса нейтрино либо чрезвычайно мала, либо даже равна нулю. Задача прямого измерения массы у нейтрино оказалась настолько сложной, что по сей день мы имеем только ограничения на искомые величины: $m(\nu_e) < 2.1$ эВ, $m(\nu_\mu) < 170$ кэВ, $m(\nu_\tau) < 15.5$ МэВ. Сегодня из косвенных данных известно, что масса у нейтрино все-таки есть (см. далее). Соотношение массы (в энергетических единицах) и энергии нейтрино E , с которыми мы имеем дело в текущих экспериментах, всегда соответствует условию $E \gg m(\nu)$, т.е. наблюдаемые нами нейтрино — частицы релятивистские.

Частицы и взаимодействия в СМ описываются с учетом их наблюдаемой инвариантности по отношению к фундаментальным симметриям — пространственной четности P (инверсии пространственных координат $r \rightarrow -r$), зарядовой четности C (переходу от частицы к античастице) и инверсии времени T ($t \rightarrow -t$). В середине прошлого века было обнаружено, что в процессах слабого взаимодействия пространственная и зарядовая четности в максимальной степени нарушены. Несохранение четности приводит к продольной поляризации частиц. В релятивистском случае это означает, что флэйворные состояния нейтрино должны описываться «левыми» спинорами — $\psi_L(\nu)$, со спиральностью $-1/2$ (спин частицы ориентирован против направления ее движения), а антинейтрино — «правыми» — $\psi_R(\bar{\nu})$, со спиральностью $+1/2$ (спин направлен по движению частицы). С учетом этих свойств была развита теория слабого взаимодействия [4], которая затем, в 70-х годах, была обобщена в теории Вайнберга—Салама—Глэшоу. Последняя в формализме СМ стала основой для описания слабых и электромагнитных взаимодействий лептонов и кварков. В рамках этой теории левые компоненты полей частиц (правые компоненты античастиц) объеди-

нены в дублеты группы $SU(2)$, образующие лептонный и кварковый сектора (рис.1):

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_{eL} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_{\mu L} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_{\tau L} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$$

В настоящее время нет убедительных доказательств существования «правого» нейтрино и «левого» антинейтрино. Примесь «неправильной» спиральности для релятивистских нейтрино, обусловленной массой, сильно подавлена и определяется фактором $m(\nu)/E \ll 1$, что недоступно экспериментальной проверке. Однако сохранение СРТ-комбинации фундаментальных симметрий, которое служит базисным принципом теории, дает основание полагать, что правые нейтрино и левые антинейтрино существуют. Но тогда их взаимодействие с веществом должно быть ничтожным, даже в сравнении с проявлением слабых сил, и такие нейтрино должны быть, как отмечал Б.М.Понтекорво, «стерильными» [5]. В СМ стерильные состояния нейтрино могут быть введены в виде $SU(2)$ -синглетов: $(\nu_e)_R$, $(\nu_\mu)_R$ и $(\nu_\tau)_R$, которые не связаны с W - и Z -бозонами и поэтому не участвуют в слабом взаимодействии.

После обнаружения несохранения P - и C -четности в β -распаде была разработана теория двухкомпонентного нейтрино, допускающая описание безмассового нейтрино с помощью двухкомпонентных спиноров. Правые нейтрино и левые антинейтрино в этом случае вообще не использовались. Сегодня эта теория не столь актуальна, но связанная с ней история повлияла на развитие физики нейтрино в Курчатовском институте. Старшие коллеги рассказывали, что Л.Д.Ландау, один из разработчиков этой модели, выступая на семинаре, заинтересовал И.В.Курчатова возможностями проверки теории. Для этого предполагалось измерить продольную поляризацию электронов в β -распаде ядер. Разработка эксперимента была поручена П.Е.Спиваку, который привлек к работам своего ученика Л.А.Микаэляна. Этот случай дал старт развитию в Курчатовском институте целого направления исследований: в конце 60-х годов была разработана программа работ по физике реакторных нейтрино под руководством Микаэляна и созданы две нейтринных лаборатории (одна на атомной станции в Ровно, другая в Красноярске), где на ядерных ректорах учеными Курчатовского института были выполнены уникальные исследования свойств и взаимодействий электронного антинейтрино, поставлены эксперименты по поиску нейтринных осцилляций, намечены пути практического использования нейтринного излучения. Сам же Петр Ефимович Спивак до конца жизни интересовался проблемой масс нейтрино и был одним из авторов уникального проекта, завершившегося измерением указанного выше рекордного предела на массу $\bar{\nu}_e$, излучаемого в β -распаде трития.

Тожественны ли нейтрино и антинейтрино?

За исключением нейтрино, все фермионы в СМ — это заряженные частицы, которые в свободном состоянии описываются уравнениями Дирака. Благодаря отсутствию электрического заряда нейтрино может быть истинно нейтральным лептоном, т.е. частицей, тождественно совпадающей со своей античастицей. В этом случае описание нейтрино возможно с помощью уравнений Майораны, которые применимы для тождественных фермионов. Однако выяснить этот вопрос оказалось непросто из-за спиральности нейтрино. Например, предпринимались попытки поглотить антинейтрино $\bar{\nu}_e$ в процессе обратного β -распада. Однако даже в случае $\bar{\nu}_e \equiv \nu_e$ такая реакция запрещена из-за правой спиральности налетающего антинейтрино.

Вопрос о тождественности нейтрино и антинейтрино до настоящего времени остается открытым. Способом решения проблемы считается поиск процессов безнейтринного двойного β -распада некоторых ядер ($0\nu 2\beta$), т.е. реакций спонтанного распада ядер, в которых, например, заряд ядра увеличивается на две единицы и испускаются только два электрона (рис.2). Как видно из рисунка, в этом процессе на первом этапе излучаются электрон и виртуальное антинейтрино, которое в случае $\bar{\nu} \equiv \nu$ поглощается промежуточным ядром и вызывает обратный β -распад с испусканием еще одного электрона. Обнаружить процесс ($0\nu 2\beta$) пока не удалось, хотя интенсивные поиски ведутся во многих научных центрах мира [6]. Установленный предел на период полураспада ($0\nu 2\beta$) ряда ядер (^{76}Ge , ^{100}Mo , ^{130}Te и др.) составляет 10^{24} – 10^{25} лет. Поиски продолжаются в нескольких международных проектах (GERDA, SUPERNEMO, EXO и др.) с участием российских ученых.

Работы по изучению двойного β -распада тесно связаны с разработкой технологий и производством изотопно-обогащенных материалов. В Курча-

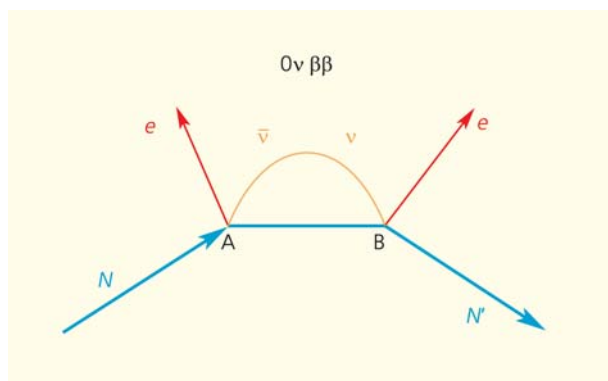


Рис.2. Двойной бета-распад ($0\nu 2\beta$) без излучения антинейтрино, который становится возможным для нейтрино Майораны.

товском институте были созданы и действуют экспериментальные установки, использующие самые современные методики разделения изотопов. В частности, с помощью этих методов были получены наиболее интересные для экспериментов обогащенные мишени, среди которых ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{130}Xe , ^{150}Nd .

За пределами Стандартной модели

Расширение СМ тесно связано с проблемой нейтринных масс. В рамках модели существует два способа построения массового члена. Во-первых, все заряженные дираковские фермионы приобретают массу путем взаимодействия с полем Хиггса левыми и правыми компонентами. Поэтому по аналогии существует возможность построения «дираковской» массы нейтрино ($\bar{\nu} \neq \nu$) путем введения в СМ правых нейтрино и левых антинейтрино. Другой способ допускает для истинно нейтральных фермионов построение «майорановской» массы ($\bar{\nu} \equiv \nu$), когда используются только левые компоненты нейтрино и правые компоненты антинейтрино. Однако оба способа выглядят неубедительно из-за несоответствия масштаба масс нейтрино и заряженных лептонов (например, $m(\nu_e)/M(e^-) < 4 \cdot 10^{-6}$), что трудно объяснить. Теоретики находят несколько вариантов решения проблемы, которые, однако, связаны с изменением СМ и введением новых частиц. Наиболее популярная гипотеза опирается на так называемый механизм see-saw (качелей), в котором вводятся правые нейтрино (левые антинейтрино), обладающие гигантской майорановской массой $M \sim 10^{14}$ – 10^{16} ГэВ. В этой модели массы наблюдаемых нейтрино обратно пропорциональны M , что обеспечивает их очень маленькую величину. Добавление нейтрино с новым масштабом масс означает построение новой физики за рамками СМ.

Другая задача связана с поисками электромагнитных свойств нейтрино, так как оно хотя и не имеет заряда, но может обладать магнитным моментом. Теоретические оценки допускают такую возможность, но величина магнитного момента оказывается пропорциональной массе нейтрино, что приводит к слишком ничтожному значению для обнаружения в экспериментах. Однако существуют теории, расширяющие СМ, в которых магнитный момент нейтрино зависит уже от массы заряженного лептона. В этом случае он достигает величин, близких к чувствительности измерений: $\mu_{\text{экс}} < 3 \cdot 10^{-11} \mu_B$ (реакторные антинейтрино) и $\mu_{\text{экс}} < 5 \cdot 10^{-11} \mu_B$ (солнечные нейтрино), где μ_B — магнетон Бора. Поэтому продолжение поисковых работ в этом направлении представляет большой интерес, в том числе как тест вариантов расширения СМ.

Одной из центральных проблем остается нарушение в слабых взаимодействиях CP-инвари-

антности, т.е. симметрии при комбинированной операции зарядовой и пространственной инверсии. Дело в том, что на основании экспериментов по изучению распадов нейтральных каонов, проведенных еще в 1964 г., было доказано, что в кварковом секторе комбинированная CP-четность не сохраняется. Этот вывод был подтвержден в современных экспериментах, в которых исследовались распады B^0 -мезонов [7]. Открытие CP-нарушения имеет принципиальное значение, так как впервые указывает нам, что в природе все-таки существует различие между частицами и античастицами. Попытки объяснения CP-нарушения привели к гипотезе, что в слабом взаимодействии флэйворные состояния кварков в дублетах (1) представляют собой суперпозицию состояний, соответствующих свободным частицам:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V_{CKM} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}, \quad V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix},$$

где V_{CKM} называется матрицей Каббиво—Кабаяши—Маскава и определяет смешивание кварков. Японские физики показали [8], что, если матрица смешивания 3×3 содержит комплексные элементы, CP-симметрия в слабых процессах с участием кварков будет нарушена. Существует ли смешивание у лептонов и нарушена ли CP-симметрия в лептонном секторе? Далее мы обсудим эти проблемы, но отметим, что пока эффектов CP-нарушения у лептонов не наблюдалось.

Нейтринные осцилляции

Важнейшим открытием в области физики частиц стало открытие нейтринных осцилляций. Это явление, наблюдаемое как с природными, так и с искусственными источниками нейтрино, заключа-

ется в том, что при распространении нейтрино в вакууме или в среде его флэйворное состояние с определенной вероятностью может изменяться. Например, в пучке мюонных нейтрино, рожденных на ускорителе, по мере удаления от источника наблюдаются переходы $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.

Оказалось, что феноменологическое описание эффекта осцилляций можно дать, используя, как и в случае кварков, идею представления флэйворного состояния нейтрино в виде суперпозиции состояний, обладающих определенными массами:

$$\begin{aligned} \nu_e &= \cos\theta \times \nu_1 + \sin\theta \times \nu_2, \\ \nu_\mu &= -\sin\theta \times \nu_1 + \cos\theta \times \nu_2, \end{aligned}$$

где для наглядности представлена упрощенная модель с двумя флэйворными состояниями и нейтрино ν_1, ν_2 с массами m_1, m_2 . Следует отметить, что на возможность смешивания состояний нейтрино, обладающих малой (но ненулевой) массой, впервые обратил внимание Понтекорво более полувека назад [5]. На расстоянии L вероятность перехода $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ и вероятность $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ остаются в исходном состоянии, которая называется вероятностью выживания, будут равны:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E},$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}.$$

Угол θ называется углом смешивания, он определяет амплитуду осцилляций, а $\Delta m_{21}^2 = (m_2^2 - m_1^2)$ — это разность квадратов масс нейтрино. Длину осцилляций можно найти с помощью выражения $L_{осц} = 4\pi E / \Delta m_{21}^2$. Поведение вероятностей $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ и $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ в зависимости от расстояния L (источник-детектор) приведены на рис.3 для некоторого набора параметров. Схематически эффект осцилляций проиллюстрирован на рис.4.

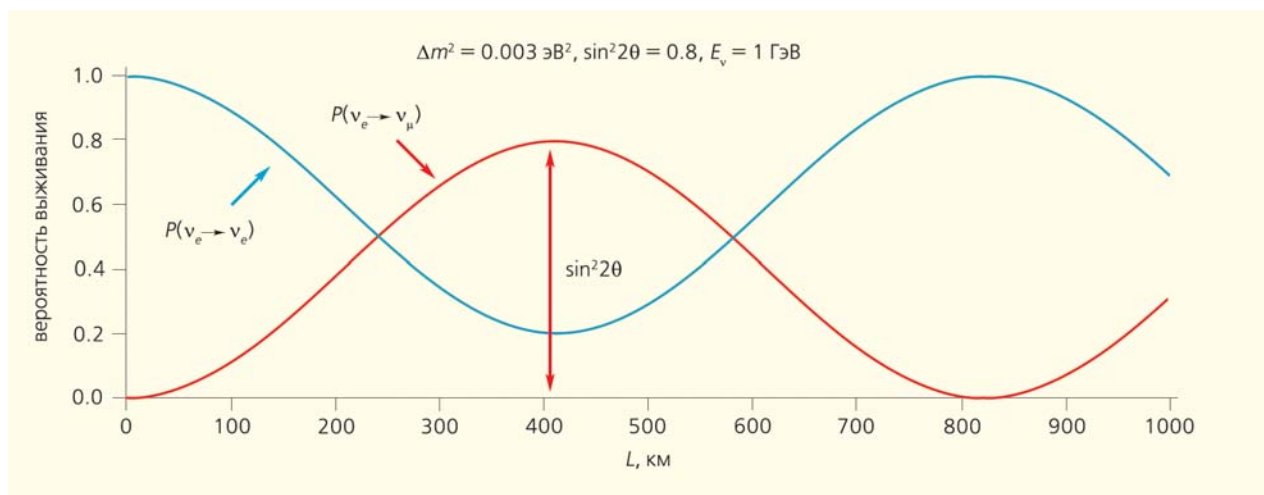


Рис.3. Пример зависимости вероятности выживания $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ и вероятности переходов $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ от расстояния источник-детектор.

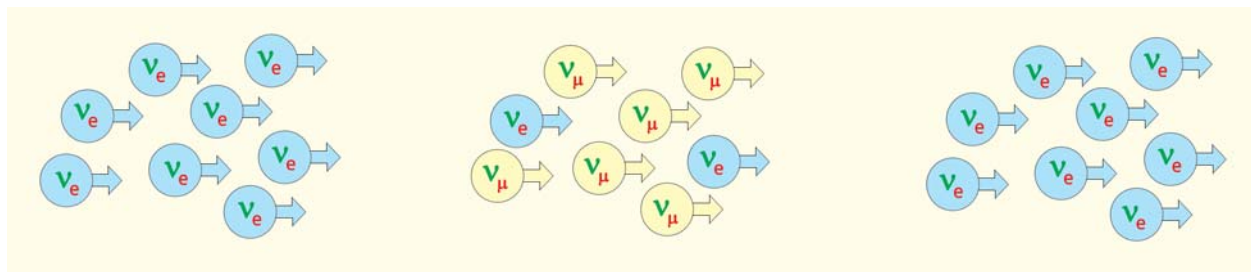


Рис.4. Иллюстрация переходов флэйворных состояний нейтрино.

В модели смешивания трех флэйворных состояний выражения для вероятностей переходов становятся несколько сложнее. Предполагается, что свободные нейтрино существуют в трех основных состояниях, обладающих массами m_1 , m_2 , m_3 , и флэйворные состояния выражаются через матрицу смешивания U_{PMNS} размерностью 3×3 , которая получила название матрицы Понтекорво—Маки—Накагава—Сакаты (ПМНС):

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}, \quad U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix}.$$

При распространении нейтрино, например из начального состояния ν_α , возникают периодические переходы $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ ($\nu_\beta = \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$), вероятность которых зависит от расстояния L , от энергии нейтрино, от элементов матрицы смешивания $U_{\alpha i}$ и от разности квадратов масс $\Delta m_{21}^2 = (m_2^2 - m_1^2)$, $\Delta m_{32}^2 = (m_3^2 - m_2^2)$ и $\Delta m_{13}^2 = (m_1^2 - m_3^2)$. Учитывая, что всегда справедливо соотношение $\Delta m_{21}^2 + \Delta m_{32}^2 + \Delta m_{13}^2 = 0$, среди Δm_{ij}^2 есть только две независимые величины.

Подчеркнем, что наблюдение осцилляций однозначно свидетельствует о массивности нейтрино, хотя и косвенным образом, так как абсолютные значения масс в осцилляционных экспериментах найти невозможно. Нейтринные осцилляции указывают также на смешивание состояний в лептонном секторе, а вот вопрос о нарушении CP-симметрии пока остается открытым.

Остановимся на этом более подробно. По аналогии с кварками мы полагаем, что в случае CP-нарушения матрица U_{PMNS} должна содержать комплексные параметры. В наиболее популярной параметризации элементы U_{PMNS} зависят от трех углов θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} и комплексной величины в виде фазового параметра $e^{i\delta}$ (если нейтрино являются майорановскими фермионами, матрица содержит дополнительные фазы). Допустимые значения углов смешивания и фазы следующие: $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ и $0 \leq \delta \leq 180^\circ$. Нарушение CP-четности означает, что вероятности переходов, например $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ и $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu)$, отличаются, и это различие зависит от фазы δ , а в случае инвариантности $\delta = 0$. Анализ показывает, что CP-нечетные эффекты возникают только в переходах между флэйворными состоя-

ниями $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ и не проявляются в выражении для вероятности выживания $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha$. Поэтому измерение δ возможно только в экспериментах «на появление», например в переходах $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$.

Короткая справка об экспериментах, в которых были получены доказательства осцилляций нейтрино, будет дана ниже. Перечислим последние результаты.

— В экспериментах по изучению осцилляций нейтрино подтверждена модель смешивания с тремя нейтрино ν_1, ν_2, ν_3 , для которых были измерены значения разности квадратов масс:

$$\Delta m_{21}^2 = (7.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \text{эВ}^2, \\ |\Delta m_{32}^2| \approx |\Delta m_{13}^2| = (2.43 \pm 0.13) \cdot 10^{-3} \text{эВ}^2.$$

Значение $\Delta m_{21}^2 > 0$ и меньше $|\Delta m_{32}^2|$ более чем в 30 раз, а знак в разности ($m_3^2 - m_2^2$) не определен. Тогда имеются две возможности для последовательности значений нейтринных масс или, как ее называют в литературе, иерархии масс нейтрино: либо $m_1 < m_2 < m_3$ (нормальная иерархия), либо $m_3 < m_1 < m_2$ (обратная иерархия). На выяснение этого вопроса направлены новые проекты, которые будут реализованы в ближайшие годы.

— Установлена связь электронного, мюонного и тау-нейтрино (ν_e, ν_μ, ν_τ) с массовыми состояниями (ν_1, ν_2, ν_3) через матрицу ПМНС. Измерены углы смешивания: $\theta_{12} = (34 \pm 1)^\circ$, $\theta_{23} = (45 \pm 7)^\circ$, $\theta_{13} = (9 \pm 1)^\circ$. Значение фазы δ пока остается неизвестным. Самый маленький угол θ_{13} был измерен недавно [9], но его значение оказалось больше ожидаемого, что было воспринято с большим энтузиазмом. Дело в том, что от величины θ_{13} зависит вероятность осцилляций между флэйворными состояниями $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$. Поэтому подтвердились реальные перспективы для измерения CP нарушающей фазы, δ , в ускорительных экспериментах.

Экспериментальные свидетельства осцилляций

Гипотеза, предсказывающая осцилляции нейтрино, вызвала небывалую активность среди физиков-экспериментаторов. Поиски осцилляций начались на ядерных реакторах, ускорителях, в космических лучах. Но убедительные доказательства, сни-

кавшие широкое признание, были получены только через 30 лет. Ключевую роль здесь играли эксперименты с солнечными нейтрино [10], в которых измерялись потоки электронных нейтрино, рожденных в термоядерных процессах в недрах Солнца. Энергия солнечных нейтрино лежит в диапазоне 0—20 МэВ, а расстояние (база экспериментов) $L \sim 1.5 \cdot 10^8$ км. Данные, полученные в проектах Homestake, Gallex/GNO и SAGE, Kamiokande, и в особенности прецизионные измерения последних лет в проектах SuperKamiokande, SNO, Borexino дали убедительные доказательства в пользу нейтринных осцилляций и позволили измерить массовый параметр Δm_{21}^2 и угол смешивания θ_{12} .

Решающим моментом в понимании и согласовании данных стало выяснение влияния среды, в которой происходит распространение нейтрино, на осцилляции. Дело в том, что, когда нейтрино двигаются в веществе, амплитуда их распространения изменяется вследствие когерентного рассеяния вперед на электронах и нуклонах. Теория этого явления была разработана Л.Вольфенштейном, С.П.Михеевым и А.Ю.Смирновым для различных сред. Михеев и Смирнов показали, что при прохождении слоев солнечного вещества с изменяющейся плотностью (от ~ 150 г/см³ до 0) переходы электронного нейтрино в другие флейворные состояния могут усиливаться. Эффект зависит от энергии солнечных нейтрино: в области менее 1—2 МэВ работает механизм осцилляций в вакууме, а при увеличении энергии вероятность переходов возрастает. Эта модель была подтверждена (рис.5) в международном эксперименте Borexino [10], который проводится с участием российских ученых из НИЦ «Курчатовский институт», Объединенного института ядерных исследо-

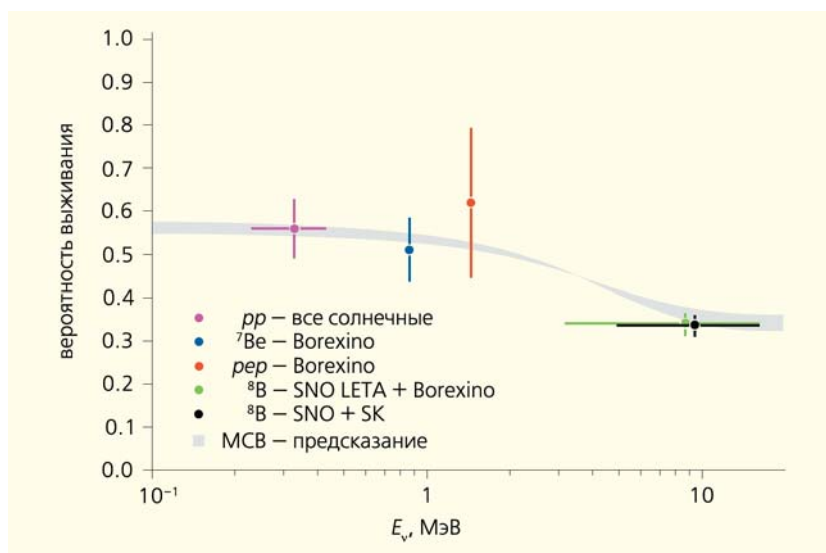


Рис.5. Вероятность выживания $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ солнечных нейтрино в зависимости от энергии. В области энергий более 1—2 МэВ наблюдается эффект усиления осцилляций в согласии с предсказанием модели MSW-LMA (серая полоса).

ваний, Петербургского института ядерной физики и Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ.

Электронные и мюонные нейтрино образуются также в атмосфере в результате ядерных взаимодействий первичных космических лучей, рождения и распадов K -, π -мезонов и мюонов ($\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$ и $\mu \rightarrow e + \nu_e + \nu_\mu$). Атмосферные нейтрино с энергиями от нескольких сотен мегаэлектронвольт до 10^3 ГэВ в зависимости от направления падения (в том числе сквозь Землю) проходят расстояния от 10 до 10^4 км. Их потоки рассчитываются с погрешностью 10—20%, но более точные предсказания возможны для отношения потоков мюонных и электронных нейтрино. Поэтому проблема возникла, когда в нескольких экспериментах Kamiokande, IMB, Soudan и Macro было получено аномально низкое (по сравнению с ожидаемым) значение отношения. В 1998 г. в эксперименте SuperKamiokande анализ регистрируемых мюонных и электронных событий с разными энергиями в зависимости от зенитного угла падения нейтрино позволил объяснить результаты наблюдаемой аномалии с помощью осцилляций нейтрино по каналу $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ и определить параметры $|\Delta m_{31}^2|$ и θ_{23} .

Атомные реакторы остаются самыми мощными источниками электронных антинейтрино, которые рождаются в процессе цепной ядерной реакции в активной зоне. Для типичных реакторов на АЭС с тепловой мощностью 3 ГВт полный поток антинейтрино достигает $\sim 6 \cdot 10^{20}$ с⁻¹, а энергия простирается до 8—10 МэВ. Поиск нейтринных осцилляций на реакторах продолжается не одно десятилетие. Их история была наполнена драматическими моментами, когда казалось, что осцилляции уже обнаружены. Но первый успех пришел к физикам коллаборации KamLand, измерившим потоки антинейтрино от АЭС в Японии, среднее расстояние до которых составляло 180 км. В измерениях было обнаружено исчезновение $\bar{\nu}_e$ с вероятностью, которая соответствовала параметрам осцилляций солнечных нейтрино, т.е. Δm_{21}^2 и θ_{12} . Экспериментальные данные представлены на рис.6, прекрасно иллюстрирующем эффект изменения вероятности выживания антинейтрино.

Курчатовский институт — один из пионеров исследований реакторных антинейтрино. В 80-х годах на Ровенской АЭС [11] и в Красноярске были проведены поиски осцилляций нейтрино на расстояниях до нескольких десятков метров от

реакторов. В частности, измерения в Красноярске на расстоянии 90 м в свое время были рекордными по чувствительности. Сегодня, конечно, ясно, что эффект осцилляций проявляется лишь на расстоянии $\sim 1-2$ км по каналу ($\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$) с «атмосферным» массовым параметром $|\Delta m_{31}^2| \sim 2.4 \cdot 10^{-3}$ эВ² и углом смешивания θ_{13} . Но в 80-х годах отсутствие каких-либо указаний инициировало работы вблизи реакторов в России, Германии, Франции и США. После открытия осцилляций атмосферных нейтрино начались более осмысленные поиски, так как в реакторных экспериментах предполагалось измерить последний неизвестный угол θ_{13} матрицы смешивания ПМНС. Первая попытка была предпринята на АЭС CHOOZ (Франция)

в кооперации ученых Курчатовского института с группами из Италии, США и Франции. Детектор был установлен на расстоянии ≈ 1 км от реакторов. Однако угол смешивания оказался маленьким, и было получено лишь ограничение на его величину: $\theta_{13} < 10^\circ$. Этот результат до последнего времени оставался лучшим в мире. Метод увеличения чувствительности измерений был предложен Микаэляном, и в 2012 г. сразу в трех экспериментах (DoubleCHOOZ, Daya Bay и RENO) было измерено значение угла θ_{13} .

Искусственный источник мюонных нейтрино — ускорители. Ускоренные протоны направляются на мишень, в которой в результате ядерных взаимодействий рождаются пионы и каоны. Образованные мезоны отбираются по знаку заряда и импульсу, фокусируются и поступают в специальный вакуумный туннель, двигаясь в котором, они распадаются на легу на мюоны и мюонное нейтрино. Энергии нейтрино лежат в области $\sim (1+10)$ ГэВ, поэтому при расположении детекторов на расстояниях в сотни километров ускорительные эксперименты обладают чувствительностью к осцилляциям атмосферных нейтрино. Регистрация нейтрино осуществляется крупномасштабными детекторами, размещенными в подземных лабораториях. Такие исследования, которые принято называть экспериментами с длинной базой, были поставлены и показали свою состоятельность (K2K, CNGS, T2K, MINOS). География этих экспериментов (ускорительный центр — подземная лаборатория) была следующей: KEK—Kamioka (Япония, $L = 235$ км), Fermilab—Судан (США, $L = 730$ км), ЦЕРН—Гран-Сассо (Европа, $L = 730$ км). В них были не только подтверждены значения параметров осцилляций Δm_{21}^2 и θ_{23} при измерении вероятности выживания

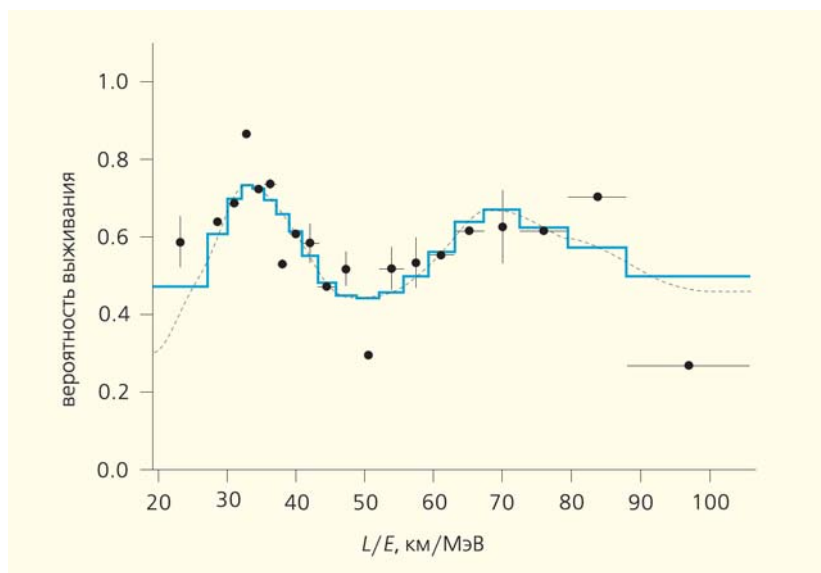


Рис.6. Осцилляции реакторных антинейтрино, обнаруженные в эксперименте KamLand.

$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$, но также появились первые результаты по наблюдению моды $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ и измерению θ_{13} . Сегодня в литературе обсуждается широкий спектр новых проектов, среди которых наиболее значимы эксперименты с суперпучками нейтрино высокой интенсивности (500—700 кВт): LBNE (Fermilab—Хоумстейк, $L = 1300$ км, США), HyperKamiokande (JPARC-Kamiokande, $L = 295$ км, Япония) и LAGUNA—LBNO (ЦЕРН—Пихасалми, Финляндия, $L = 2300$ км). Эти проекты имеют долгосрочный характер и рассчитаны на период до 2025 г. Ключевой задачей считается измерение фазы δ , определяющей нарушение CP-инвариантности лептонов.

Стерильные нейтрино

Концепция стерильных нейтрино, как уже упоминалось, была введена Понтекорво много лет назад (см. [5]). Но некоторые «аномальные» результаты последних лет заставляют нас сегодня пристальнее взглянуть на эту проблему.

С конца 90-х годов проводятся ускорительные эксперименты с короткой базой, т.е. на небольших расстояниях, с умеренными энергиями нейтрино, для которых $L/E \sim 0.5 + 2.0$ м/МэВ. Данные некоторых работ привели к парадоксальным заключениям. В эксперименте LSND ($\langle E \rangle = 30$ МэВ, $L = 30$ м), в котором анализировался поток мюонных антинейтрино от ускорителя, было зарегистрировано избыточное количество электронных антинейтрино. При интерпретации результата возникло подозрение на осцилляции по каналу ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$), но найденная вероятность переходов $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = 2.6 \cdot 10^{-3}$ соответствовала значению $\Delta m^2 \sim 0.01-1.0$ эВ², которое значительно превосходило известные вели-

чины Δm_{21}^2 и Δm_{32}^2 . В поисках выхода была выдвинута гипотеза о существовании стерильного нейтрино с массой $m_4 > m_1, m_2, m_3$, а появление в пучке электронных антинейтрино объяснялось осцилляциями через промежуточное стерильное состояние. Этот результат, получивший название «LSND-аномалия», был недавно подтвержден в эксперименте MiniBooNe ($\langle E \rangle = 400 \div 600$ МэВ, $L = 450$ м), где также наблюдались события, которые можно было истолковать как осцилляции ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) и ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$) в том же диапазоне разности квадратов масс. Следует, однако, отметить, что в других экспериментах (KARMEN, ICARUS) эта аномалия не проявлялась.

Гипотеза получила развитие при интерпретации калибровочных измерений радиохимических нейтринных галлий-германиевых детекторов (SAGE, GALLEX/GNO). Калибровка выполнялась с помощью искусственных высокоинтенсивных источников нейтрино ν_e (^{51}Cr и ^{37}Ar , с энергией около 1 МэВ). Во всех измерениях наблюдалось более низкое число зарегистрированных событий по сравнению с ожидаемым, и дефицит можно объяснить переходами нейтрино в стерильное состояние в том же диапазоне Δm^2 .

Совсем недавно французские физики произвели переоценку энергетического спектра реакторных антинейтрино. Ранее считалось, что счет нейтринных детекторов, установленных на расстояниях 10–100 м от атомных реакторов, согласуется с ожидаемыми значениями, рассчитанными на основании данных о спектральном составе $\bar{\nu}_e$ ($\langle E \rangle \sim 3\text{--}4$ МэВ). Сравнение с новыми данными указывает на дефицит в экспериментальных значениях, составляющий около 5–6%. И опять анализ данных не противоречит гипотезе о переходах реакторных антинейтрино в стерильные состояния, соответствующие массовому параметру $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$.

Еще в 80-х годах в Курчатковском институте под руководством Микаэляна была разработана специальная методика измерения сечения реакции $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, а затем были выполнены прецизионные эксперименты на реакторе АЭС в Ровно [12] и, совместно с группой французских физиков, на АЭС в Бюже во Франции. Измеренное на расстояниях 12–18 м от реакторов с лучшей в мире точностью сечение реакции $\sigma_{\text{экс}}$ получило название «опорная точка», так как оно позволяет провести нормировку полного потока антинейтрино в месте проведения измерений и потому используется в поисковых экспериментах. Расчеты, проведенные в середине 90-х годов, подтверждали согласие измеренного сечения с его ожидаемой величиной $\sigma_{\text{расчет}}$. Однако значение $\sigma_{\text{расчет}}$, вычисленное с использованием новых данных о спектре реакторных антинейтрино, оказалось противоречащим эксперименту. Для иллюстрации величины аномального эффекта приведем отношение $\sigma_{\text{экс}}/\sigma_{\text{расчет}}: 0.942 \pm 0.030$, т.е. разница ле-

жит на уровне около 2σ . Такое расхождение величин в литературе часто интерпретируется как переходы реакторных антинейтрино в стерильное состояние на расстояниях ~ 10 м.

Другая возможная причина «аномалии» — недостаточная полнота знаний о генерации реакторных антинейтрино. Этот процесс имеет довольно сложный механизм излучения $\bar{\nu}_e$ в цепочках β -распада громадного числа осколков деления изотопов урана и плутония в активной зоне реактора. Прецизионное изучение взаимосвязанных спектров $\bar{\nu}_e$ и электронов в β -распаде играет здесь важнейшую роль. Для уточнения данных планируются новые измерения β -спектров смесей осколков деления ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu на исследовательских реакторах, в частности в Курчатковском институте.

Заканчивая обсуждение проблемы стерильных нейтрино, следует подчеркнуть, что однозначного вывода о существовании новых состояний нейтрино пока нет. Для проверки гипотезы об осцилляциях нейтрино в стерильное состояние готовятся поисковые эксперименты на ускорителях, атомных реакторах, а также с использованием высокоинтенсивных источников нейтрино. Здесь уместно упомянуть об обсуждаемой в литературе связи стерильных нейтрино с природой так называемой темной материи, которой называют небарионную материю, не излучающую и не поглощающую свет, но участвующую в гравитационном взаимодействии. Ее существование следует из космологических данных, а претендентами на роль темной материи могут быть, например, стерильные нейтрино или другие новые слабовзаимодействующие массивные частицы.

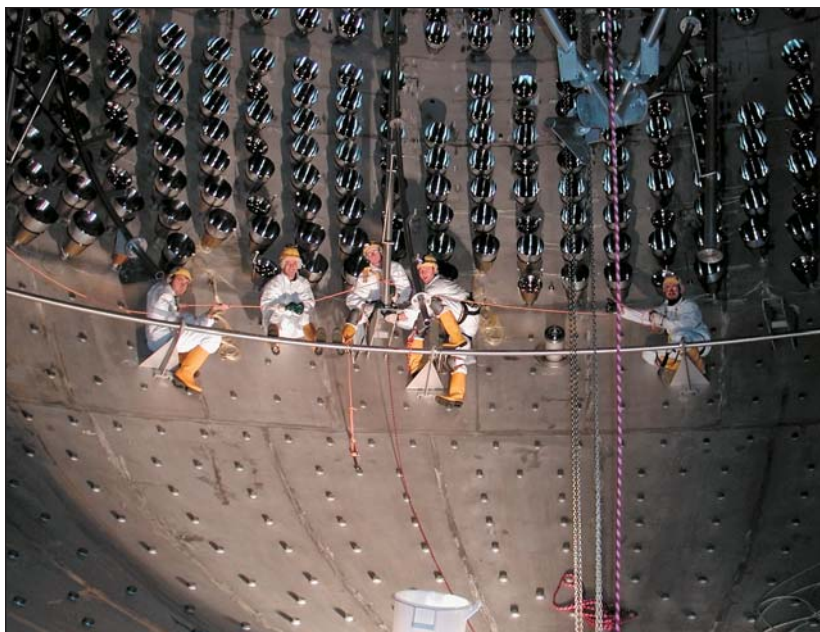
Междисциплинарные исследования

Генерация энергии Солнца происходит за счет термоядерных реакций, в результате которых водород перерабатывается в гелий. В современной Стандартной солнечной модели (ССМ) предполагается, что реализация осуществляется двумя способами — за счет последовательности процессов, начинающихся с реакции слияния ядер водорода (последовательность pp -реакций) или в результате углеродно-азотно-кислородного (CNO) цикла. ССМ предсказывает, что вклад CNO-цикла в энергетику Солнца составляет не более нескольких процентов. Проверка ССМ затруднена тем, что нам не удастся заглянуть в глубь Солнца, и ряд важных параметров (как, например, элементный состав и внутренняя температура) не известны точно. К счастью, в некоторых термоядерных процессах излучаются электронные нейтрино, которые благодаря высокой проникающей способности проходят сквозь толщу солнечного вещества и достигают Земли. Поэтому, используя данные о регистрации солнечных нейтрино, мож-

но получить информацию о самих термоядерных процессах и осуществить зондирование внутренних областей Солнца. Детектирование солнечных нейтрино имело большое значение для астрофизики как доказательство термоядерного происхождения энергии звезд.

В настоящее время исследования солнечных нейтрино проводятся в рамках крупного международного проекта Borexino [10] с участием НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ, ПИЯФ, НИИЯФ МГУ. В этом эксперименте точность измеренных потоков солнечных нейтрино впервые превысила точность предсказаний (см. табл.), что позволяет проверять и корректировать параметры ССМ. Важнейшие задачи — определение вклада CNO-цикла, уточнение содержания тяжелых элементов, температуры и других характеристик Солнца на основе глобального анализа потоков солнечных нейтрино. В мире планируется создание новых мегадетекторов, которые продолжают эти исследования.

Исследования солнечных нейтрино потребовали создания крупномасштабных детекторов, которые, как оказалось, способны регистрировать нейтринное излучение и от далеких звезд. 23 февраля 1987 г. тремя нейтринными детекторами в СССР, США и Японии были зарегистрированы нейтрино от вспыхнувшей сверхновой звезды в галактике Большое Магелланово Облако. Это стало первым экспериментальным подтверждением теории звездной эволюции и ознаменовало собой рождение нового этапа развития астрофизики. Сегодня нейтринные астрофизика и астрономия находятся в начале своего



Сборка детектора Borexino.

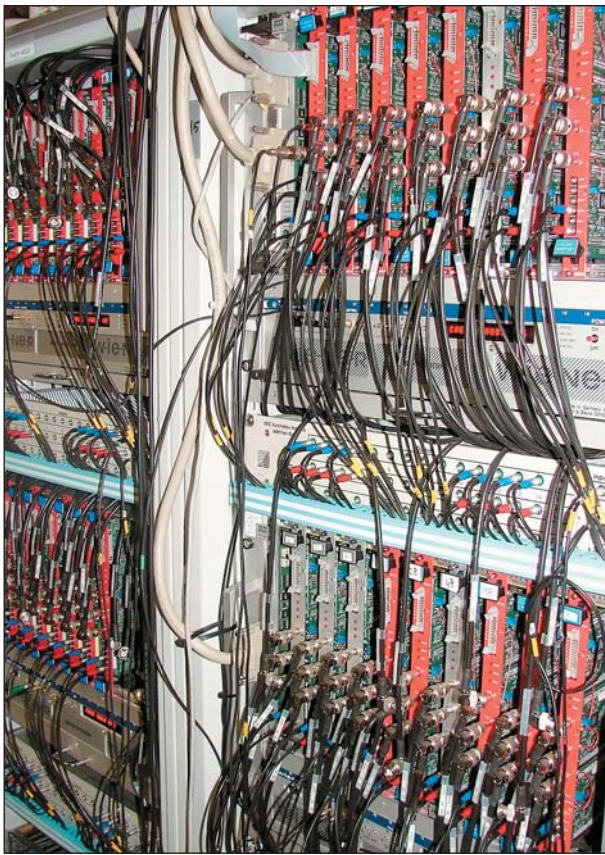
большого пути. Задачей остается исследование процессов с участием нейтрино в звездах и других космических объектах, а также изучение самих небесных тел по их нейтринному излучению. Для регистрации нейтрино от далеких неземных источников требуется создание детекторов нового поколения. В частности, подобные детекторы будут способны зарегистрировать так называемый диффузный поток нейтрино в широком диапазоне энергий, включая реликтовые нейтрино. Это постоянный во времени поток нейтрино всех типов, образованный совокупностью астрофизических источников от самых отдаленных космологических эпох.

Изучение коллапсирующих звезд базируется на организации постоянного мониторингирования нейтринного излучения, поскольку существующие детекторы способны отслеживать коллапсы

Таблица

Сравнение измеренных и ожидаемых потоков солнечных нейтрино и геонейтрино

Термоядерный процесс	Потоки солнечные нейтрино [нейтрино/см ² · с]			Эксперимент
	Предсказания моделей с разным элементным составом Солнца		Измеренное значение	
$p + e^- + p \rightarrow d + \nu_e$	$1.44 \cdot 10^8 \pm 1.2\%$	$1.47 \cdot 10^8 \pm 1.2\%$	$1.60 \cdot 10^8 \pm 19\%$	Borexino
${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	$5.00 \cdot 10^9 \pm 7\%$	$4.56 \cdot 10^9 \pm 7\%$	$4.87 \cdot 10^9 \pm 5\%$	Borexino
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$	$5.58 \cdot 10^6 \pm 14\%$	$4.59 \cdot 10^6 \pm 14\%$	$5.20 \cdot 10^6 \pm 4\%$	SNO, SK, Borexino, KamLand
Поток геонейтрино [антинейтрино/см ² · с]				
Распады с эмиссией антинейтрино	Предсказания разных моделей		Измеренное значение	Эксперимент
${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{206}\text{Pb} + 8{}^4\text{He} + 6e^- + 6\bar{\nu}_e$	$\sim(2-6) \cdot 10^6$		$(4.4 \pm 0.9) \cdot 10^6$	Borexino, KamLand
${}^{232}\text{Th} \rightarrow {}^{208}\text{Pb} + 6{}^4\text{He} + 4e^- + 4\bar{\nu}_e$			$(3.4 \pm 0.8) \cdot 10^6$	



Курчатовский электронный комплекс для связи с детектором Borexino.

только в нашей Галактике, а их ожидаемая частота — порядка одного события в 30–50 лет. Поэтому так важно организовать дистанционные центры управления, позволяющие осуществлять сбор, накопление и анализ данных не только в месте расположения детектора, но и в удаленных научных лабораториях. В качестве примера отметим, что такой удаленный центр был создан на площадке НИЦ «Курчатовский институт» для постоянной связи с детектирующим комплексом Borexino в подземной лаборатории Гран-Сассо в Италии. Возможности такого центра не ограничиваются только исследовательской работой, но позволяют также проводить подготовку специалистов в режиме реального участия в эксперименте.

Развитие техники детектирования нейтринного излучения представляет большой интерес и для геофизики [12]. Наши знания, модели и гипотезы о структуре и формировании нашей планеты очень ограничены и базируются лишь на данных геологического изучения земной коры, сейсмических исследований и лабораторных экспериментов, изучающих строение и поведение вещества при высоких давлениях и температурах. Существенная роль отводится вопросу о природе тепла внутри Земли. Одним из источ-

ников нагрева планеты могут быть содержащиеся в породах нестабильные изотопы, которые претерпевают превращения в результате α - и β -распадов с выделением энергии. Предполагается, что полная тепловая мощность Земли составляет около 44 ТВт. Какая часть этой величины имеет радиогенную природу? Основной вклад в разогрев Земли сегодня вносят ядра ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K — благодаря большим временам полураспада, исчисляющимся миллиардами лет. Уран и торий претерпевают цепочки превращений, в ходе которых излучаются электронные антинейтрино (их принято называть геонейтрино). В последние годы геонейтрино удалось зарегистрировать в экспериментах KamLAND и Borexino, хотя точность еще очень невелика (см. табл.). Из этих данных было оценено, что приблизительно половина тепла Земли имеет радиогенную природу. Уточнение информации о радиогенных элементах будет иметь первостепенное значение для определения энергетического баланса, который, в свою очередь, послужит ключом к пониманию образования и эволюции Земли. В частности, особый интерес представляет распределение тепла в мантии, так как этот фактор определяет конвективные движения, связанные с вулканической деятельностью и перемещениями тектонических плит.

Следует обратить внимание еще на одну геофизическую гипотезу о возможности существования природного атомного реактора мощностью до 30 ТВт в центре Земли. Такой геореактор может генерировать энергию для поддержания механизма геодинамо, ответственного за магнитное поле Земли. Но, как и в случае реакторов на обычных АЭС, геореактор должен быть источником антинейтрино. Поиск таких антинейтрино дал отрицательный результат, а анализ данных эксперимента Borexino показал, что если геореактор и существует, то его мощность не более 4.5 ТВт.

В будущем ожидается ввод в действие новых детекторов геонейтрино: в Канаде, в Финляндии, в США. В России Г.В.Домогацкий и Л.А.Микаэляна с сотрудниками предложили создать детектор геонейтрино в Баксанской нейтринной обсерватории РАН. Анализ показал, что расположение детектора на Баксане, вдали от действующих АЭС, имеет ряд преимуществ. Организация сети крупномасштабных установок, которые будут проводить измерения в различных точках мира, значительно расширит наши знания о прошлом, настоящем и будущем нашей планеты.

Вопросы приложений

Фундаментальные исследования в области физики нейтрино имеют высокий инновационный потенциал. Первое предложение практического использования реакторных антинейтрино для кон-

троля атомных реакторов, разработанное в Курчатовском институте [13], уже находится на первоначальной стадии внедрения (см. ниже). К настоящему времени выдвинуто немало новых предложений практического использования нейтринного излучения, среди которых: разработка новых средств коммуникаций, использование пучков нейтрино в геологии для поисков минерального сырья, разработка осцилляционной и абсорбционной томографии Земли и др. Технология нейтринной связи уже проходит экспериментальное обоснование. Количество предложений растет. Практическая реализация таких проектов, конечно, кажется пока чрезвычайно сложной задачей. Однако стоит вспомнить, что в 30-х годах прошлого века неосуществимой казалась регистрация самих нейтрино. Решение некоторых задач может быть неожиданным, как это было с историей доказательства ненулевой массы нейтрино. Решение пришло не из прямых кинематических измерений, а из открытия «не вписывающегося» в Стандартную модель процесса нейтринных осцилляций.

Завершая этот обзор, хотелось бы подчеркнуть традицию Курчатовского института использовать результаты фундаментальных исследований на практике. Что может дать физика нейтрино для развития атомной отрасли уже сегодня? Нарращивание мирового производства атомной энергии тесно связано с проблемами нераспространения, так как реакторы потенциально могут использоваться для производства оружейного плутония. Уже сегодня проблемы доверия возникают в связи с развитием атомной энергетики ряда стран (Ирана, Северной Кореи, Индии, Пакистана, Израиля). По мнению специалистов МАГАТЭ, разработка действенного контроля, который исключал бы тайное производство плутония, весьма актуальна.

Литература

1. Герштейн С.С. Нобелевские премии, которые не получил Понтекорво // Природа. 2013. №11. С.78–87.
2. Райнес Ф. Нейтрино: от полтергейста к частице: Нобелевская лекция. Стокгольм. 1995 г. // УФН. 1996. Т.166. №12. С.1352–1359.
3. Высоцкий М.И. К открытию бозона Хиггса // Природа. 2013. №1. С.4–10.
4. Герштейн С.С. От бета-сил к универсальному взаимодействию // Природа 2010. №1. С.3–14.
5. Понтекорво Б.М. Страницы развития нейтринной физики // УФН. 1983. Т.141. №4. С.675–709.
6. Барабаш А.С. Двойной бета-распад: события и люди // Природа. 2011. №8. С.3–13.
7. Кобаяси М. CP-нарушение и смешивание ароматов // УФН. 2009. Т.179. С.1312.
8. Комар А.А. Регистрация нарушения CP-четности в распадах B^0 -мезонов // Природа. 2002. №11. С.11–17.
9. Куденко Ю.Г. Нейтринная физика: год угла смешивания θ_{13} // Природа. №11. 2012. С.3–13.
10. Скорохватов М.Д. Солнечные нейтрино и международный проект «Борексина» // Природа. 2009. №5. С.13–24.
11. Микаэлян Л.А. Нейтринная лаборатория на Ровенской АЭС // Природа. 1983. №9. С.43–45.
12. Скорохватов М.Д. Нейтринная геофизика — первые шаги // Природа. 2012. №3. С.13–17.
13. Беляев С.Т., Микаэлян Л.А. Нейтрино из реактора // Наука и человечество. М., 1990. С.185.



Л.А.Микаэлян.

Не раз упоминавшийся в статье Лев Александрович Микаэлян, к несчастью, ушедший из жизни в этом году, еще в 70-х годах предложил внедрить принципиально новый подход, который основан на регистрации реакторных антинейтрино. Так можно обеспечить независимый от персонала реактора дистанционный контроль, не поддающийся фальсификации. Научные основы нового метода были разработаны специалистами Курчатовского института в экспериментах на Ровенской АЭС и получили признание МАГАТЭ и ведущих мировых научных центров. Сегодня работы по нейтринному контролю, ставящие целью обеспечить безопасную эксплуатацию атомных реакторов и гарантии нераспространения ядерных материалов, широко востребованы и развиваются не только в России, но также в США, Франции, Японии и других странах. ■

Тонкопленочные солнечные элементы в прошлом и будущем

П.К.Кашкаров, А.Г.Казанский, П.А.Форш, А.В.Емельянов

В последние годы негативное влияние роста потребления энергии на социальные, здравоохранительные и экологические сферы человеческой жизни усиливается. Согласно оценкам годовой уровень потребления электроэнергии удвоится по отношению к сегодняшнему уже к середине XXI в. Дальнейшее увеличение производства электроэнергии за счет традиционных ископаемых ресурсов (нефти, газа, угля) невозможно вследствие их ограниченности и быстрого роста энергетических потребностей населения Земли [1]. В связи с этим передовые страны мирового сообщества на протяжении многих лет ежегодно вкладывают в развитие альтернативных (возобновляемых) источников энергии миллиарды долларов. Одним из самых привлекательных и перспективных направлений здесь всегда считалась солнечная фотовольтаика, т.е. прямое преобразование солнечной энергии в электрическую.

Солнечные перспективы

По сути дела эра фотоэлектрической энергетики началась с создания в 50-х годах прошлого столетия кремниевых фотоэлементов с *p-n*-переходом, имевших КПД порядка 6% [2]. Фотография тех лет (рис.1) показывает, как в 1954 г. компания Bell Telephone Laboratories демонстрирует новый прибор для получения электроэнергии от солнца. Реально кремниевые солнечные батареи впервые послужили на искусственных спутниках Земли в 1958 г. (на советском искусственном спутнике «Спутник-3» и американском «Авангард-1»). В начале 1960-х были созданы солнечные элементы (СЭ) с *p-n*-переходом на основе GaAs, которые также использовались для космических целей. В космонавтике СЭ и сегодня занимают доминирующее положение среди других источников ав-

тономного энергопитания — они снабжают электроэнергией аппаратуру спутников и системы жизнеобеспечения космических кораблей и станций, а также заряжают электрохимические аккумуляторы, работающие на теневых участках орбиты. Возрастание требований к бортовым системам космических аппаратов заставляет думать о создании СЭ, обладающих все более высокими энергетическими и эксплуатационными характеристиками.

В наземных условиях СЭ применяются в быту, для питания устройств автоматики, расположенных вдали от стационарного электроснабжения, переносных радиостанций, радиоприемников и пр.

За последние 30 лет темпы роста солнечной энергетики составляли в среднем 25% в год. Прогнозируется, что и в XXI в. ее развитие будет опережающим по отношению к использованию альтернативных источников энергии: к 2050 г. сол-

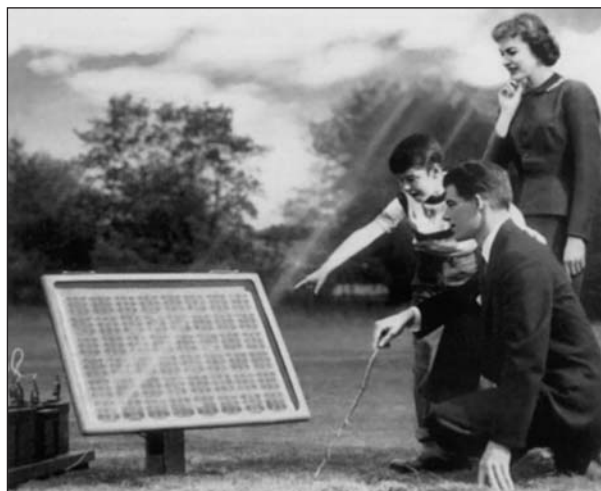
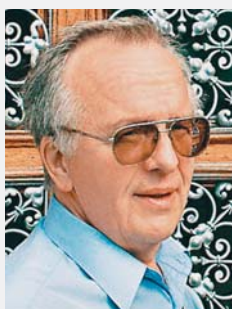


Рис.1. Компания Bell Telephone Laboratories демонстрирует новый прибор для получения электроэнергии от солнца, 1954 год.



Павел Константинович Кашкаров, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора НИЦ КИ, заведующий кафедрой физического факультета МГУ им.М.В.Ломоносова. Лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники, премии Правительства РФ в области образования. Изучает взаимодействие лазерного излучения с веществом, системы пониженной размерности.



Андрей Георгиевич Казанский, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник того же факультета. Область научных интересов — физика аморфных полупроводников, тонких пленок и низкоразмерных систем.



Павел Анатольевич Форш, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отдела НИЦ КИ, доцент того же факультета. Лауреат премии Правительства РФ в области образования. Занимается кинетическими явлениями в неупорядоченных и низкоразмерных полупроводниковых материалах, физикой тонких пленок.



Андрей Вячеславович Емельянов, инженер НИЦ КИ, аспирант того же факультета. Работа связана с изучением структурных, оптических и электрических свойств неупорядоченных полупроводниковых материалов.

нечная энергия может обеспечить 20—25% мирового производства энергии, а к концу века — стать доминирующим поставщиком с долей, достигающей 60% [3].

По принципу, используемому для преобразования солнечной энергии в электрическую, СЭ можно разделить на фотоэлектрохимические элементы, элементы диодного типа и термофотовольтаические преобразователи. Здесь мы остановимся на наиболее распространенном способе преобразования — при помощи полупроводниковых диодов.

Электрическая энергия из света

На рис.2 показана энергетическая зонная диаграмма $p-i-n$ -структуры, часто играющей роль рабочего элемента солнечного преобразователя. Эта структура представляет собой последовательность слоев одного и того же полупроводникового материала, обладающих проводимостью p -типа, собственной (i) и n -типа соответственно. Если на такую систему падает свет с энергией квантов, большей ширины запрещенной зоны, при его поглощении электроны перебрасываются из валентной зоны в зону проводимости, т.е. появляются фотогенерируемые электроны и дырки. ФотоЭДС возникает благодаря тому, что имеющийся в структуре потенциальный барьер разделяет потоки фотодырок и фотоэлектронов. В принципе то же происходит и в простом $p-n$ -переходе, но введение i -слоя позволяет увеличить эффективность фотопреобразования. К приборам с $p-i-n$ -структурой относятся, например, солнечные элементы на основе кристаллического кремния, работающие в условиях концентрированного излучения, а также элементы на основе аморфного кремния.

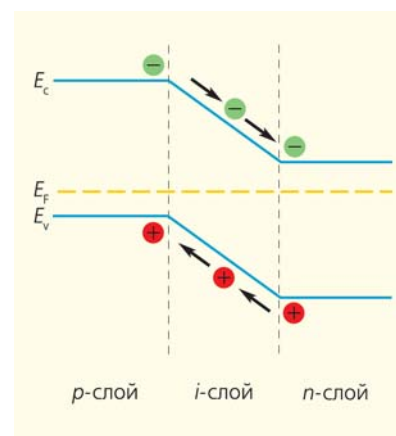


Рис.2. Зонная диаграмма солнечного элемента с $p-i-n$ -структурой. E_c — дно зоны проводимости, E_v — потолок валентной зоны, E_f — уровень Ферми.

КПД солнечного элемента (η) может быть представлен следующей формулой:

$$\eta = I_m V_m / P_i = FF I_{\text{кз}} V_{\text{кх}} / P_i,$$

где I_m и V_m — сила тока и напряжение на выходе элемента в режиме максимальной мощности, P_i — полный световой поток, падающий на элемент, $I_{\text{кз}}$ — сила тока короткого замыкания элемента, $V_{\text{кх}}$ — напряжение холостого хода, а $FF = I_m V_m / I_{\text{кз}} V_{\text{кх}}$ — так называемый фактор заполнения.

Типичная вольтамперная характеристика СЭ представлена на рис.3. Ее рабочая часть попадает в четвертый квадрант — это означает, что прибор служит источником энергии. На рисунке показаны величины I_m и V_m , при которых выходная мощность максимальна.

Полупроводниковое устройство будет эффективно работать в качестве СЭ лишь при выполнении ряда условий. Во-первых, должен быть достаточно большим коэффициент оптического поглощения, чтобы поглощалась значительная часть солнечной энергии. Во-вторых, следует собирать на контактах как можно больше возбужденных светом электронов и дырок (это условие выполняется, если диффузионная длина неосновных носителей сравнима с толщиной структуры, или, другими словами, внутреннее поле пространственного заряда распространяется на большую часть ее толщины). В-третьих, необходим большой внутренний потенциал, так как именно им определяется ЭДС элемента. И наконец, в-четвертых, должно быть небольшим полное сопротивление цепи, последовательной солнечному элементу (сопротивление контактов к СЭ, электрических проводов и др., кроме сопротивления нагрузки),

так чтобы падение напряжения на нем во время работы составляло лишь небольшую часть ЭДС.

От кристаллов к тонким пленкам

На данный момент самые высокие значения КПД достигаются в многокаскадных СЭ. Такой элемент представляет собой несколько последовательно сформированных p - n -переходов, выполненных из различных полупроводниковых материалов. Материалы подбираются так, чтобы ширина запрещенной зоны полупроводника, ближайшего к поверхности солнечного элемента, на которую падает свет, была максимальной. По мере удаления от поверхности используются полупроводники со все меньшей шириной запрещенной зоны (рис.4). Подобная схема позволяет снизить тепловые потери и эффективно использовать весь солнечный спектр. Дело в том, что при поглощении солнечного (белого) света фотоны с энергией, меньшей E_g , не дают вклада в выходную мощность элемента. Каждый фотон с энергией, большей E_g , дает вклад, равный E_g , а остальная часть энергии фотона переходит в тепло. Поэтому, взяв несколько полупроводниковых материалов с различными значениями ширины запрещенной зоны, удастся увеличить диапазон энергий квантов солнечного излучения, преобразуемых в электрический ток. Сегодня применяются в основном двухкаскадные и трехкаскадные (состоящие из двух и трех p - n -переходов соответственно) солнечные фотопреобразователи. Использовать большее число каскадов трудно из-за резкого возрастания внутреннего сопротивления солнечного элемента. В многокаскадных СЭ работают различные полупроводниковые материалы; пока наиболее распространены СЭ на гетеропереходах тройных соединений (Al)GaInP/(In)GaAs/Ge. КПД трехкаскадных солнечных элементов составляет порядка 40% [4].

СЭ на основе кристаллических полупроводников (Si, Ge, GaAs, GaInP и др.) наравне с целым рядом достоинств, к которым следует отнести большие значения КПД, имеют один существенный недостаток — высокую стоимость вырабатываемой ими электроэнергии. Дело в том, что цена производимой электроэнергии определяется, прежде всего, стоимостью материала, из которого изготовлен СЭ, и затратами технологического процесса производства самого СЭ. Для эффективного поглощения солнечного света в кристаллических полупроводниках толщина структур из дорогостоящего полупроводникового сырья должна быть на уровне сотен микрометров. Кроме того, велики общие потери материала в результате его обработки и резки при создании таких СЭ, а сам технологический процесс нередко требует больших энергетических затрат.

Существенно снизить стоимость вырабатываемой фотовольтаикой электроэнергии позволяет

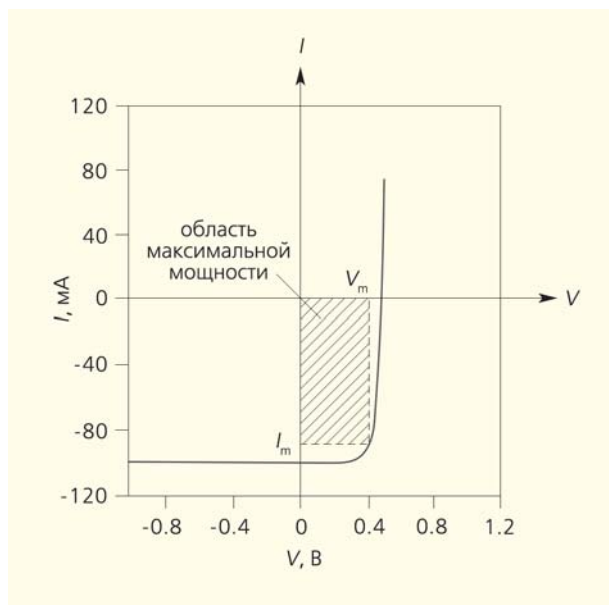


Рис.3. Типичная вольтамперная характеристика солнечного элемента.

технология формирования тонкопленочных СЭ на основе некристаллических полупроводников. Она не требует больших производственных энергетических затрат и значительного количества полупроводникового материала. Далее, однородные тонкие пленки можно осаждать на больших площадях, что позволяет экономить средства при формировании последовательных цепей из тонкопленочных СЭ. Наконец, тонкопленочная технология имеет ряд специфических достоинств, таких как возможность создавать СЭ на гибких подложках и производить прозрачные солнечные модули.

Следует отметить, что тонкопленочные СЭ выпускаются уже довольно давно. Хотя их эффективность ниже, чем у СЭ на основе кристаллических материалов, они успешно применяются для электроснабжения целого ряда бытовых устройств, например электронных часов, калькуляторов, переносных радиостанций и др.

Материалы — плюсы и минусы

В настоящее время разрабатываются технологии получения тонкопленочных СЭ четырех основных типов: на основе гидрогенизированного аморфного и микрокристаллического кремния; поликристаллических соединений CdS и CdTe; соединений типа Cu-In(Ga)-Se(S) (CIGSS) и органических полупроводников. Стоит отметить, что все указанные технологии, за исключением последней, уже используются для производства СЭ в промышленных масштабах. Каждая из представленных выше групп имеет как свои преимущества, так и недостатки. Например, к преимуществам элементов на основе CdTe/CdS относят наименьшую из указанных СЭ стоимость преобразованного ватта мощности (около 0,7 долл. США за 1 Вт). В то же время один из существенных их недостатков — высокая токсичность используемого в технологии Cd. А ограниченного количества Te в земной коре хватит для создания элементов лишь на несколько гигаватт мощности. СЭ на основе CIGSS обладают высокими значения-

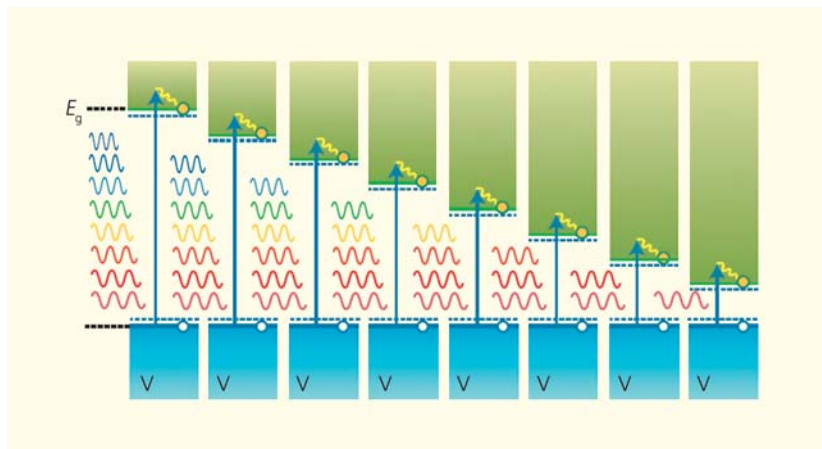


Рис.4. Схематичное изображение поглощения света в многокаскадных солнечных элементах. Коротковолновые фотоны поглощаются в материалах с большой шириной запрещенной зоны E_g , длинноволновые — в материалах с небольшой шириной запрещенной зоны.

ми эффективности преобразования солнечной энергии (для лабораторных образцов значения КПД превышают 20%). Еще один их плюс — использование соединений различных составов с разной шириной запрещенной зоны дает возможность формировать многокаскадные СЭ. Но технология изготовления СЭ, использующая пять различных элементов, достаточно сложна, и разведенного содержания In на Земле хватит на производство СЭ, которые смогут обеспечить не более 10 ГВт мощности. Что касается СЭ на основе гидрогенизированного аморфного и микрокристаллического кремния (рис.5), то они обладают большими значениями коэффициента поглощения в видимой области спектра ($>10^5 \text{ см}^{-1}$) и требуют малых температур для процесса их осаждения на подложки. Кроме того, технология получения данных СЭ «дружественна» к «зеленым»

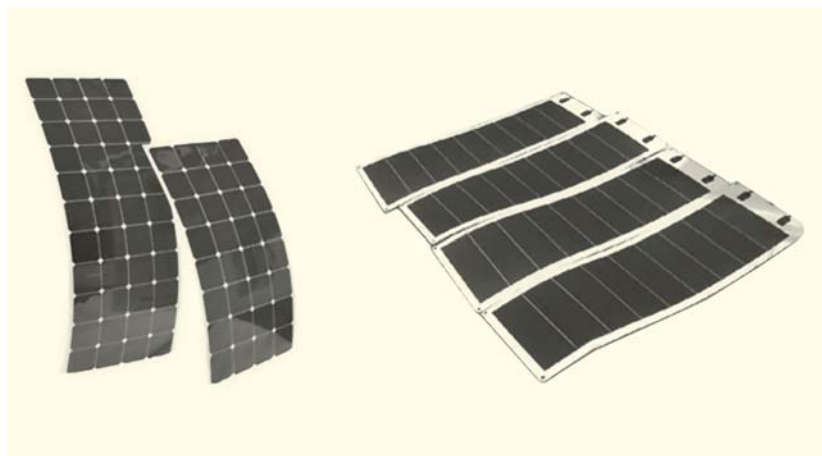


Рис.5. Солнечные элементы из аморфного кремния на гибких и жестких подложках (United System Solar Corporation).

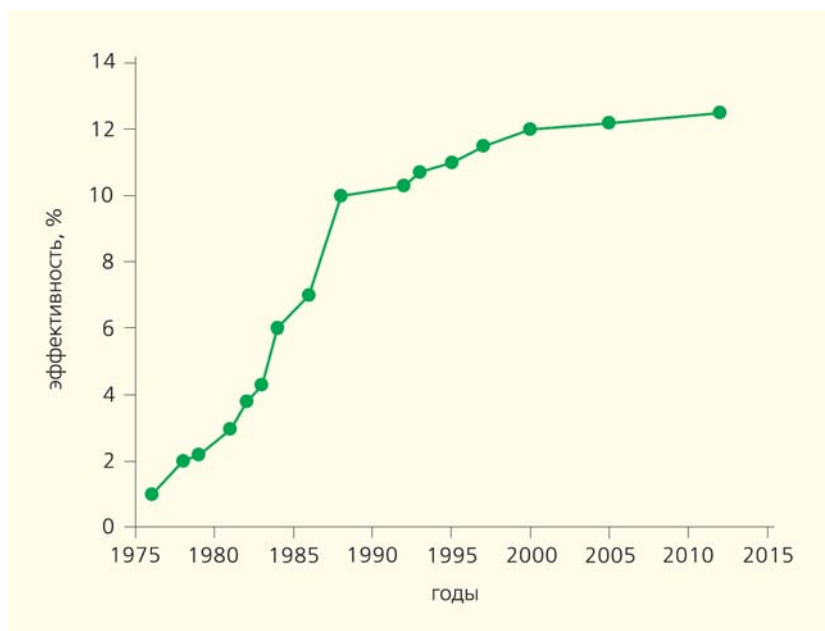


Рис.6. Динамика изменения стабилизированной эффективности солнечных элементов на основе аморфного кремния.

технологиям. Стоит также добавить, что кремний — самый распространенный элемент в природе после кислорода.

Первое сообщение о СЭ на основе аморфного гидрогенизированного кремния ($a\text{-Si:H}$) в 1976 г. [5] вызвало бурный интерес к полупроводниковым материалам, ему подобным. После того как выяснилась важность наличия водорода и его количества в таких материалах [6], было предложено множество методов осаждения $a\text{-Si:H}$, наиболее распространенным из которых остается метод плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD — Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Вскоре после начала использования $a\text{-Si:H}$ для создания СЭ был обнаружен главный недостаток аморфного кремния — фотоиндуцированная деградация его фотоэлектрических свойств, так называемый эффект Стеблера—Вронского [7]. Этот эффект приводит к ухудшению со временем параметров СЭ из $a\text{-Si:H}$. В то же время для процесса деградации характерен эффект насыщения. Поэтому для выходных характеристик СЭ на основе $a\text{-Si:H}$ (тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, КПД) принято указывать их стабилизированные значения. Целесообразно отметить, что прогресс в улучшении свойств материалов, дизайне устройств и процессах производства приводит к постоянному росту стабилизированной эффективности СЭ на базе аморфного кремния (рис.6) [8]. Тем не менее, огромный потенциал роста фотоэлектрической индустрии указывает на то, что эволюция разработки Si-технологии еще далека от завершения.

Новинки технологии

Итак, материалы для СЭ на основе $a\text{-Si:H}$ получают методом PECVD при разложении в тлеющем разряде смеси газов моносилана (SiH_4) и водорода (H_2). Осажденный материал представляет собой слой гидрогенизированного кремния, содержащий от 5 до 20% водорода. Вследствие разупорядоченности структуры у части атомов кремния есть электроны, не участвующие в связях с соседями — так называемые оборванные связи. Эти связи могут быть пассивированы водородом, в результате чего их концентрация уменьшается с $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для негидрогенизированного аморфного кремния до 10^{15} см^{-3} для $a\text{-Si:H}$. Введение водорода и наличие беспорядка в расположении атомов в структуре $a\text{-Si:H}$ оказывают

сильное влияние на ширину запрещенной зоны материала и величину оптического поглощения. Аморфный гидрогенизированный кремний обладает значительным поглощением электромагнитного излучения в области энергий квантов, больших 1.7 эВ, что соответствует красному свету. Получать $a\text{-Si:H}$ с проводимостью n - и p -типа можно непосредственно в процессе его осаждения, если ввести в реакционную камеру гидриды, как правило, пяти- или трехвалентных элементов (обычно фосфин или диборан).

Еще одно замечательное свойство аморфного кремния — возможность создания на его основе композитных слоев с германием $a\text{-SiGe:H}$ и углеродом $a\text{-SiC:H}$, имеющих отличную от $a\text{-Si:H}$ ширину запрещенной зоны, путем добавления в реакционную камеру газов GeH_4 и CH_4 . Это позволило разработать большое число многокаскадных СЭ с улучшенными характеристиками, определяющими эффективность приборов. Ширина запрещенной зоны отмеченных выше соединений изменяется от 1.3 эВ для $a\text{-SiGe:H}$ до 2.1 эВ для $a\text{-SiC:H}$. Кроме того, варьируя соотношение моносилана (SiH_4) и водорода (H_2) в реакционной камере, удается изменять структуру получаемого материала и осаждают нано- и микрокристаллические Si-материалы, которые могут быть использованы в качестве как внутренних i -слоев, так и n - и p -слоев СЭ. Таким образом, подбирая условия роста, можно получить аморфный полупроводник с оптимальными для солнечной энергетики характеристиками.

Фотоиндуцированная деградация электронных свойств $a\text{-Si:H}$ (упомянутый выше эффект

Стеблера—Вронского), приводящая к сильному изменению процессов переноса и рекомбинации носителей заряда, оказывается обратимой. После отжига «деградированного» $a\text{-Si:H}$ при температурах, превышающих 150°C , исходные электрические параметры восстанавливаются. Фотоиндуцированные изменения связаны с появлением в материале метастабильных дефектов — оборванных связей, скорость образования и плотность которых зависят от интенсивности освещения и температуры. Эффект обратимых переключений свойств материала между «отожженным» и «освещенным» состояниями стал одним из наиболее исследуемых в работах, посвященных СЭ на основе $a\text{-Si:H}$. Несмотря на большое количество работ, направленных на изучение эффекта Стеблера—Вронского, в литературе до сих пор отсутствует единая концепция природы и механизмов появления фотоиндуцированных дефектов. Однако большинство авторов отмечает, что водород, пассивирующий оборванные связи в слоях $a\text{-Si:H}$, играет ключевую роль при их возникновении под действием светового излучения [9]. Поэтому значительное внимание в работах, посвященных условиям получения $a\text{-Si:H}$, было направлено не только на улучшение начальных характеристик материала, но и на уменьшение фотоиндуцированной деградации его свойств. Прогресс был достигнут за счет оптимизации условий роста материала, содержащего оптимальную концентрацию водорода в кремниевой матрице.

Качество материалов на основе аморфного кремния определяется целым рядом технологических условий осаждения: температурой подложки, давлением в реакционной камере, скоростью потока газов, частотой и мощностью ВЧ-разряда, создающего плазму, расстоянием между электродами и степенью разбавления моносилана водородом (которая характеризуется параметром $R = [\text{SiH}_4]/[\text{H}_2]$). Проведенные исследования показали, что при увеличении R фотоиндуцированная деградация свойств изготовленных в этих условиях СЭ уменьшается [10]. Если в процессе осаждения пленок задействовать метод эллипсометрии*, можно более детально изучить влияние разбавления моносилана водородом на скорость роста и микроструктуру получаемого материала [11].

С помощью данного метода были построены эволюционные фазовые диаграммы, описывающие влияние степени разбавления водородом на фазовый состав получаемых пленок и зависимость фазового состава от толщины пленок. Удалось выявить четыре различных режима осаждения, приводящих к формированию пленок с различ-

ной структурой: пленки $a\text{-Si:H}$ с гладкой поверхностью; пленки $a\text{-Si:H}$ с шероховатой поверхностью; пленки со смешанным фазовым составом, включающие аморфный и микрокристаллический кремний ($\mu\text{-Si:H}$), и пленки чистого $\mu\text{-Si:H}$. На рис.7 представлена фазовая диаграмма для $a\text{-Si}$, осажденного на подложки из кристаллического кремния при температуре 200°C . В результате детальных исследований была установлена зависимость границ фазовых состояний материала от материала подложки и определен оптимальный фазовый состав внутреннего i -слоя для СЭ с $p\text{-}i\text{-}n$ -структурой [12]. При этом было показано, что оптимальным материалом для i -слоя оказывается наномодифицированный аморфный кремний, или так называемый протокристаллический кремний (pc-Si:H). Структура этого материала представляет собой матрицу аморфного кремния с небольшой (не более 10%) долей нанокристаллических кремниевых включений размером от 2 до 10 нм. На рис.7 область условий роста данного материала заштрихована. По сравнению со стандартным $a\text{-Si:H}$ наномодифицированный аморфный кремний характеризуется лучшими фотоэлектрическими свойствами и большей стабильностью электрофизических параметров при длительном его освещении [11]. Предполагается, что наличие в структуре аморфного кремния нанокристаллов и наноразмерных кластеров уменьшает степень беспорядка в расположении атомов в материале, приводя к увеличению подвижности носителей заряда, длины их амбиполярной диффузии [13] и к значительному уменьшению плотности электронных состояний дефектов в щели подвижности [14].

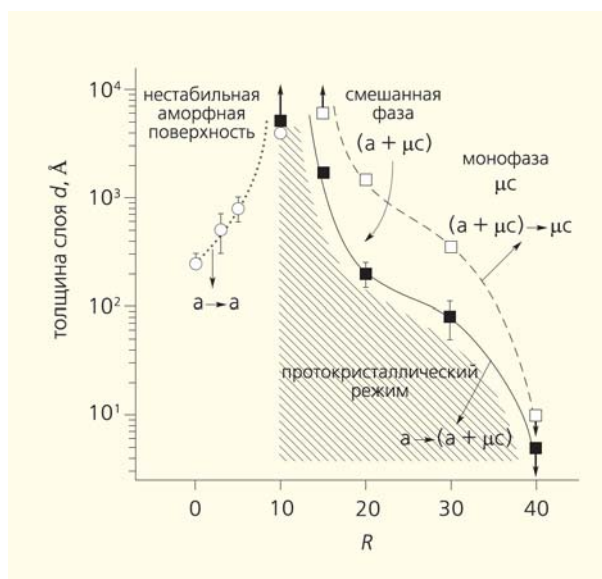


Рис.7. Распределение структуры пленки по толщине в зависимости от соотношения водорода и моносилана в газовой смеси [11].

* Эллипсометрия — неразрушающий метод измерения и контроля оптических параметров тонких пленок по поляризационным характеристикам отраженного от поверхности вещества света.

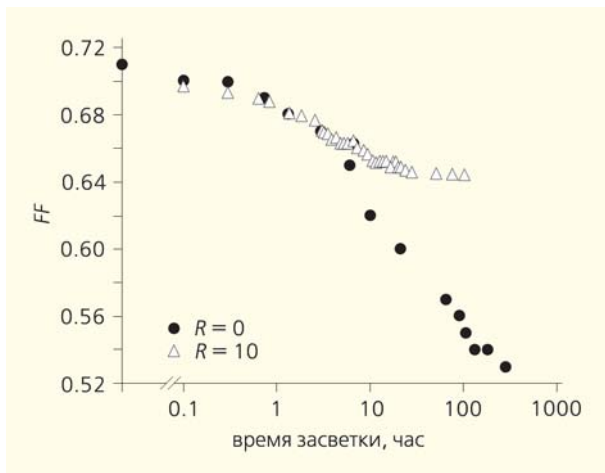


Рис.8. Динамика изменения фактора заполнения солнечного элемента на основе аморфного кремния ($R = 0$) и наномодифицированного кремния ($R = 10$) под действием света солнечного спектра с интенсивностью 1.5 АМ [8].

На рис.8 представлена зависимость от времени освещения для фактора заполнения СЭ $p-i-n$ -типа, который имеет внутренний i -слой толщиной 400 нм, осажденный без разбавления SiH_4 водородом ($R = 0$) и при степени разбавления $R = 10$. Во втором случае в результате процесса осаждения формируется наномодифицированный кремний. Из рисунка видно, что при использовании последнего в качестве внутреннего слоя в СЭ наблюдается улучшение стабильности параметров при длительном световом воздействии.

Ухищрения конструкторов

Как уже было замечено, СЭ на основе наномодифицированного кремния не только обладают лучшими характеристиками преобразования солнечного света по сравнению с СЭ из $a\text{-Si:H}$, но и демонстрируют хорошую стабильность параметров при световых воздействиях. Стоит отметить, что гидrogenизированный кремний, получаемый при высоких значениях R , структура которого в основном определяется микрокристаллической фазой, не подвержен фотоиндуцированным изменениям электронных свойств. Однако фоточувствительность такого материала, определяемая как отношение фотопроводимости к темновой проводимости, в видимом диапазоне солнечного спектра мала. Поэтому $\mu\text{-Si:H}$ обычно используется в качестве p - и n -слоев или в качестве альтернативы $a\text{-SiGe:H}$ слоям в tandemных $p-i-n$ СЭ [15]. Пример tandemных $p-i-n$ СЭ представлен на рис.9.

Основная задача, стоящая перед разработчиками СЭ, заключается в увеличении фактора заполнения, определяющего эффективность СЭ. Проще всего поднять его можно за счет увеличения тол-

щины внутреннего i -слоя элемента [8], но это неминуемо влечет к росту стоимости СЭ. Вот почему представляется интересной идея профессора Е.Яблоновича (США), предложившего вместо увеличения физической толщины материала повысить его так называемую оптическую толщину, вводя текстурированные и отражающие поверхности [16]. Это явление получило название «захвата света». Падающий свет, отражаясь или рассеиваясь на таких поверхностях, будет задерживаться в структуре, многократно проходя через внутренний слой СЭ и поглощаясь в нем. Данный эффект должен приводить к значительному увеличению коэффициента поглощения в длинноволновой области солнечного спектра, что, в свою очередь, повысит эффективность работы СЭ без увеличения толщины внутреннего слоя.

В последние годы достаточно «модным» и перспективным стал подход, в котором для захвата света используются плазмонные эффекты, возникающие вблизи слоев с наночастицами металла

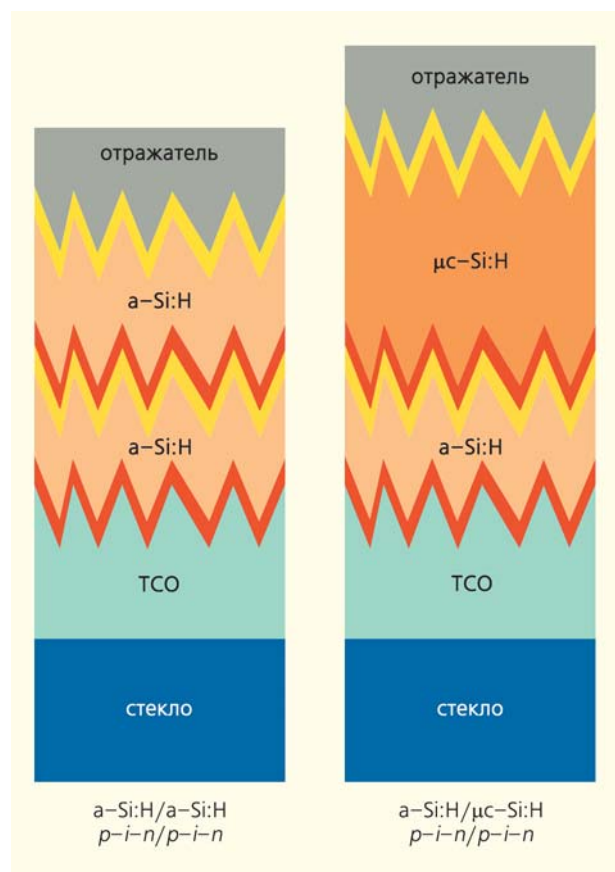


Рис.9. Схематическое изображение tandemных солнечных элементов типа $p-i-n$ на основе аморфного кремния (слева) и микрокристаллического и аморфного кремния (справа). Слои показаны цветом: серым — задний отражающий контакт, желтым и красным — p - и n -слои, соответственно, голубым — прозрачный проводящий оксид, синим — стеклянная подложка.

[17]. В этом случае, во-первых, металлические наночастицы могут служить рассеивающими элементами для длинноволновой составляющей спектра солнечного света, падающего на тонкую пленку полупроводника (рис.10,*а*). Свет, рассеянный под углами, большими угла полного внутреннего отражения (который составляет 16° для границы Si/воздух), будет «захвачен» в материале. При наличии отражающего заднего металлического контакта свет, отраженный в направлении поверхности СЭ, будет частично перенаправлен металлическими частицами обратно в полупроводник. В результате падающий свет несколько раз пройдет через материал, увеличив тем самым длину своего оптического пути. Во-вторых, для повышения эффективности тонкопленочного СЭ можно использовать эффект резонансного возбуждения плазмонных мод в металлических наночастицах, заключенных в полупроводниковую матрицу (рис.10,*б*). Тогда металлические наночастицы (размером порядка 5–20 нм) будут служить эффективными «антеннами» для падающего света. На поверхности наночастиц при этом будут возникать локализованные плазмонные моды, за счет энергии которых будет происходить дополнительная генерация электрон-дырочных пар в полупроводнике и тем самым увеличиваться фактор заполнения. Наконец, «захват» света можно осуществить возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов, т.е. электромагнитных волн, распространяющихся вдоль границы раздела металлического контакта и полупроводника (рис.10,*в*). Данный эффект позволяет поворачивать падающий свет на 90° , и тогда поглощение света будет происходить в латеральном направлении СЭ, размеры которого на порядки превышают длину оптического поглощения света.

Недавно сотрудниками Курчатовского института вместе с коллегами из Московского университета и университета Саутгемптона (Великобритания) был разработан еще один метод, направленный на улучшение эффективности СЭ на основе α -Si:H [18]. Была показана возможность создания люминесцентных слоев на поверхности аморфного кремния при помощи фемтосекундного лазерного излучения. Максимум фотолюминесценции таких слоев лежит в видимой области спектра (675 нм). Это позволяет использовать данные слои для переизлучения ультрафиолетовой части солнечного спектра в эффективно преобразуемый СЭ видимый свет, что приведет к существенному увеличению КПД.

Таким образом, совмещая преимущества оптического усиления и применение наномодифицированного аморфного кремния с улучшенными фотоэлектрическими характеристиками, можно добиться максимального увеличения эффективности тонкопленочных солнечных элементов на основе аморфного кремния.

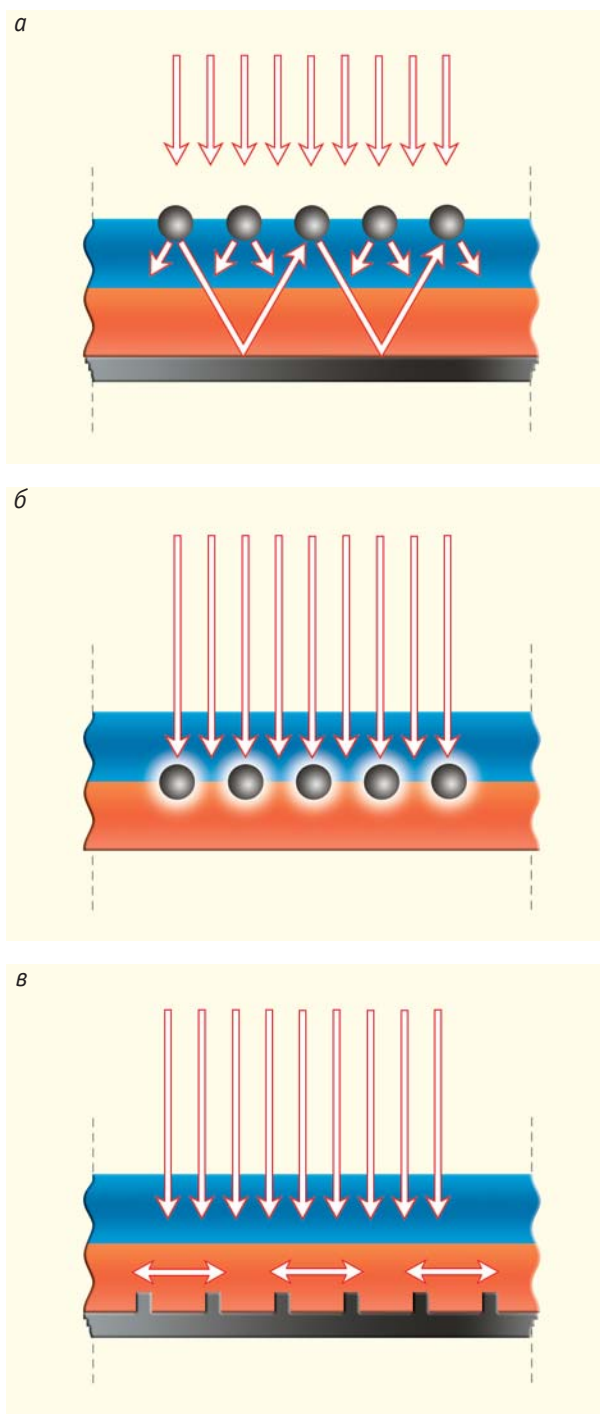


Рис.10. Варианты плазмонного «захвата» света. Рассеяние света на металлических наночастицах, находящихся на поверхности полупроводника (*а*). Рассеянный свет многократно переотражается, увеличивая свой оптический путь через полупроводник. Возбуждение локализованных плазмонных мод на поверхности металлических наночастиц, включенных в полупроводниковую матрицу (*б*). Поле возбужденных частиц создает дополнительные электрон-дырочные пары в полупроводнике. Возбуждение плазмон-поляритонных мод на границе раздела металл—полупроводник, распространяющихся вдоль полупроводникового слоя (*в*) [17].

* * *

Для использования в наземных условиях тонкопленочные СЭ на основе аморфного кремния оказываются самыми перспективными, поскольку стоимость вырабатываемой ими электроэнергии значительно ниже, чем в случае СЭ на основе кристаллических полупроводников. Технология получения солнечных элементов на основе аморфного кремния в последние десятилетия

динамично развивается. Недостатки, связанные с разупорядоченной структурой аморфного материала, могут быть преодолены как в результате использования наномодифицированного аморфного кремния, так и за счет применения эффектов оптического усиления. При этом поиск путей повышения эффективности преобразования энергии солнечного света в элементах на основе аморфного кремния несомненно будет продолжен. ■

Литература

1. *Bookout J.F.* Two centuries of fossil fuel energy // *Episodes*. 1989. V.12/4. P.257—262.
2. *Chapin D.M., Fueller C.S., Pearson G.L.* A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power // *J. Appl. Phys.* 1954. V.25. P.676—677.
3. *Thin-film silicon solar cells* / Ed. Arvind Shah. Lausanne, 2010.
4. *Luque A.* Will we exceed 50% efficiency in photovoltaics? // *J. Appl. Phys.* 2011. V.110. P.031301—031301-19.
5. *Carlson D.E., Wronski C.R.* Amorphous silicon solar cells // *Appl. Phys. Lett.* 1976. V.28. P.671—673.
6. *Brodsky M.H., Frisch M.A., Ziegler J.F., Lanford W.A.* Quantitative analysis of hydrogen in glow discharge amorphous silicon // *Appl. Phys. Lett.* 1977. V.30. P.561—563.
7. *Staebler D.L., Wronski C.R.* Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si // *Appl. Phys. Lett.* 1977. V.31. P.292—294.
8. *Wronski C.R., Pearce J.M., Koval R.J., et al.* Progress in amorphous silicon based solar cell technology // RIO 02 — World Climate & Energy Event. 2002. P.67—72.
9. *Stutzmann M.* Microscopic aspects of the Staebler-Wronski effect // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 1997. V.467. P.37—48.
10. *Bennett M., Rajan K., Krittikson K.* Amorphous silicon based solar cells deposited from H₂-diluted SiH₄ at low temperatures // 23rd IEEE Photovoltaic Specialist Conference. 1993. P.845—849.
11. *Wronski C.R., Collins R.W.* Phase engineering of a-Si:H solar cells for optimized performance // *Solar Energy*. 2004. V.77. P.877—885.
12. *Wronski C.R., Pearce J.M., Deng J., et al.* Intrinsic and light induced gap states in a-Si:H materials and solar cells — effects of microstructure // *Thin Solid Films*. 2004. V.451—452. P.470—475.
13. *Soro M.Y., Gueunier-Farret M.E., Kleider J.P.* Structural and electronic properties of hydrogenated polymorphous silicon films deposited at high rates // *J. Appl. Phys.* 2011. V.109. P.023713—023713-10.
14. *Kleider J.P., Roca i Cabarrocas P.* Reverse bias annealing of Schottky diodes: evidence for the lower defect density and better stability of polymorphous silicon compared to amorphous silicon // *J. Non-Cryst. Solids*. 2002. V.299—302. P.599—604.
15. *Vetterl O., Finger F., Carius R., et al.* Intrinsic microcrystalline silicon: a new material for photovoltaics // *Sol. En. Mat. Sol. Cells*. 2000. V.62. P.97—108.
16. *Yablonovitch E., Cody G.D.* Intensity enhancement in textured optical sheets for solar cells // *IEEE Trans. Electron Dev.* 1982. V.29. P.300—305.
17. *Atwater H.A., Polman A.* Plasmonics for improved photovoltaic devices // *Nature Materials*. 2010. V.9. P.205—213.
18. *Emelyanov A.V., Kazanskii A.G., Kbenkin M.V., et al.* Visible luminescence from hydrogenated amorphous silicon modified by femtosecond laser radiation // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V.101. P.081902—081902-3.

Биотопливные элементы

Р.Г.Василов, А.Н.Решетиллов, А.И.Шестаков

Биоэнергетика — новое научное и прикладное направление в сфере альтернативной энергетики, занимающееся получением энергии на основе принципов живой природы. В современной биоэнергетике идея получения электричества с использованием механизмов живой природы весьма популярна и реализуется, в частности, путем разработки экологически безопасных, неиссякаемых и недорогих биологических топливных элементов. В таких электрохимических устройствах химическая энергия превращается в электрическую с помощью биокатализаторов [1]. Ими могут быть ферменты (ферментные топливные элементы) или органеллы и целые клетки (микробные топливные элементы), в которых энергия трансформируется за счет метаболической активности микроорганизмов. Широкое внедрение таких элементов позволит значительно снизить потребление органического топлива, не уменьшая при этом уровень энергопотребления. Именно этому направлению исследований в области биоэнергетики посвящена наша статья.

Микробные биотопливные элементы

Первые публикации о возможном использовании микроорганизмов для генерирования электричества появились еще в начале XX в. [1, 2]. Однако 90%

© Василов Р.Г., Решетиллов А.Н., Шестаков А.И., 2013



Раиф Гаянович Василов, доктор биологических наук, профессор, начальник Научно-технического комплекса биоэнергетики НБИКС-Центра. Президент Общества биотехнологов России им.Ю.А.Овчинникова. Занимается вопросами биотехнологии, биоэнергетики и биоэкономики: разработкой и созданием биотехнологических производств, а также нанобиоэнергетическими устройствами, интегрированными региональными биоэкономическими кластерами.



Анатолий Николаевич Решетиллов, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией бионаноэнергетических устройств того же центра и лабораторией биосенсоров Института биохимии и физиологии микроорганизмов им.Г.К.Скрябина РАН. Основные научные интересы — разработка и применение электрохимических биосенсоров, а также импедансной спектроскопии к изучению параметров биотопливных элементов.



Андрей Иннокентьевич Шестаков, научный сотрудник кафедры микробиологии биологического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Руководитель группы микробной биотехнологии и автор патента в этой области. Занимается микробиологической конверсией органических отходов различного типа в электрическую энергию.

работ в этой области относится к последним 10—15 годам, когда стали очевидными уникальные перспективы таких биотопливных элементов [3—6]. Но для их практического применения надо решить ряд взаимосвязанных технологических задач, требующих специфического подхода (микробиологического, электрохимического, молекулярно-биологического, экологического, геологического и др.).

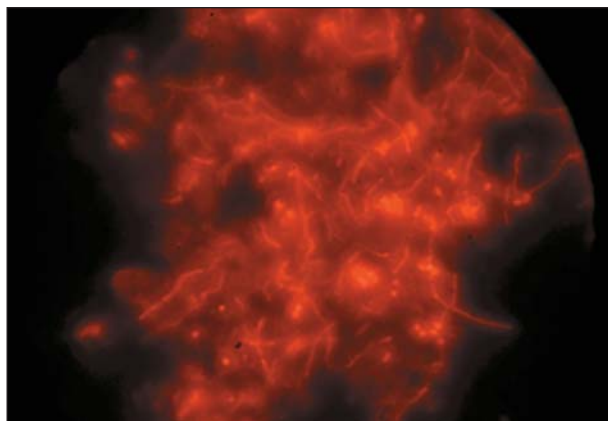


Рис.1. Микрофотография фиксированного препарата микробного электрохимически активного сообщества микроорганизмов. Клетки на поверхности железа (люминесцентная микроскопия, краситель — акридиновый оранжевый, увел.40).

Перспективная сфера приложения микробных биотопливных элементов — утилизация органических отходов с выработкой электричества. Интенсивный рост численности населения и увеличение производственных мощностей в течение XX в.

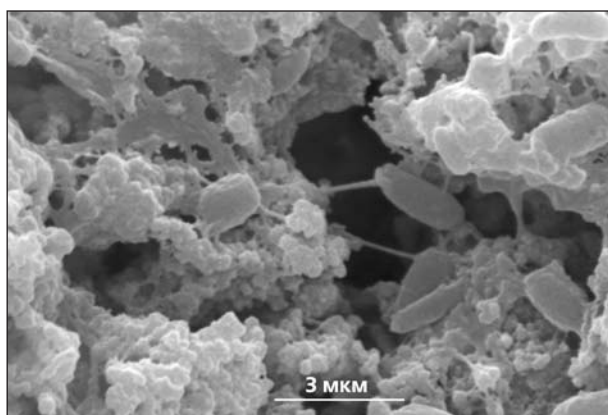
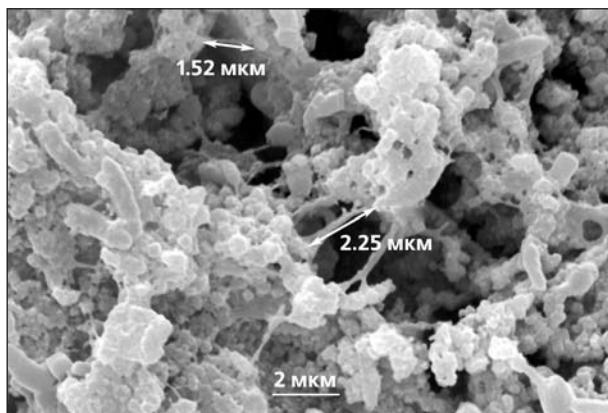


Рис.2. Электронные микрофотографии поверхности частицы Fe_2O_3 , покрытой биопленкой микробного сообщества.

привели к значительному накоплению локальных антропогенных отходов, в том числе и органических, большую часть которых можно использовать как источник энергии. Так, отходы сельского хозяйства и деревоперерабатывающей промышленности, пищевые и др. могут обеспечивать энергией потребителей в населённых пунктах, сельскохозяйственных и промышленных зонах за счет небольших установок по переработке. Это позволит решить проблему избыточного накопления органических отходов и снизить зависимость потребителей от традиционных источников энергии.

Работа по созданию систем микробной переработки отходов была направлена на разработку топливного элемента, который позволяет получать электроэнергию из послеспиртовой барды. Этот отход часто сливают на поля фильтрации (в среднем на 1 л произведенного спирта приходится до 10 л барды), что негативным образом сказывается на состоянии окружающей среды. Нами было выделено сообщество микроорганизмов (бактерии *Eubacterium aggregans*, *Enterococcus gilvus*, *Advenella faeciporci*, *Oscillibacter sp.*, *Lactococcus lactis* и др.), которое при переработке сточных вод от предприятий, производящих спирт, восстанавливало нерастворимые акцепторы электронов — Fe_2O_3 (рис.1,2). В разработанном нами лабораторном



Рис.3. Лабораторный прототип микробного топливного элемента для скрининга и культивирования сообществ и чистых культур электрогенных микроорганизмов: 1 — анод, 2 — катодная камера, 3 — pH-электрод, 4 — электрод сравнения.

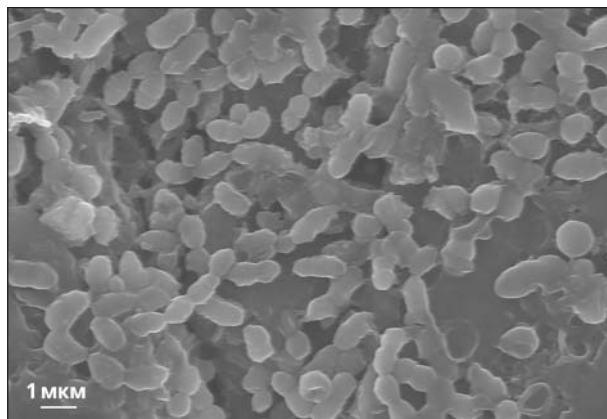


Рис.4. Электронная микрофотография поверхности рабочего электрода, покрытого клетками микроорганизмов (12 дней культивирования).

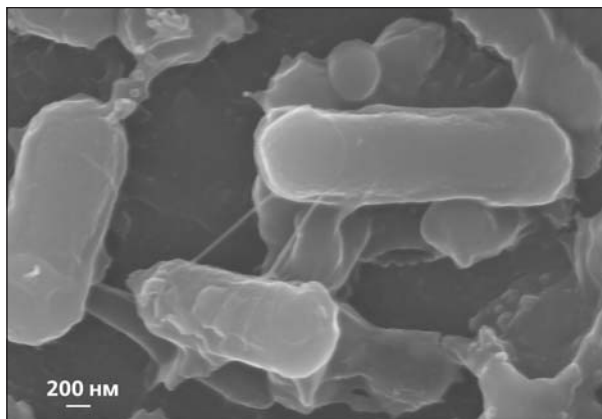


Рис.5. Электронная микрофотография клеток формирующих филаментоподобные структуры на поверхности рабочего электрода (12 дней культивирования).

прототипе микробного элемента использовались микроорганизмы, наиболее эффективно перерабатывающие барду и генерирующие электроэнергию (рис.3). В процессе роста они избирательно покрывали поверхность анодного электрода (рис.4,5). Для культивирования отобранного микробного сообщества была создана уникальная конструкция (рис.6). Максимальная мощность этого микробного элемента, стабильно работающего более 50 дней, составила более 0.5 мВт/300 мл среды культивирования (рис.7).

Такая технология в будущем может иметь значительные перспективы. В июне 2012 г. международный научный химический журнал посвятил специальный выпуск технологии биологических топливных элементов [7]. Главным образом, это вызвано перспективами использования микробных биотопливных элементов в очистке сточных вод от сравнительно безопасных пищевых до токсичных и даже радионуклидов и в переработке различных типов отходов с получением возобновляемой энергии.

Микробные электролизные элементы, схожие с топливными, используются для получения важных химических веществ (например, водорода) [8]. В них на аноде микроорганизмы (*Geobacter*, *Shewanella* и др.) окисляют органические вещества, что уменьшает мощность, необходимую для получения на катоде водорода. Такая система годится и для переработки сточных вод в анодной камере. Катодный процесс может быть химическим или катализироваться микроорганизмами.

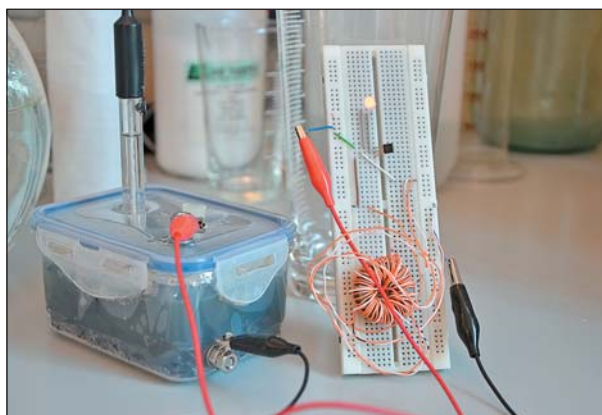


Рис.6. Микробный топливный элемент, разработанный нами для культивирования отобранного сообщества электрохимически активных микроорганизмов.

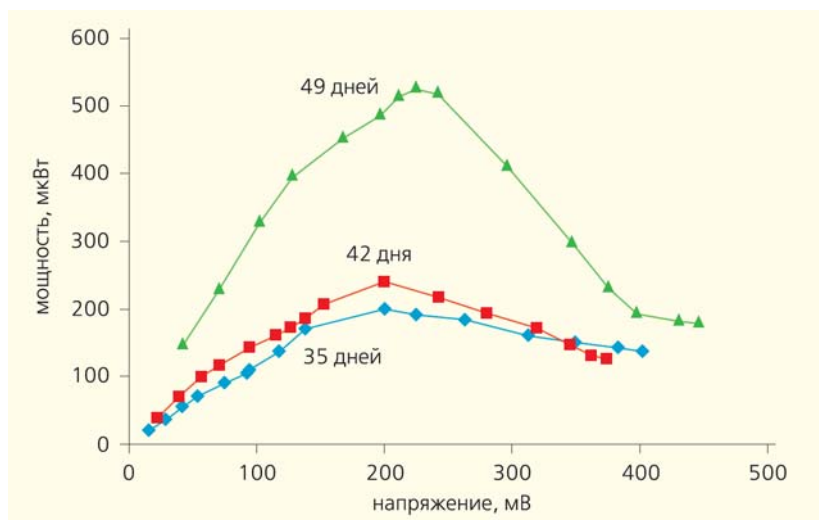


Рис.7. Динамика зависимости мощности от напряжения на протяжении 49 дней непрерывной работы микробного элемента.

Ферментные элементы

Конструкция ферментных биотопливных элементов проще, чем микробных. Чаще всего в качестве анода используют иммобилизованную глюкозооксидазу в смеси с различными медиаторами, затем другие ферменты: алкогольдегидрогеназы (часто в паре с формиадегидрогеназой), глюкозодегидрогеназы и гидрогеназы. Катодом служит главным образом лакказа и билирубиноксидаза [9].

Как показывают исследования, мощность этих систем все еще довольно низка, примерно 50 мВт/см². В 1998 г. был разработан ферментный элемент, в анод которого помимо алкогольдегидрогеназы входили диафораза и бензилвиологен, ускоряющие окисление естественного медиатора (никотинамидадениндинуклеотида). Максимальная мощность описанного метанол/кислородного элемента (катодом была платина) составила 670 мВт/см², а мощность ферментного элемента на основе глюкозооксидазы (анод) и цитохромоксидазы (катод) — 550 мВт/см² [10]. Пока такие элементы стабильно работают часами, днями, реже — десятками дней [11]. Полному окислению субстратов могут способствовать мультиферментные системы, имитирующие метаболизм бактерий. Хрупкость ферментов, казалось бы, исключает долгосрочное применение таких элементов. Однако современные достижения в области генетической инженерии позволили разработать простую систему экспрессии ферментов на поверхности клеток, делая их тем самым воспроизводимыми и более устойчивыми к внешним условиям. Будущие системы, несомненно, должны быть лишены искусственных медиаторов из-за их высокой стоимости. Перспективные разработки необходимо сосредоточить на прямом транспорте электронов.

Устройства, имеющие большую мощность, могут заменять обычные батареи, обеспечивая работу имплантированных медицинских и портативных конструкций, а также объектов, находящихся в труднодоступных местах, биороботов и др. Так, в компании Sony создали глюкозный элемент (он генерировал ток в результате ферментативного расщепления молекул залитого в батарею раствора глюкозы) с максимальной мощностью 1.45 ± 0.24 Вт/см² при перенапряжении 0.3 В, который может обеспечить энергией небольшой радиоуправляемый автомобиль и музыкальный плеер.

Одно из самых разработанных направлений — применение ферментных элементов в медицине. Многие научные коллективы сосредоточены сегодня на создании совместимых имплантируемых медицинских устройств, работающих за счет энергии от переработки органических веществ, поступающих с пищей. Это, безусловно, сложная задача, но, судя по всему, вполне решаемая. Опубликованы данные об успешных работах по вживлению подобных устройств в организм животных (кроли-

ков, крыс, насекомых, моллюсков). Так, глюкозный биотопливный элемент (мощностью 7.5 мВт/мл), помещенный в брюшную полость живой крысы, работал в течение нескольких часов [12].

Американские исследователи из Университета Кларксон в свое время создали гибридное устройство, помещенное в тело улитки, в котором для генерирования электричества использовали глюкозу из крови моллюска. В настоящее время ученые работают с ферментными элементами, вживленными одновременно двум омарам. В результате удалось получить более эффективную систему, генерирующую мощность, работающую в течение нескольких часов, а батарея из пяти таких топливных элементов могла поддерживать функционирование стимулятора сердца [13]. Значит, уже в обозримом будущем можно рассчитывать на разработку и практическое применение стимуляторов, не требующих операций для замены источников питания.

Использование имплантируемых устройств, работающих на биотопливных элементах, выглядит весьма многообещающим и в области бионики. Один из примеров такой успешной разработки — так называемое «бионическое ухо», сложное электронное устройство, вживляемое во внутреннее ухо для стимуляции слуховых нервов. Широкое применение эти элементы находят и при создании оригинальных технических систем и технологических процессов на основе механизмов, заимствованных у природы, в том числе при конструировании биороботов.

Микробные топливные элементы для исследовательских целей

Сегодня моделей и реальных лабораторных установок биотопливных элементов, которые генерируют электрическую энергию длительное время и имеют параметры, удовлетворяющие техническим требованиям практического использования, пока еще сравнительно немного. Для успешного применения таких устройств прежде всего необходимы относительно высокое напряжение (порядка 1.5—2.0 В) и значительный запас энергии. При современном уровне развития электронных и биоинженерных технологий такие параметры можно получить, используя различные варианты. Так, повысить напряжение помогает последовательное включение топливных элементов. Этот комбинированный подход предложили в 1999 г. С.Сасаки и И.Кариби. Изготовленная ими ячейка включала интегрированную ферментную микробатарею, содержащую иммобилизованную глюкозооксидазу, ионообменную мембрану и платиновые электроды [14]. Для эффективного накопления электроэнергии можно воспользоваться сбором энергии на суперконденсаторах (ионисторах) [15]. Интересный способ накопления энер-

гии разработан фирмой Texas Instruments, которая представила новое поколение микросхем для сбора энергии. В частности, они предложили исключительно эффективный повышающий конвертор напряжения для работы с микро- и милливаттными источниками энергии, генерируемой фотогальваническими, термоэлектрическими, электромагнитными и вибрационными преобразователями. Он может накапливать извлеченную энергию в элементах различных типов, включая аккумуляторы и ионисторы.

Мы считаем, что для отработки любого пути, в том числе связи «топливный элемент — блок управления питанием для сбора энергии» можно использовать так называемые микробные топливные элементы для исследовательских целей. Они должны быть легко изменяемы (для получения за-

висимости их работы от того или иного параметра) и относительно стабильны какое-то время (скажем, 24—48 часов), например, по напряжению. За это время можно выполнить несколько проб по отработке связи «топливный элемент — блок управления питанием для сбора энергии».

Мы попытались создать такую стабильную модель на основе бактериальных клеток. По имеющейся в литературе информации, в первую очередь следует обращать внимание на качество иммобилизации биоматериала [16]. Мы провели серию пробных экспериментов при иммобилизации на электроды, модифицированные новыми проводящими компонентами, а именно, наноматериалами (рис.8). Мы выбрали терморасширенный графит (получен из Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН), из которого под вы-

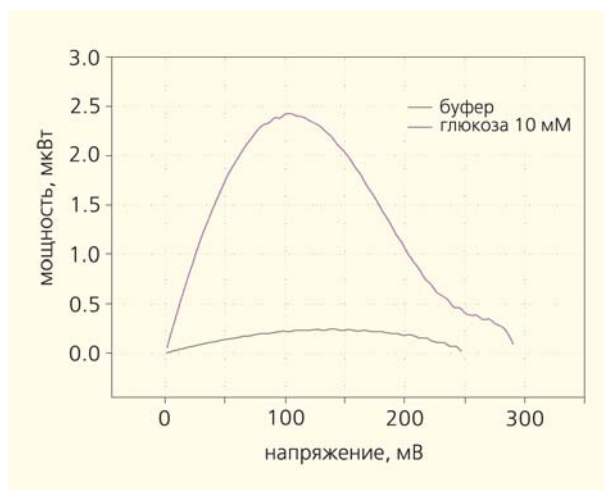
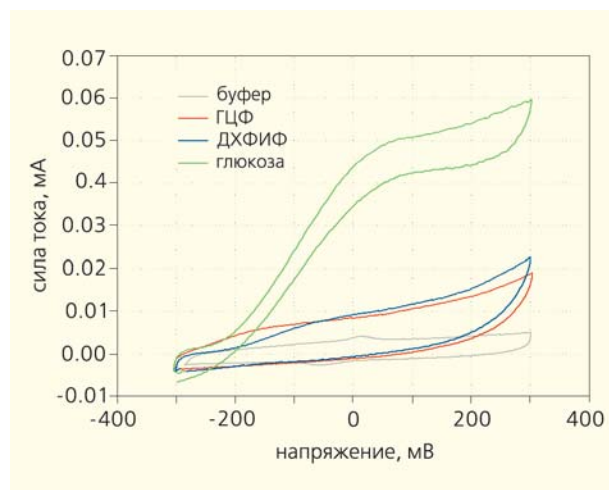
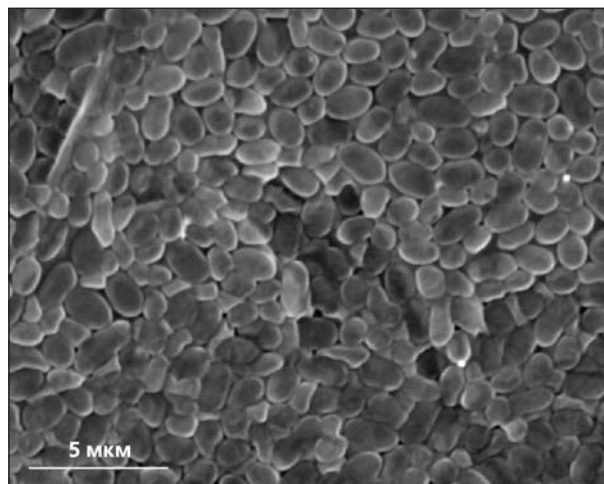
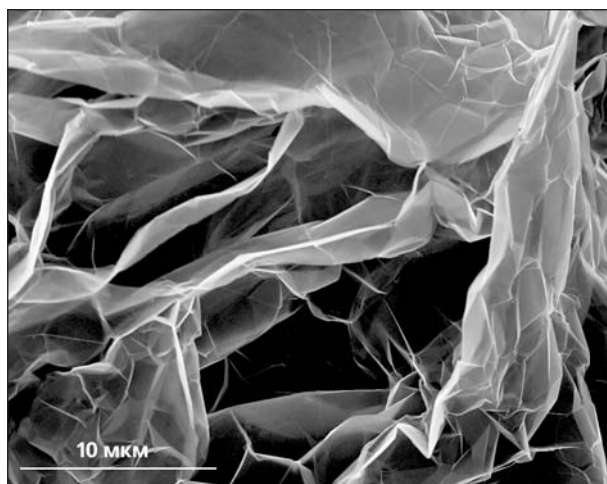


Рис.8. Микрофотографии иммобилизованных клеток *Gluconobacter oxydans* на анод из терморасширенного графита (атомно-силовой микроскоп). На левом фото видны значительные ветвления, которые могут представлять ловушки для микробных клеток; на правом — плотная упаковка микробных клеток, иммобилизованных методом физической адсорбции на анод из терморасширенного графита. На графике (слева) показаны вольт-амперные характеристики анода; виден значительный рост тока при подаче в ячейку глюкозы (зеленая кривая, глюкоза в концентрации 10 мМ). ГЦФ — гексацианоферрат(III) калия, ДХФИФ — 2,6-дихлорфенолиндофенол. Справа — зависимость мощности электрода от напряжения анода. Максимальная удельная мощность электрода — 4.8 мкВт/см².

соким давлением можно формировать электроды для микробного элемента. Эксперименты показали, что клетки *Glucanobacter oxydans*, иммобилизованные на геле из хитозана, оседают на поверхности такого электрода. Использование терморасширенного графита в сочетании с иммобилизацией в поливиниловый спирт и хитозан практически не меняло мощность элемента по сравнению с контролем, что объясняется собственной высокой сорбирующей способностью материала. Проверка операционной стабильности показала, что анод микробного элемента на основе графита в течение 10 суток сохраняет до 35% начальной активности.

* * *

Широкие потенциальные возможности биотопливных элементов повышает актуальность

работ по их созданию. Очевидно, что приоритетными станут разработки элементов, сопряженных с экономичными электронными устройствами. Важнейшее направление в этой области — поиск наиболее эффективных микроорганизмов, а также использование методов генетической инженерии для целенаправленного конструирования электрогенных штаммов. Несомненно, будут интенсивно развиваться и смежные технологии, в том числе, например, биоэлектролизные системы для производства химических соединений, стоимость которых превышает затрачиваемое на этот процесс электричество. Уже в ближайшем будущем станет возможным создание и многообразное применение надежных альтернативных источников энергии на принципах живой природы. ■

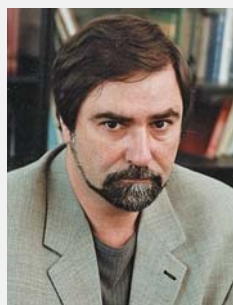
Литература

1. Potter M. On the difference of potential due to the vital activity of microorganisms // Proc. Univ. Durham Phil. 1910. V.3. P.245—249.
2. Potter M. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds // Proc. R. Soc. Lond. 1911. V.84. P.260—276.
3. Logan B.E. Microbial fuel cells: methodology and technology // Environ. Sci & Technol. 2006. V.40. P.5181—5192.
4. Logan B.E., Hamelers B., et al. Microbial fuel cells. New Jersey, 2008. P.200.
5. Kim H., Park H., Hyun M., et al. A mediator-less microbial fuel cells using a metal reducing bacterium *Schewanella putrefaciens* // Enzym. Microb. Technol. 2002. V.30. P.145—152.
6. Дебабов В.Г. Производство электричества микроорганизмами // Микробиология. 2008. Т.77. №2. С.149—157.
7. Deng H., Chen Z., Zhao F. Energy from plants and microorganisms: progress in plant-microbial fuel cells // ChemSusChem. 2012. V.5(6). P.1006—1011.
8. Min Sun, Guo-Ping Sheng, Lei Zhang, et al. An MEC-MFC-coupled system for biohydrogen production from acetate // Environ. Sci & Technol. 2008. V.42(21). P.8095—8100.
9. Barriere F., Kavanagh P., Leech D. A laccase-glucose oxidase biofuel cell prototype operating in a physiological buffer // Electrochim. Acta. 2006. V.51. P.5187—5192.
10. Katz E., Shipway A.N., Willner I. Handbook of fuel cells fundamentals // Technology and Applications. 2003. V.1. P.355.
11. Yubasbi N., Tomiyama M., Okuda J., et al. Development of a novel glucose enzyme fuel cell system employing protein engineered PQQ glucose dehydrogenase // Biosens. Bioelectron. 2005. V.20. №10. P.2145—2150.
12. Cinquin P., Gondran C., Giroud F., et al. A glucose biofuel cell implanted in rats // J. PLoS ONE. 2010. V.5. №5. doi:10.1371/journal.pone.0010476.
13. Halámková L., Halátek J., Bocharova V., et al. Implanted biofuel cell operating in a living sail // J. Am. Chem. Soc. 2012. V.134. №11. P.5040—5043.
14. Sasaki S., Karube I. The development of microfabricated biocatalytic fuel cells // Trends Biotechnol. 1999. V.17. №2. P.50—52.
15. Barsukov V., Johnson C., Doninger E. New carbon based materials for electrochemical Energy Storage Systems: Batteries, Supercapacitors and Fuel Cells (NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry). NY., 2006. P.297.
16. Решетилов А.Н., Василов П.Г., Решетилова Т.А. Биотопливные системы. Возможность реализации новых подходов при объединении биотехнологических и микроэлектронных исследований // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им.Ю.А.Овчинникова. 2013. Т.8. № 4. С.33—41.

Таргетная терапия рака

С.Е.Северин, Е.Ю.Москалева, Г.А.Посыпанова

Исследования последних лет в области клеточной и молекулярной биологии опухолей обогатили науку представлениями, которые позволяют надеяться на создание новых эффективных методов терапии рака. Не секрет, что у современной химиотерапии, несмотря на очевидные успехи, есть немало недостатков. Во-первых, противоопухолевые препараты обладают низкой избирательностью действия, что приводит к глубокому повреждению нормальных тканей и развитию побочных эффектов. Во-вторых, природная и/или индуцированная химиотерапией устойчивость опухолей к лекарствам снижает их эффективность. Кроме того, в новообразованиях присутствуют специфические опухолевые стволовые клетки, которые выдерживают различные терапевтические воздействия, вызывают рецидивы опухолей и развитие метастазов. Решить эти проблемы обещает так называемая таргетная (от англ. target — мишень, цель) терапия. Эта современная, интенсивно развивающаяся технология лечения раковых опухолей нацелена на создание препаратов, действующих непосредственно на опухолевые клетки-мишени.



Сергей Евгеньевич Северин, член-корреспондент РАМН, доктор химических наук, профессор, начальник отделения молекулярной биологии Курчатовского НБИКС-центра, заведующий кафедрой биохимии Первого московского государственного медицинского университета им.И.М.Сеченова. Занимается разработкой таргетных препаратов и полимерных форм противоопухолевых и противобактериальных лекарств.



Елизавета Юрьевна Москалева, доктор биологических наук, профессор, заместитель начальника лаборатории стволовых клеток того же центра. Область научных интересов — стволовые клетки человека, в том числе опухолевые, их активность и чувствительность к повреждающим воздействиям, а также разработка систем избирательного транспорта биологически активных соединений.



Галина Ароновна Посыпанова, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник той же лаборатории. Занимается разработкой систем избирательной доставки противоопухолевых препаратов и олигонуклеотидов в клетки-мишени с использованием в качестве векторных молекул альфа-фетопротейна, его рекомбинантных фрагментов и эпидермального фактора роста.

Системы направленного транспорта

Помимо цитотоксического препарата (химиотерапевтического или радионуклидного) тар-

гетные конструкции, или системы направленного транспорта, содержат векторную молекулу и линкер (от англ. linker — связывающий участок). Именно векторные молекулы определяют строгую избирательность действия лекарств на клетки и ткани (в частности, опухолевые). Векторами могут служить различные биомолекулы (факторы роста, гормоны и онкофетальные белки или их фрагменты), способные связываться со специфическими рецепторами, расположенными на поверхности клеток-мишеней.

© Северин С.Е., Москалева Е.Ю., Посыпанова Г.А., 2013

Хотя в настоящее время в качестве векторов чаще всего используют моноклональные антитела к поверхностным белкам опухолевых клеток, не меньшего внимания заслуживают векторные пептиды. Их преимущества — небольшой размер, простота и доступность синтеза, а также способность быстро проникать в клетки-мишени и накапливаться в них. Противоопухолевый химиопрепарат или радиоактивный изотоп при этом должен быть либо непосредственно соединен с вектором, либо введен в состав наночастиц, которые в таком случае должны быть покрыты векторными молекулами.

Использование наноконтейнеров позволяет значительно повысить концентрацию лекарственного препарата в опухолевых клетках. Дело в том, что клетка-мишень, «не замечая подвоха», поглощает таргетную конструкцию путем рецептор-опосредованного эндоцитоза*. Это процесс избирательный — клетка захватывает только те макромолекулы, для которых у нее есть специфические рецепторы, т.е. векторные молекулы, а вместе с ними в клетку попадают и наночастицы с высоким содержанием лекарства.

Химиопрепараты в составе систем направленного транспорта обладают еще одним преимуществом: они позволяют преодолевать устойчивость клеток опухоли к различным веществам, несходным по химической структуре и механизму действия.

В настоящее время активно изучается возможность использования в качестве векторов некоторых гормонов и их аналогов (как активирующих рецепторы агонистов, так и блокирующих их антагонистов). В частности, многообещающие результаты получены с рецептор-узнающими фрагментами соматостатина и гонадолиберина — пептидных гормонов, которые синтезируются в гипоталамусе [1, 2]. Соматостатин (или соматотропин-ингибирующий гормон) ингибирует высвобождение гормона роста, инсулина, глюкагона, холецистокининов, гормонов поджелудочной железы, секрецию желудочного сока и некоторых факторов роста, подавляет пролиферацию многих нормальных и опухолевых клеток. Гонадолиберин (гонадотропин-рилизинг-гормон) — нейрорегулятор, стимулирующий выработку гонадотропинов гипофизом и играющий важную роль в регуляции репродуктивной функции млекопитающих, стимулирует сперматогенез у самцов и созревание фолликулов у самок.

В медицинских целях используют не природные гормоны (они очень быстро разрушаются в биологических жидкостях), а их синтетические

аналоги. Это более стабильные соединения, которые получают путем присоединения, удаления, замещения или изменения некоторых аминокислот в полипептидной цепочке природных гормонов. Октреотид и ланреотид — наиболее изученные аналоги соматостатина — обладают высокой биологической активностью, которая проявляется при связывании этих пептидов с рецепторами гормонов.

Рецепторы соматостатина присутствуют в различных опухолях нейроэндокринного происхождения, включая рак молочной железы, яичников, легких, предстательной железы и желудочно-кишечного тракта [1]. Рецепторы гонадолиберина обнаружены в опухолевых клетках рака молочной железы, яичников, эндометрия и предстательной железы [2, 3]. Уникальная мишень для таргетных противоопухолевых препаратов — рецепторы онкофетального белка альфа-фетопротейна (АФП). В нормальных клетках взрослых людей их нет, как нет и в клетках доброкачественных новообразований; обнаружены рецепторы АФП только в злокачественных опухолях, причем всех типов (рис.1) [4].

Системы направленного транспорта, включающие фрагменты гонадолиберина, находятся пока в стадии разработки. А вот стабильные аналоги соматостатина уже внедрены в клиническую практику — их используют и при диагностике опухолей, и при терапии. В виде терапевтических пептидов аналоги соматостатина индуцируют апоптоз опухолевых клеток и ингибируют их пролиферацию. В качестве векторов — служат для доставки радионуклидов в опухоли и используются в ядерной медицине [5]. Радиоактивно меченые аналоги соматостатина стали первыми внедренными в клинику таргетными препаратами, которые улучшили визуализацию нейроэндокринных опухолей при сцинтиграфии, а позднее и при позитронно-эмиссионной томографии, а также позволили разработать новый метод радионуклидной терапии рака [6].

В экспериментах мы внутривенно вводили мышам альфа-фетопротейн человека, меченный йодом-125, и исследовали распределение этого белка в тканях и органах животного. Максимальное накопление ^{125}I -АФП происходит в основном через пять часов после введения и сохраняется в печени, кишечнике и крови интактных мышей в течение по крайней мере трех суток. В ткани опухоли, привитой мышам, уровень накопления АФП достигает 6% от введенного количества на 1 г ткани. Это позволило нам рассматривать ^{125}I -АФП в качестве перспективного медицинского радионуклидного маркера при создании радиодиагностических препаратов для обнаружения злокачественных новообразований. Наиболее успешно радиоактивно меченый АФП может быть использован для выявления опухолей кроветворной системы, легких, головного мозга, мышц и почек [7].

* Рецептор-опосредованный эндоцитоз — один из типов везикулярного транспорта, за открытие которого была вручена Нобелевская премия по медицине или физиологии 2013 г. Подробнее эта тема будет обсуждена в традиционной публикации в следующем номере нашего журнала. — *Примеч. ред.*

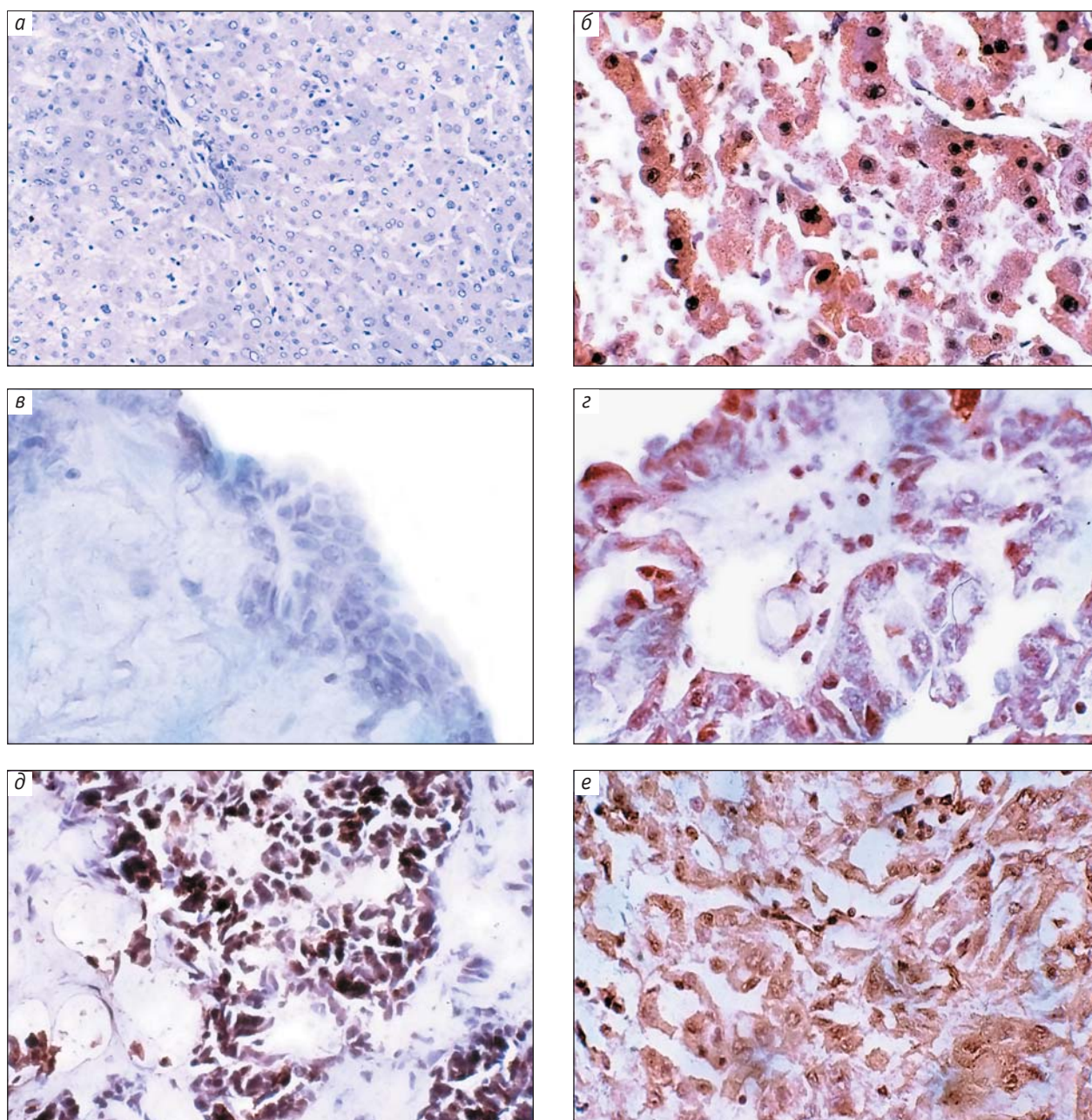


Рис.1. Микрофотографии гистологических срезов опухолевых и нормальных тканей после иммунохимического выявления рецепторов альфа-фетопротейна с использованием специфических антител: *а* — здоровые клетки печени, $\times 250$, *б* — рак печени (гепатоцеллюлярная карцинома), $\times 400$, *в* — доброкачественная опухоль яичника (цистоаденома) $\times 400$, *г* — рак яичника (цистоаденокарцинома), $\times 400$, *д* — рак молочной железы (аденокарцинома), $\times 400$, *е* — рак желудка, $\times 400$.

Пептид-рецепторная радионуклидная и химиотерапия

В направленной пептид-рецепторной радионуклидной терапии используются таргетные препараты с векторными пептидами, которые являются лигандами рецепторов, избирательно представленные в опухоли [5, 8]. В клинических испытаниях терапия, основанная на специфическом вза-

модействии связанного с радионуклидом пептидного аналога соматостатина с его рецептором, привела к увеличению продолжительности и повышению качества жизни больных с нейроэндокринными опухолями. Создание новых пептидных аналогов (более стабильных и более эффективно связывающихся с рецептором) может обеспечить более высокий уровень накопления радиоактивности в опухолевых клетках.

В пептид-рецепторной радионуклидной терапии с использованием аналогов соматостатина применяются разные радионуклиды. Первыми были получены препараты с индием-111. Позднее появились производные аналогов соматостатина с соединениями, которые образуют хелатные комплексы с радиоактивными металлами, такими как 1,4,7,10-тетраазоциклододекан-N, N', N'', N'''-тетрауксусная кислота (DOTA). Этот подход позволил стабильно получать пептиды, меченные индием-111, иттрием-90 или лютецием-177 и повысить эффективность радионуклидной терапии на основе аналогов соматостатина [6, 9–12]. Ее эффективность в этом случае была существенно выше, чем у прежних методов лечения, хотя побочные эффекты все еще имели место [13, 14]. В настоящее время продолжают исследования по созданию улучшенных диагностических и терапевтических систем на основе пептидов-аналогов соматостатина с использованием γ -излучателей ^{99m}Tc , ^{111}In и β -излучателей ^{68}Ga , ^{64}Cu , ^{86}Y , ^{18}F , ^{90}Y (β -частицы с высокой энергией) и ^{177}Lu (β -частицы с низкой энергией) [6].

Значительные успехи достигнуты в экспериментальных исследованиях по созданию целевых препаратов, в которых в качестве повреждающего агента используются цитотоксические лекарства химической природы, а в качестве векторов — аналоги соматостатина. Получены конъюгаты таких пептидов с камптотецином, метотрексатом, паклитакселом и доксорубицином и доказана их высокая противоопухолевая

активность в экспериментальных моделях на животных [15].

Важно отметить, что эти конъюгаты оказывали на опухоль как прямое, так и опосредованное действие, что связано с присутствием на мембране эндотелиальных клеток сосудов опухоли (и только опухоли) рецепторов соматостатина. Другим важным свойством целевых препаратов оказалась их способность преодолевать множественную лекарственную устойчивость опухолей, что определяется способом их поступления в клетку. Напомним, что рецептор-опосредованный эндоцитоз позволяет миновать взаимодействие препаратов с мембранными белками из семейства ABC-транспортеров, которые удаляют из клетки многие токсические вещества на пути их транспорта через мембрану. В составе конъюгатов химиопрепараты не контактируют с клеточной мембраной и ABC-транспортерами, так как проникают в клетку в составе везикул, которые образуются при связывании векторной молекулы со своим рецептором. Высокоактивные в отношении резистентных клеток конъюгаты были получены и при использовании молекулы АФП в качестве вектора [16]. Такие конъюгаты с новым антибиотиком эсперамицином существенно повышали его противоопухолевую активность и даже приводили к полному излечению некоторых животных (рис.2).

Серьезный недостаток конъюгатов векторных белков и пептидов — малое количество молекул цитотоксического препарата, которое можно присоединить к пептиду без нарушения его способно-

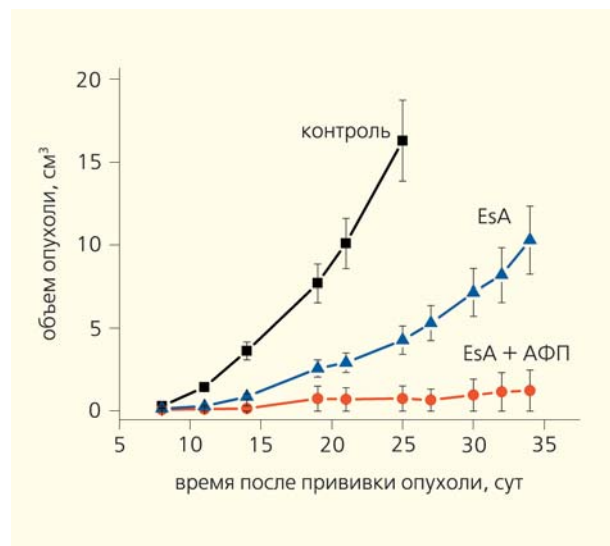
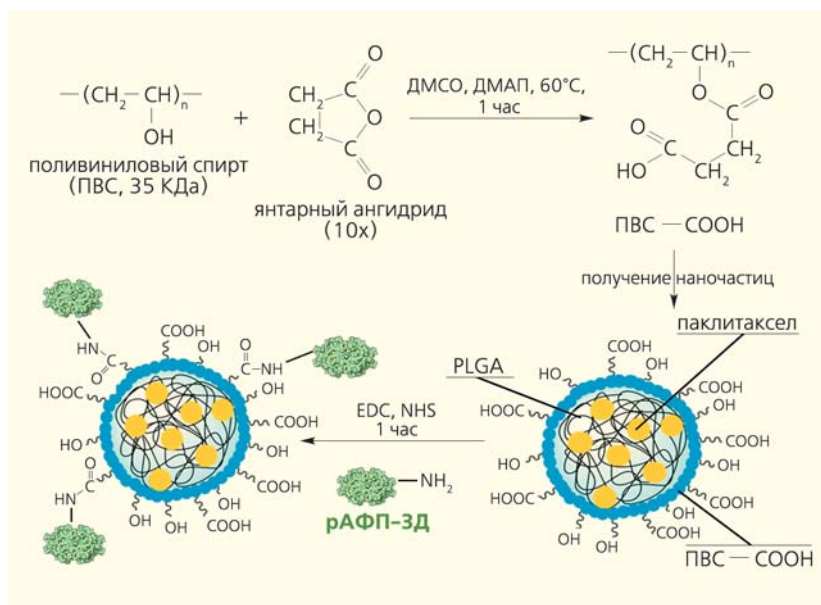


Рис.2. Противоопухолевая активность конъюгата альфа-фетопротеина с эсперамицином. Спустя три дня после прививки опухоли Р388 (пре-В-клеточная лимфома) мышам одной группы вводили конъюгат эсперамицина с альфа-фетопротеином (EsA+АФП), другой — эсперамицин (EsA) в дозе 2.5 мкг на 1 кг веса в течение 5 сут подкожно и 5 сут внутривенно. У животных, которых лечили конъюгатом АФП с EsA, опухоли развивались значительно медленнее по сравнению как с контрольной группой, так и с группой, получавшей EsA, а у 30% животных наблюдались полная регрессия опухолей и значительное увеличение продолжительности жизни. На фотографиях мыши из контрольной группы (а) и из группы животных, которым вводили конъюгат EsA+АФП (б). У леченой мыши виден рубец на месте распавшейся в процессе лечения опухоли.

сти связываться со своим рецептором. Для решения этой проблемы разрабатываются новые подходы, в которых цитотоксический препарат включается в состав липосом, мицелл или полимерных биodeградируемых наночастиц, к которым присоединяют векторные молекулы. Важно, что наноразмерные частицы даже без вектора улучшают биодоступность и фармакокинетику заключенных в них лекарств, так как позволяют оптимизировать доставку препаратов в опухоль. Происходит это потому, что сосуды в опухолях и в зоне воспаления содержат участки, проницаемые для наночастиц.



Новые подходы

Дальнейший прогресс в создании полимерных форм лекарств зависит от разработки таких усовершенствованных носителей, которые будут содержать векторные лиганды, обеспечивающие избирательное связывание наночастиц с опухолевыми клетками или эндотелиальными клетками кровеносных сосудов, снабжающих опухоль питательными веществами и кислородом. Применение векторных наноконтейнеров (липосом, мицелл, наночастиц из различных полимерных биodeградируемых носителей) для создания препаратов с оптимизированными свойствами должно обеспечивать защиту лекарственных препаратов от деградации и улучшать их фармакокинетику благодаря повышению их накопления в опухоли [17].

Недавно была разработана технология получения высокоэффективных векторных наноконтейнеров направленного действия. В качестве вектора в них использованы октреотид и ланреотид, специфически взаимодействующие с рецепторами соматостатина [18–21]. Столь же эффективная конструкция была получена и с другим вектором — рекомбинантным рецептор-связывающим фрагментом рАФП-3Д (рис.3) [22, 23]. Ее противоопухолевая активность обеспечивалась паклитакселом, который был включен в связанные с рАФП-3Д биodeградируемые наночастицы на основе сополимера молочной и гликолевой кислот. Эффективность этих векторных наночастиц была проверена на резистентной линии клеток аденокарциномы молочной железы MCF-7Adr (рис.4).

Однако использование только векторных наноконтейнеров для оптимизации противоопухолевой терапии не решает еще одну проблему, упо-

Рис.3. Схема получения конъюгата рекомбинантного рецептор-связывающего фрагмента АФП (рАФП-3Д) с биodeградируемыми наночастицами сополимера молочной и гликолевой кислот (PLGA). ДМСО — диметилсульфоксид, ДМАП — 4-диметиламинопиридин, EDC — карбодимид, NHS — N-гидроксиsuccинимидный эфир.

мянутую в начале статьи, — борьбу с опухолевыми стволовыми клетками (ОСК). Они чрезвычайно устойчивы к противоопухолевым препаратам, что обусловлено высоким уровнем экспрессии генов ABC-транспортеров. Даже когда удается справиться с клетками основной массы опухоли, ОСК выживают в процессе химиотерапии и в последующем обеспечивают рецидивирование и метастазирование опухолей.

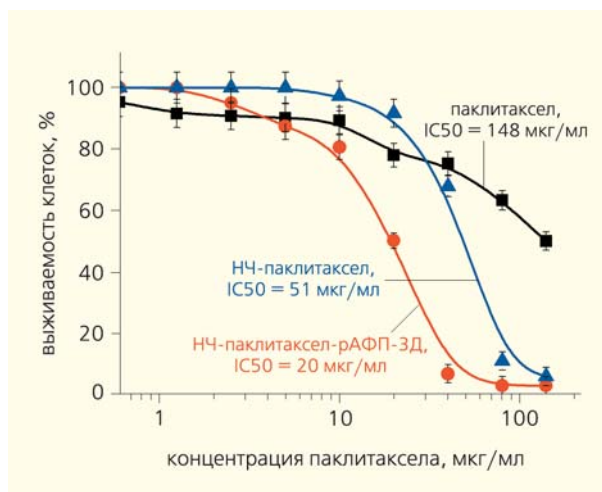


Рис.4. Цитотоксическая активность паклитаксела в свободной форме и в составе наночастиц (НЧ) в отношении опухолевых клеток линии MCF-7Adr с фенотипом множественной лекарственной устойчивости.

Помимо некоторых противоопухолевых препаратов субстратами ABC-транспортеров являются флуоресцентные красители Hoechst 33342 и родамин-123. После инкубации клеток с этими красителями при исследовании с помощью проточной цитофлуориметрии ОСК выявляются как популяция неокрашивающихся или слабо окрашивающихся клеток так называемой побочной (или боковой) популяции, SP (от англ. — side-population). Способность стволовых клеток слабо включать красители и образовывать SP используют в качестве суррогатного маркера для

выявления и нормальных, и опухолевых стволовых клеток.

В настоящее время ведется активный поиск новых лекарственных препаратов, которые могли бы избирательно действовать не только на клетки основной массы опухоли, но и на ОСК или повышать их чувствительность к действию противоопухолевых препаратов. Результаты исследований, выполненных в последние годы, позволяют надеяться, что полиэфирный ионофорный антибиотик салиномицин обладает избирательной токсичностью в отношении ОСК. Этот антибиотик снижает долю

ОСК, проявляет активность ингибитора белка Pgp и благодаря этому способен обращать множественную лекарственную устойчивость опухолевых клеток. Противоопухолевая активность салиномицина обнаружена в отношении клеток рака молочной железы, предстательной железы, различных типов лейкоза и меланомы (рис.5). При этом нормальные лимфоциты и нормальные клетки предстательной железы были значительно устойчивее к салиномицину, чем опухолевые клетки [24].

Недавно был разработан способ комбинированной терапии для удаления опухолей молочной железы при одновременном применении векторных мицелл с октреотидом, нагруженных паклитакселем, и мицелл, нагруженных салиномицином [18]. Для образования полимерных биodeградируемых мицелл авторы использовали блоксополимер полиэтиленгликоля и поли(ε-капролактон). Размер разных мицелл колебался от 23 до 27 нм. Предложенный способ комбинированной терапии, следовательно, позволяет одновременно удалять и опухолевые, и опухолевые стволовые клетки при раке молочной железы.

Таким образом, разработка и успешное внедрение в клинику таргетных нанопрепаратов должны сочетаться с применением препаратов, направленных на удаление ОСК. Эффективные таргетные конструкции получены при использовании в качестве векторных молекул аналогов соматостатина, гонадолиберина и АФП. Таргетные радионуклид-

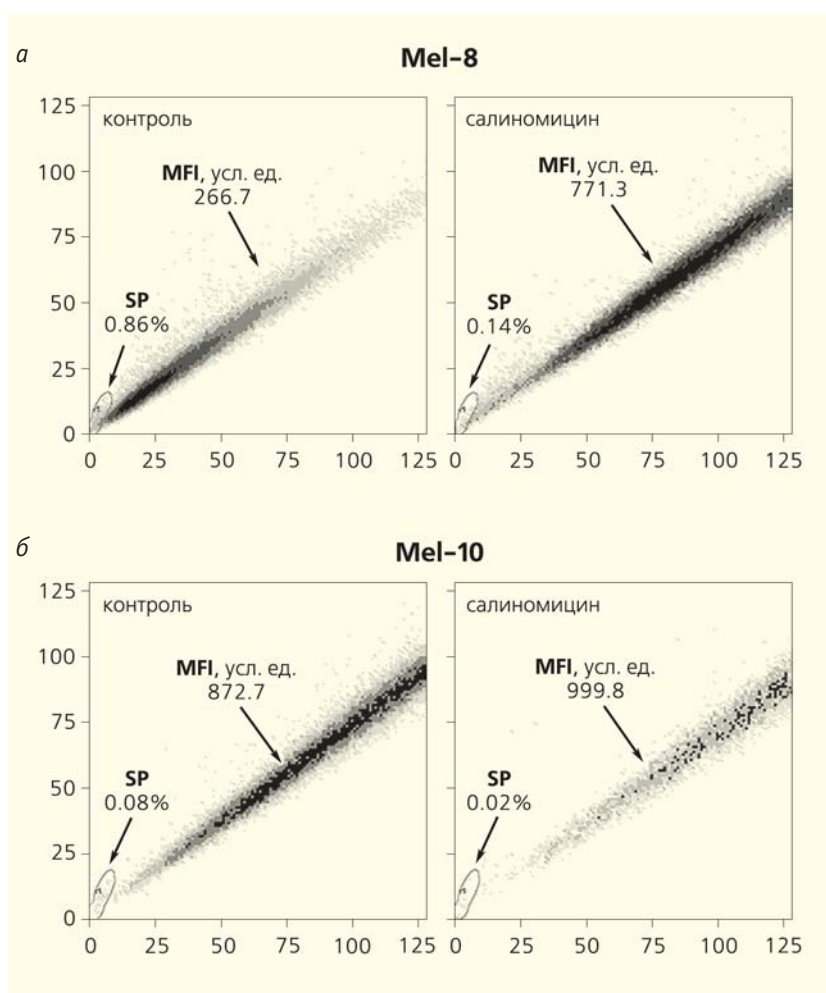


Рис.5. Влияние салиномицина на накопление родамина-123 резистентными клетками меланомы человека линии Mel-8 (а) и чувствительными клетками линии Mel-10 (б). По оси абсцисс — флуоресценция клеток в зеленой области спектра (FL1, усл. ед.); по оси ординат — флуоресценция клеток в красной области спектра (FL3, усл. ед.). Область слабо окрашивающихся клеток побочной популяции (SP) выделена овалом. MFI — средняя интенсивность флуоресценции основной популяции клеток, усл. ед. Данные получены с помощью проточной цитофлуориметрии после инкубации клеток с красителем родамин-123. Хорошо видно, что при действии салиномицина не только возрастает накопление этого красителя в основной популяции опухолевых клеток, но и снижается размер фракции клеток, не накапливающих родамин-123 — потенциальных опухолевых стволовых клеток.

ные конструкции на основе аналогов соматостатина уже применяются в клинике для оптимизации диагностики и терапии опухолей. Таргетные конструкции, включающие химиотерапевтические

препараты, разработаны, в настоящее время завершается этап их исследования на уровне доклинических испытаний, и можно надеяться на их внедрение в клинику в обозримом будущем. ■

Литература

1. *Susini C., Buscail L.* Rationale for the use of somatostatin analogs as antitumour agents // *Ann. Oncol.* 2006. V.17. №12. P.1733—1742.
2. *Dbarap S.S., Wang Y., Cbandna P. et al.* Tumor-specific targeting of an anticancer drug delivery system by LHRH peptide // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2005. V.102. №36. P.12962—12967.
3. *Kbandare J.J., Cbandna P., Wang Y. et al.* Novel polymeric prodrug with multivalent components for cancer therapy // *J. Pharmacol. Exp. Ther.* 2006. V.317. №3. P.929—937.
4. *Ницетов М.Б., Москалева Е.Ю., Посытанова Г.А. и др.* Изучение экспрессии рецептора АФП в опухолевых и нормальных тканях человека с помощью иммуногистохимического метода // *Иммунология.* 2005. Т.26. №2. С.122—125.
5. *Kwekkeboom D.J., Mueller-Brand J., Paganelli G. et al.* Overview of results of peptide receptor radionuclide therapy with 3 radiolabeled somatostatin analogs // *J. Nucl. Med.* 2005. V.46. №1. Suppl:62S—66S.
6. *Maecke H.R., Reubi J.C.* Somatostatin receptors as targets for nuclear medicine imaging and radionuclide treatment // *J. Nucl. Med.* 2011. V.52. №6. P.841—844.
7. *Северин С.Е., Кулаков В.Н., Москалева Е.Ю.* Распределение меченного йодом-125 альфа-фетопротейна в организме животных и его накопление в опухоли // *Вестник РАМН.* 2012. №4. С.11—15.
8. *Visser M. de, Verwijnen S.M., Jong M. de.* Update: improvement strategies for peptide receptor scintigraphy and radionuclide therapy // *Cancer Biother. Radiopharm.* 2008. V.23. №2. P.137—157.
9. *Kwekkeboom D.J., Teunissen J.J., Bakker W.H. et al.* Radiolabeled somatostatin analog (177Lu-DOTA0,Tyr3)octreotate in patients with endocrine gastroenteropancreatic tumors // *J. Clin. Oncol.* 2005. V.23. №12. P.2754—2762.
10. *Fjälling M., Andersson P., Forssell-Aronsson E. et al.* Systemic radionuclide therapy using indium-111-DTPA-D-Phe1-octreotide in midgut carcinoid syndrome // *J. Nucl. Med.* 1996. №37. P.1519—1521.
11. *Heppeler A., Froidevaux S., Eberle A.N. et al.* Receptor targeting for tumor localisation and therapy with radiopeptides // *Curr. Med. Chem.* 2000. №7. P.971—994.
12. *Waldherr C., Pless M., Maecke H.R. et al.* The clinical value of (90Y-DOTA)-D-Phe1-Tyr3-octreotide (90Y-DOTATOC) in the treatment of neuroendocrine tumours: a clinical phase II study // *Ann. Oncol.* 2001. №12. P.941—945.
13. *Forrer F., Valkema R., Kwekkeboom D.J. et al.* Neuroendocrine tumors. Peptide receptor radionuclide therapy // *Best Pract. Res. Clin. Endocrinol. Metab.* 2007. №21. P.111—129.
14. *Kwekkeboom D.J., Teunissen J.J., Bakker W.H. et al.* Radiolabeled somatostatin analog (177Lu-DOTA0, Tyr3)octreotate in patients with endocrine gastroenteropancreatic tumors // *J. Clin. Oncol.* 2005. V.23. №12. P.2754—2762.
15. *Sun L.C., Coy D.H.* Somatostatin receptor-targeted anti-cancer therapy // *Curr. Drug. Deliv.* 2011. V.8. №1. P.2—10.
16. *Северин С.Е., Посытанова Г.А., Москалева Е.Ю.* Разработка новых подходов к лечению рака с помощью препаратов направленного действия и вакцин на основе белка теплового шока gHsp70 // *Молекуляр. медицина.* 2008. №4. С.9—17.
17. *Song G., Wu H., Yoshino K. et al.* Factors affecting the pharmacokinetics and pharmacodynamics of liposomal drugs // *J. Liposome Res.* 2012. №22. P.177—192.
18. *Zhang Y., Zhang H., Wang X. et al.* The eradication of breast cancer and cancer stem cells using octreotide modified paclitaxel active targeting micelles and salinomycin passive targeting micelles // *Biomaterials.* 2012. V.33. №2. P.679—91.
19. *Huo M., Zou A., Yao C. et al.* Somatostatin receptor-mediated tumor-targeting drug delivery using octreotide-PEG-deoxycholic acid conjugate-modified N-deoxycholic acid-O, N-hydroxyethylation chitosan micelles // *Biomaterials.* 2012. V.33. №27. P.6393—6407.
20. *Zou A., Huo M., Zhang Y. et al.* Octreotide-modified N-octyl-O, N-carboxymethyl chitosan micelles as potential carriers for targeted antitumor drug delivery // *J. Pharm. Sci.* 2012. V.101. №2. P.627—640.
21. *Zheng N., Dai W., Du W. et al.* A novel lanreotide-encoded micelle system targets paclitaxel to the tumors with overexpression of somatostatin receptors // *Mol. Pharm.* 2012. V.9. №5. P.1175—1188.
22. *Годованный А.В., Воронцов Е.А., Гукасова Н.В. и др.* Разработка подхода избирательной доставки паклитаксела в составе наночастиц, связанных с рекомбинантным фрагментом альфа-фетопротейна человека, в опухолевые клетки // *ДАН.* 2011. Т.439. №2. С.260—262.
23. *Годованный А.В., Воронцов Е.А., Гукасова Н.В. и др.* Противоопухолевая активность наносомальных систем направленной доставки, приготовленных на основе PLGA-наночастиц, паклитаксела и рекомбинантного фрагмента альфа-фетопротейна in vitro // *Российские нанотехнологии.* 2012. Т.1—2. С.57—63.
24. *Москалева Е.Ю., Северин С.Е.* Противоопухолевая активность ионофорного антибиотика салиномицина: мишень — опухолевые стволовые клетки // *Мол. мед.* 2012. Т.6. С.28—36.

Нанокapsулы из полимеров

Т.В.Букреева, Л.А.Фейгин

Практически все из нас сталкивались с полимерными капсулами, включающими лекарственные препараты. Обычно это широко используемые желатиновые контейнеры, которые предохраняют действующие вещества до тех пор, пока капсула не попадет в кишечник, где оболочка благополучно разрушится и лекарственное соединение через кишечные стенки всосется и попадет в кровоток. Главная задача микро- и нанокapsул, которые активно разрабатываются научными группами по всему миру, состоит в такой же — защитить содержимое контейнера от воздействия окружающей среды до необходимого момента времени или до попадания в определенное место. Кроме того, капсулы могут обеспечить замедленный, продолжительный выход действующего соединения, предотвращая, например, побочные эффекты лекарства, связанные с его высокой концентрацией в организме.

Микроразмерные капсулы давно применяются в косметической, пищевой, текстильной и сельскохозяйственной промышленности [1]. Чем меньше капсула, тем более интересные задачи она может выполнить. В последние годы внимание приковано к полимерным оболочкам размеров меньше микрометра — благодаря заманчивым перспективам их работы в биотехнологиях, синтезе, катализе, медицине. Уже предлагается использовать такие объек-



Татьяна Владимировна Букреева, кандидат химических наук, доцент, заведующая лабораторией капсулирования НБИКС-Центра. Область научных интересов — получение, модификация, исследование структуры тонких органических пленок, полимерных нано- и микрокапсул, инкапсулирование и доставка биологически активных веществ.



Лев Абрамович Фейгин, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории биоорганических структур Института кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН. Заслуженный деятель науки РФ. Лауреат премии им. Е.С.Федорова РАН. Специалист в области использования малоуглового рассеяния рентгеновских лучей и нейтронов для изучения структуры конденсированных фаз и тонких пленок.

ты в качестве реакторов с ограниченным объемом, носителей лекарств, защитных оболочек для клеток и ферментов, носителей в гетерогенном катализе, материалов для диспергирования красителей или удаления загрязняющих веществ. Полимерные сферические оболочки диаметром от нескольких нанометров до микрометра принято называть полимерными нанокapsулами.

Учимся у природы...

В природных биологических системах существуют высокоэффективные наноконтeйнеры — мицеллы и везикулы, которые получают путем самоорганизации молекул [2]. Мицеллы образуются молекулами, имеющими гидрофобную и гидрофильную части: в полярном растворителе (воде) гидрофобные части молекулы формируют ядро (внутреннюю область), а гидрофильные группы — поверхностный слой. В органической жидкости может происходить

обратное: в ядре объединяются гидрофильные группы, гидрофобные же обращаются во внешнюю среду. Липосомы и везикулы — это частицы, возникающие при замыкании в сферу липидных мембран, двухслойных и многослойных соответственно. Взаимодействия между молекулами в таких системах достаточно слабые, поэтому частицы нестабильны и подвержены структурным изменениям.

В конце 70-х — начале 80-х годов прошлого века стали активно развиваться методы получения нанокапсул на основе липосом [3]. Стабилизировать липосомы можно различными способами: провести полимеризацию липидов («сшивку» — например, под действием ультрафиолетового света) в уже сформированной оболочке; добавить к ним полимерные молекулы, взаимодействующие с липидами; взять в качестве исходных для получения липосомы липидные молекулы, «пришитые» к полимеру (рис.1). Разработка этих и других подходов к стабилизации липосом превратилась в широкую область научных исследований.

Полимерные мицеллы также часто используют для формирования нанокапсул [4]. По сравнению с липосомами такие частицы более устойчивы благодаря меньшей подвижности полимерных молекул. Для получения нанокапсул обычно берут полимеры с такими связями, которые позволяют провести дополнительную полимеризацию во внешней части мицеллы. Капсулируемое соединение чаще всего включают в состав ядра при формировании мицеллы. Затем сам материал ядра можно удалить (например, химически — добавлением вещества, реагирующего с материалом ядра и не взаимодействующего с капсулируемым соединением и материалом оболочки). Физическими свойствами таких нанокапсул можно управлять, меняя состав исходной полимерной молекулы и характер сшивки оболочки мицеллы.

...и придумываем сами

Полюе полимерные наночастицы можно получить полимеризацией суспензий и эмульсий, хотя в основном этот способ подходит для создания капсул микрометровых размеров. Оболочку формируют добавлением мономеров к ядру (к твердым частицам в случае суспензий и к каплям масляной фазы в случае эмульсий) и проведением полимеризации на их поверхности. Правда, здесь

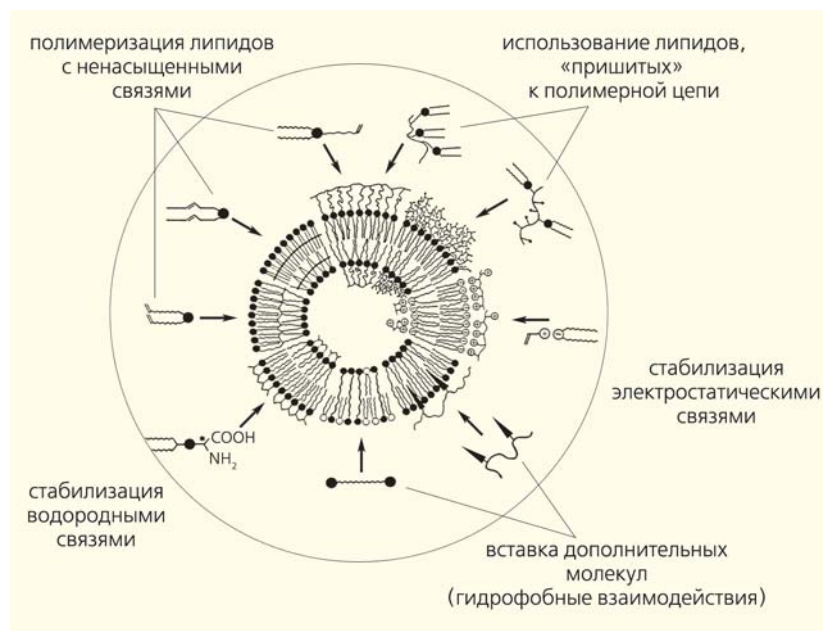


Рис.1. Различные подходы к стабилизации липосом.

возникает проблема, как удалить ядро после формирования оболочки.

В качестве полимерных нанокапсул можно использовать дендримеры — высокоразветвленные каскадные молекулы. Благодаря плотной внешней оболочке и ядру малой плотности такие молекулы могут служить контейнерами для гостевых молекул, захваченных в процессе синтеза дендримера [5]. Тут легко контролировать размер и геометрию нанокапсул, однако получение дендримеров — достаточно дорогая и сложная процедура.

В 1998 г. Е.Донас, Г.Сухоруков и их коллеги по Институту коллоидов и межфазных границ Общества Макса Планка (Германия) предложили методику создания полимерных капсул нового типа [6]. Ее суть состоит в послойной адсорбции противоположно заряженных полимерных ионов (полиэлектролитов) на поверхность коллоидных частиц (рис.2). Экспериментально это осуществляется следующим образом. Частицы, обладающие поверхностным зарядом (например, отрицательным), помещают в раствор противоположно заряженного полиэлектролита (поликатиона). Полимер адсорбируется в виде петель, благодаря чему поверхность частицы перезаряжается. Полученные частицы с полимерным слоем промывают от излишка полиэлектролита и снова погружают в раствор противоположно заряженного полианиона (теперь — полианиона), в результате чего поверхность опять перезаряжается. При многократном повторении такой процедуры рождается многослойная полимерная оболочка. Частицы отделяют от растворов с помощью центрифугирования или фильтрования. Послойный метод нанесения может использоваться для широкого ряда за-

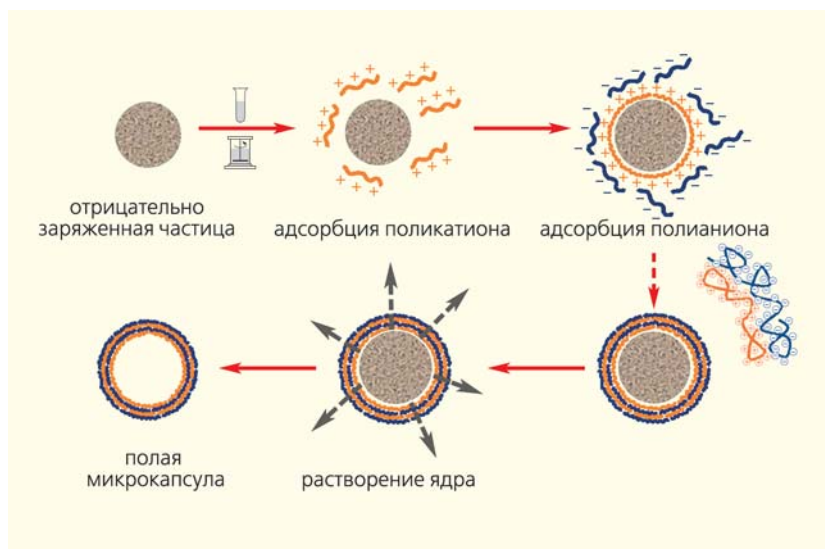


Рис.2. Схема формирования капсулы методом последовательной адсорбции полиэлектролитов.

ряженных макромолекул, включая биополимеры (в том числе белки и нуклеиновые кислоты). Кроме того, в состав оболочки с помощью адсорбции могут быть включены наночастицы, везикулы и даже вирусы.

Если удалить ядро полиэлектролитной капсулы, получим полые структуры с формой, определенной коллоидной частицей-темплатом. Условие создания устойчивой полых капсулы — нерастворимость комплекса используемой пары полианион/поликатион. Диаметр получаемых капсул определяется размером ядер и может лежать в интервале от нескольких десятков нанометров до десятка микрометров. Преимущества полиэлектролитных капсул перед другими подобными системами — одинаковый диаметр частиц при широком диапазоне задаваемых размеров, простота регулирования проницаемости оболочек и возможность широкого выбора материала стенок.

Загружаем мини-контейнер

Оболочка полиэлектролитных капсул чувствительна ко множеству параметров окружающей среды (к виду растворителя, присутствию различных ионов и их концентрации, температуре и др.), которые могут существенно влиять на структуру комплекса между полианионом и поликатионом и, соответственно, на проницаемость капсул. В случае обычно используемых полиэлектролитов оболочка капсулы проницаема для макромолекул и наночастиц в кислой среде (при $\text{pH} < 3$), в то время как в щелочной среде ($\text{pH} > 8$) капсула находится в «закрытом» состоянии (рис.3). Возможность переключения состояния оболочки капсулы между «открытым» и «закрытым» служит эффективным инструментом для капсулирования и высвобождения материала [7]. Полые оболочки помещают в раствор капсулируемого соединения при низком pH , при этом вещество проникает внутрь капсулы. Затем добавляют раствор щелочи, увеличивая pH , и оболочка сжимается, а материал остается захваченным внутри. Суспензию центрифугируют, отделяя капсулы от раствора, и осадок промывают водой.

В результате нагревания полиэлектролитных капсул при $50\text{--}120^\circ\text{C}$ может происходить заметное уменьшение их диаметра (рис.4), сопровождающееся сильным увеличением толщины оболочки и уменьшением ее проницаемости [8]. Мини-контейнеры становятся непроницаемыми даже для низкомолекулярных соединений и неорганических ионов. Этот подход также можно использовать для капсулирования различных веществ, однако он осуществим лишь для оболочек из ограниченного

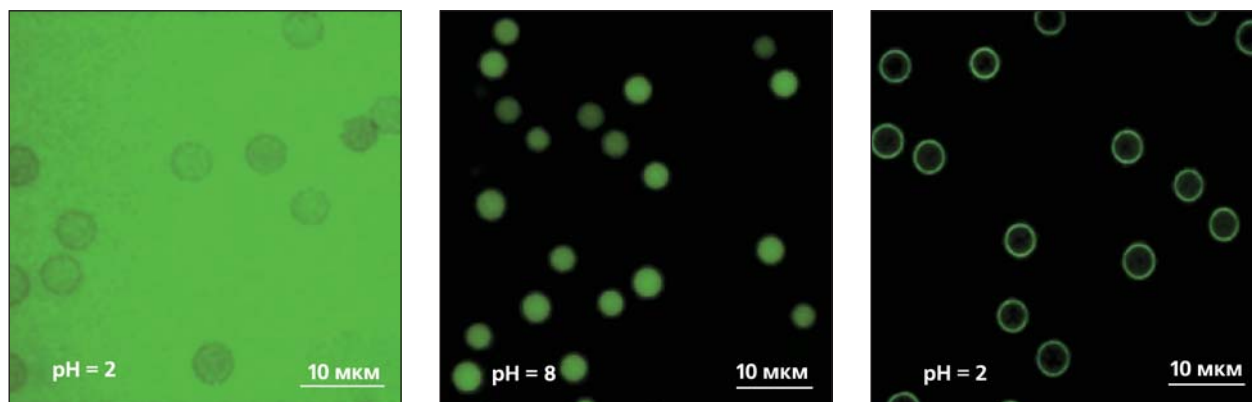


Рис.3. Капсулирование в полиэлектролитные оболочки и высвобождение полимера с флуоресцентной меткой с помощью изменения pH среды. Изображения получены методом конфокальной флуоресцентной лазерной сканирующей микроскопии.

числа полиэлектролитов, поскольку эффект термической усадки не универсален. Кроме того, «усевшая» под действием температуры оболочка не расширяется в исходное состояние.

Первые работы, описывающие методику приготовления полиэлектролитных капсул, имели большой научный резонанс. В начале 2000-х годов вышло множество публикаций, посвященных разработке и подробному изучению способов капсулирования веществ и объектов различного типа в полиэлектролитные оболочки. Были получены капсулы из широкого набора полиэлектролитов, в том числе включающих различные органические и неорганические компоненты, исследованы структура и свойства таких оболочек.

В Институте кристаллографии с конца 1970-х годов проводились исследования тонких органических пленок, полученных методами Ленгмюра—Блоджетт (т.е. при помощи переноса упорядоченного слоя органических молекул с поверхности жидкости на твердую подложку) и послойной адсорбции полиэлектролитов. Собственно, одни из основных создателей методики формирования полиэлектролитных капсул Г.Б.Сухоруков и Ю.М.Львов до конца 1980-х — начала 1990-х годов работали по этой тематике в лаборатории малоуглового рассеяния ИК РАН. На волне возрастающего научного интереса к полиэлектролитным капсулам в 2005 г. в этой лаборатории при активной поддержке директора института М.В.Ковальчука была создана группа капсулирования, на базе которой в 2010 г. возникла новая лаборатория — лаборатория биоорганических структур. Затем тематика была развита и в стенах Курчатовского института, в Центре конвергентных нано-, био-,

информационных, когнитивных и социогуманитарных наук и технологий. Там была создана лаборатория капсулирования, занимающаяся разработкой этих перспективных систем.

Кнопка запуска

Одним из способов «вскрытия» полиэлектролитных оболочек может быть воздействие лазерного излучения, для чего в состав стенок капсул включают наночастицы металлов [9]. Наночастицы серебра и золота могут эффективно поглощать лазерное излучение и благодаря этому работать «кнопкой запуска» процесса разрушения оболочек капсул. Высвобождения «упакованного» материала добиваются, используя дистанционное воздействие лазерного излучения на капсулы, модифицированные такими наночастицами [10]. При воздействии лазерного излучения происходит локальный разогрев оболочки, который может привести к ее деформации или разрушению и высвобождению закапсулированного материала (рис.5).

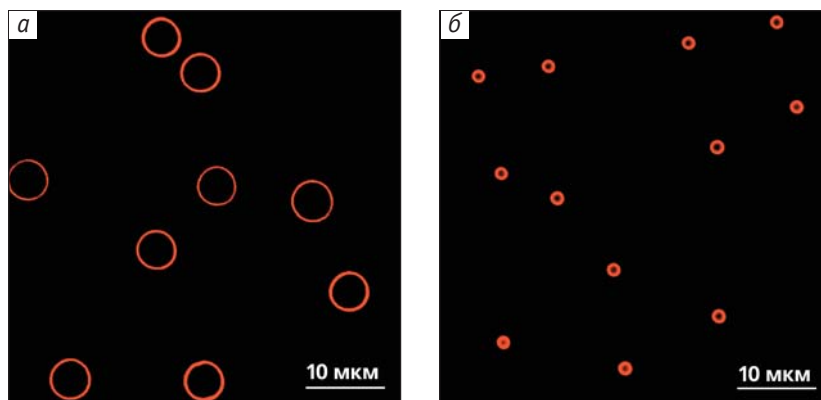


Рис.4. Изображение в конфокальном флуоресцентном лазерном сканирующем микроскопе полиэлектролитных капсул до нагревания (а) и после нагревания при 120°C (б) [8].

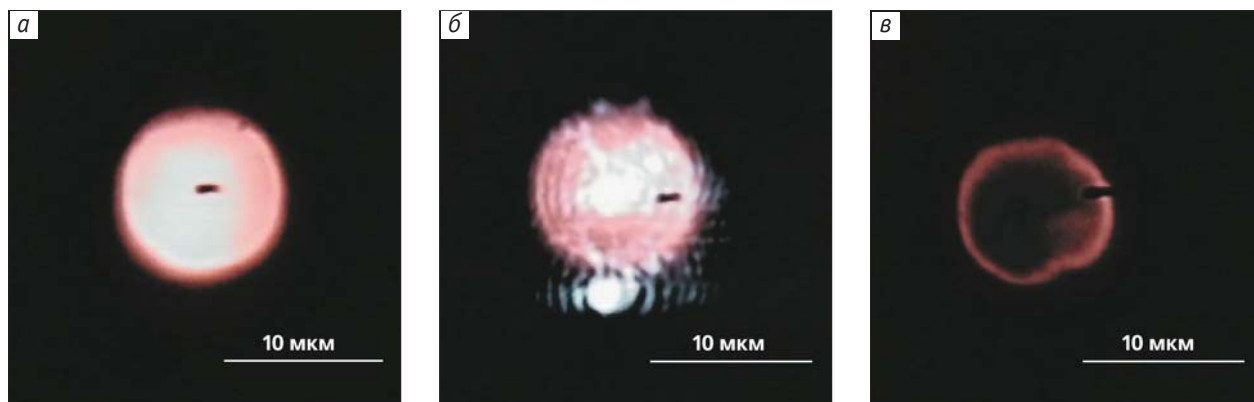


Рис.5. Высвобождение закапсулированного флуоресцентного красителя воздействием лазерного излучения: капсула с наночастицами золота в составе оболочки, заполненная красителем, до (а), в процессе (б), после (в) облучения лазером.

Вместе с тем механизм взаимодействия лазерного пучка с различными структурными элементами капсул остается малоизученным.

Наночастицы серебра и золота включали в состав стенок капсул за счет электростатической адсорбции. Было показано, что эффективностью поглощения лазерного излучения удастся управлять, адсорбируя отдельные частицы или их агрегаты (рис.6). Кроме того, можно проводить синтез наночастиц непосредственно на полиэлектролитной оболочке. Так, наночастицы серебра на капсулах были получены с помощью реакции «серебряного зеркала» — восстановления металла из аммиачного раствора оксида серебра.

Дистанционное высвобождение закапсулированного материала с помощью лазерного излучения может быть проведено в определенном месте организма, что обеспечит локальное воздействие лекарства (например, на раковую опухоль). В войне с болезнями такое действие можно уподобить снайперскому оружию в противовес «ковровому бомбометанию» при обычных методах лечения, вроде химиотерапии рака. При этом, конечно, должны использоваться медицинские лазеры, не разрушающие биологические ткани, но воздействующие на оболочки капсул.

Следить за капсулами в организме, управлять их перемещением и накапливать доставляемое вещество в необходимом месте удобно при помощи магнитного поля, для чего было предложено модифицировать полиэлектролитные оболочки магнитными наночастицами. Для биомедицинских целей лучше всего подходят наночастицы магнетита, которые включали в стенки полиэлектролитных капсул как за счет электростатической адсорбции, так и путем синтеза непосредственно на оболочке. При этом капсулы становятся чувствительными к воздействию магнитного поля (рис.7).

Новые веяния

Последние работы по полиэлектролитным капсулам посвящены в основном биомедицинским аспектам их применения [11—13]. В ходе исследования взаимодействия капсул с живыми клетками продемонстрирована доставка в клетки посредством капсул как низкомолекулярных лекарств, так и белков. В результате изучения деградации оболочек капсул из биополимеров под действием фермента [14] показано, что управлять временем разложения можно, меняя толщину оболочки за счет изменения числа полиэлектролитных слоев

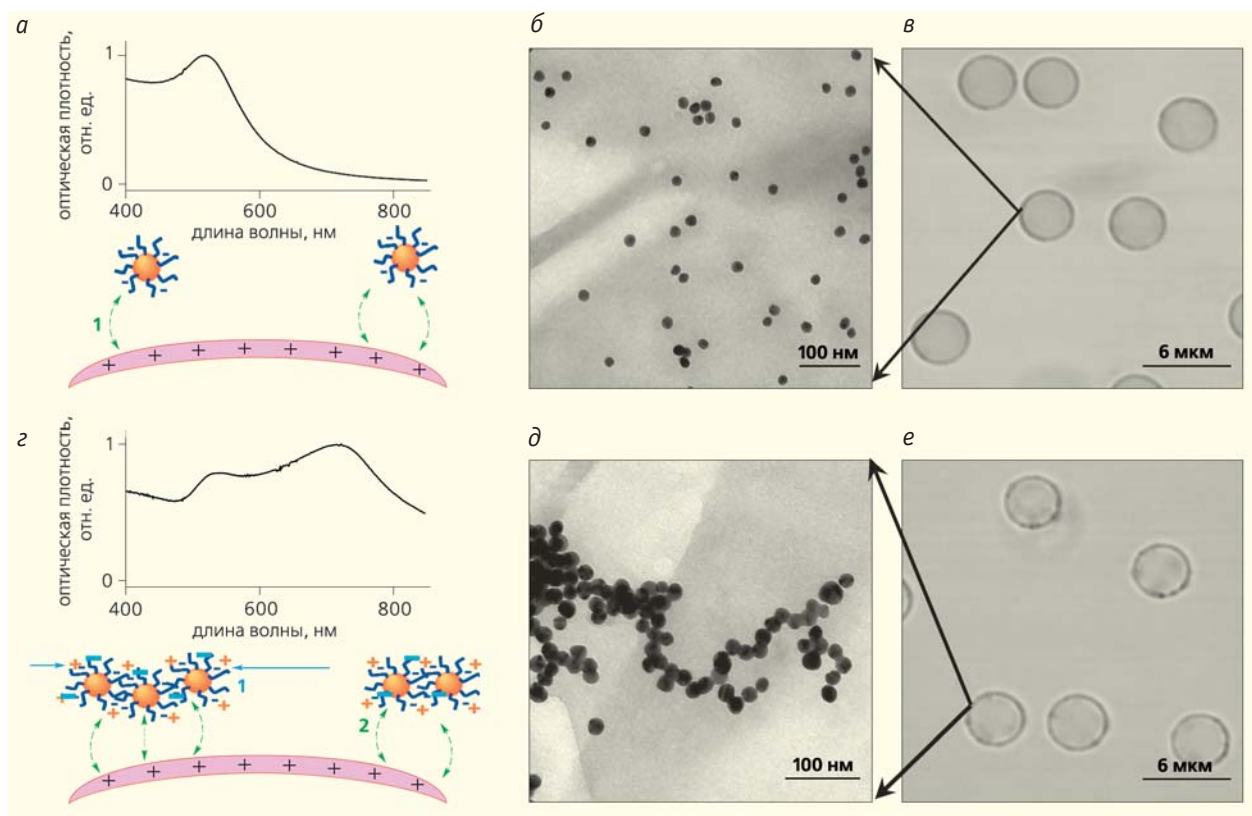


Рис.6. Управление адсорбцией наночастиц золота на полиэлектролитные оболочки капсул: адсорбция в виде отдельных частиц (а—в) и агрегатов (г—е). Спектры поглощения систем и схемы адсорбции (а, г), изображения, полученные при помощи просвечивающего электронного микроскопа (б, д) и конфокального микроскопа (в, е).

и варьируя их полимерный состав. Ферментативное разрушение стенок капсул (рис.8) обеспечивает контролируемый выход закапсулированного материала в организме и вывод из него остатков оболочки.

Интересное развитие получили работы по созданию полиэлектролитных капсул на основе микрочастиц карбоната кальция. Это касается разработки новой системы доставки лекарственных веществ в мозг. Пока проблема направленной доставки соединений в центральную нервную систему не решена, это существенно ограничивает возможности современных подходов к диагностике и лечению церебральных патологий. В совместной работе с Институтом высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН было решено использовать интраназальное введение препаратов (через нос). Сейчас данный способ считается очень перспективным, так как предполагается, что введенные интраназально вещества способны проникать напрямую в центральную нервную систему по каналам обоняния, минуя гематоэнцефалический барьер [15]. Кроме того, такая манипуляция удобна для пациента. Однако на пути вещества через нос в центральную нервную систему препятствия: большое количество ферментов на слизистой оболочке носа, расщепляющих введенные соединения; естественный механизм очистки слизистой за счет мерцательных движений ресничек на поверхности клеток в назальной полости; низкая биодоступность веществ с большой молекулярной массой. И все эти проблемы позволяет решить одним махом использование микроконтейнеров. Частицы размером от 3 до 7 мкм наиболее эффективно удерживаются на слизистой носа (частицы меньших размеров чаще попадают в легкие, больших — в пищевод). Пористые сферические частицы карбоната кальция необходимого размера были разработаны в начале 2000-х годов для использования в качестве ядер полиэлектролитных капсул [16]. Эти частицы благодаря высокоразвитой поверхности способны адсорбировать существенное количество функционального вещества, причем можно заполнять целевым соединением поры готовых частиц, а можно включать его в состав частиц в процессе их формирования.

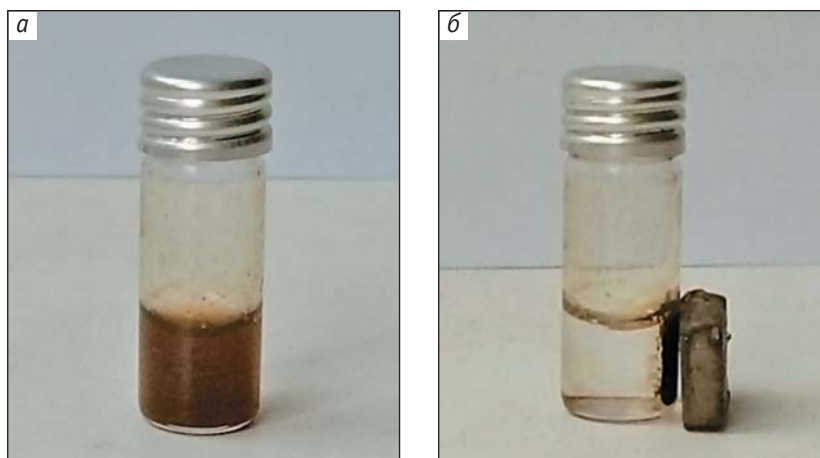


Рис.7. Водная суспензия полиэлектролитных капсул, модифицированных наночастицами магнетита: до (а) и после (б) воздействия магнита.

В результате проведенных тестов на лабораторных грызунах показана эффективность доставки в центральную нервную систему обезболивающего средства [17], а также ноотропного (улучшающего мозговую деятельность) препарата пептидной природы [18] при помощи пористых частиц карбоната кальция и диоксида титана — и «голых», и покрытых полиэлектролитными слоями. Материалом оболочки служили мукоадгезивные (имеющие сродство к слизистой) полимеры. Полимерная оболочка частиц позволяет микроконтейнерам действовать дольше, так как она, с одной стороны, замедляет выход целевого соединения, а с другой — задерживает частицы на поверхности слизистой. Наилучшие результаты по данным теста на изменение болевой чувствительности крыс были получены для контейнеров из частиц карбоната кальция, покрытых слоем гиалуроновой кислоты. Эти частицы, загруженные центральным анестетиком лоперамидом, дают заметный обезболивающий эффект.

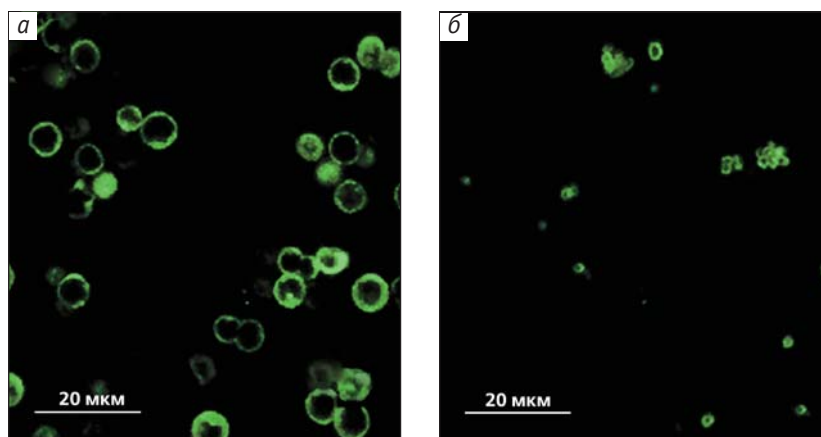


Рис.8. Разложение капсул из полипептидов под действием проназы: капсулы до воздействия фермента (а), после выдержки в растворе проназы (б).

Одной из нерешенных биомедицинских проблем остается введение в организм гидрофобных лекарственных веществ, поскольку такие соединения не могут переноситься с током крови. Сегодня в нашей лаборатории проводятся работы по капсулированию водонерастворимых веществ, в которых методики стабилизации эмульсий и последовательной адсорбции полиэлектролитов сочетаются. Микро- и наноразмерные капли масляной фазы в воде, стабилизированные слоем амфифильного полимера, покрывают дополнительными слоями полиэлектролитов, создавая таким образом капсулы.

Уникальные свойства полиэлектролитных капсул делают этот объект чрезвычайно интересным для дальнейших научных разработок, и в перспективе, возможно, это приведет к созданию новых высокоэффективных средств медицинской диагностики и доставки лекарств, а также биосенсорных систем.

Развитие фундаментальных исследований в области получения самых разнообразных микро- и нанокapsул и их приложений в НБИКС-Центре Курчатовского института открывает широкие возможности в этой сфере. Прежде всего, мы можем использовать самые современные экспериментальные методики — высокоразрешающую электронную микроскопию, структурные исследования с применением источника синхротронного излучения (малоугловое рассеяние, рефлектометрия), проводить испытания на живых клетках и лабораторных животных. Кроме того, не менее важны контакты с исследователями различных специальностей и научных направлений, работающих в Центре. Именно в таких условиях реализация междисциплинарных исследований позволит достичь успехов в решении наиболее актуальных физико-химических и медико-биологических задач, одна из которых — создание новых видов полимерных капсул и их применение. ■

Литература

1. Солодовник В.Д. Микрокапсулирование. М., 1980.
2. Шукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М., 2004.
3. Сумм Б.Д., Иванова Н.И. Объекты и методы коллоидной химии в нанохимии // Успехи химии. 2000. Т.69. №11. С.1005—1008.
4. Förster S., Plantenberg T. From self-organizing polymers to nanohybrid and biomaterials // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2002. V.41. P.688—714.
5. Jansen J.F.G.A., De Brabander-van den Berg E.M.M., Meijer E.W. Encapsulation of guest molecules into a dendritic box // *Science*. 1994. V.266. P.1226—1229.
6. Donath E., Sukhorukov G.B., Caruso F. et al. Novel hollow polymer shells by colloid-templated assembly of polyelectrolytes // *Angew. Chem. Int. Ed.* 1998. V.37. P.2202—2205.
7. De Geest B.G., Sanders N.N., Sukhorukov G.B. et al. Release mechanisms for polyelectrolyte capsules // *Chem. Soc. Rev.* 2007. V.36. P.636—649.
8. Köhler K., Shchukin D.G., Sukhorukov G.B., Möhwald H. Drastic morphological modification of polyelectrolyte microcapsules induced by high temperature // *Macromolecules*. 2004. V.37. P.9546—9550.
9. Букреева Т.В., Парахонский Б.В., Скиртач А.Г. и др. Получение полиэлектролитных микрокапсул с наночастицами серебра и золота в оболочке и дистанционное разрушение таких капсул воздействием лазерного излучения // *Кристаллография*. 2006. Т.51. №5. С.183—189.
10. Skirtach A.G., Dejugnat C., Braun D. et al. The role of metal nanoparticles in remote release of encapsulated materials // *Nano Lett.* 2005. V.5. P.1371—1377.
11. De Geest B.G., De Koker S., Sukhorukov G.B. et al. Polyelectrolyte microcapsules for biomedical applications // *Soft Matter*. 2009. V.5. P.282—291.
12. Tong W., Song X., Gao C. Layer-by-layer assembly of microcapsules and their biomedical applications // *Chem. Soc. Rev.* 2012. V.41. P.6103—6124.
13. De Koker S., De Geest B.G., Cuvelier C. et al. In vivo cellular uptake, degradation, and biocompatibility of polyelectrolyte microcapsules // *Adv. Funct. Mater.* 2007. V.17. P.3754—3763.
14. Marchenko I., Yashchenok A., Borodina T. et al. Controlled kinetics of enzyme-catalyzed biodegradability of CaCO₃ templated polymeric capsules: influence of the number of LbL layers, conditions of degradation, and disassembly of multicompartments // *J. Controlled Release*. 2012. V.162. P.599—605.
15. Jadbav K.R., Gambhire M.N., Shaikh I.M. et al. Nasal drug delivery system — factors affecting and applications // *Current Drug Therapy*. 2007. V.2. P.27—38.
16. Sukhorukov G.B., Volodkin D.V., Gunther A.M. et al. Porous calcium carbonate microparticles as templates for encapsulation of bioactive compounds // *J. Mater. Chem.* 2004. V.14. P.2073—2081.
17. Букреева Т.В., Марченко И.В., Бородина Т.Н. и др. Частицы карбоната кальция и диоксида титана как основа контейнеров для доставки соединений в мозг // *ДАН*. 2011. Т.440. №2. С.191—194.
18. Аниол В.А., Новицкая Ю., Бородина Т.Н. и др. Оценка противосудорожных эффектов кортексина на модели судорожной активности // *Журнал неврологии и психиатрии им.С.С.Корсакова*. 2011. Вып.12. С.68—73.

Обогащая кристаллы изотопами, повышаем их теплопроводность

А.В.Инюшкин,
кандидат физико-математических наук
НБИКС-Центр

При разработке новых приборов, чтобы обеспечить нужный целевой параметр, часто важна высокая теплопроводность материала. Показатель из справочника, например для кристаллического кремния, — это значение для самой его чистой формы: $1.46 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ при комнатной температуре. Легирование или добавление поверхностных структур (вроде тонких пленок) теплопроводность кристалла только уменьшат. На первый взгляд кажется, что нет никаких шансов увеличить теплопроводность кремния, не меняя других его свойств (электронных, оптических, механических, химических и др.). На самом деле это не совсем так, поскольку теплопроводность веществ определяется не только самими процессами теплового сопротивления, но и привнесенными факторами, которыми мы можем управлять. Один из них — изотопный состав.

Как известно, из 82 стабильных химических элементов 21 моноизотопен, т.е. имеет единственный стабильный изотоп с периодом полураспада более $1\cdot 10^{10}$ лет (Be, F, Na, Al, P, Sc, Mn, Co, As, Y, Nb, Rh, I, Cs, Pr, Tb, Ho, Tm, Au, Bi, Th), а остальные имеют два и более стабильных изотопа. Помимо массы, изотопы одного элемента различаются магнитным и квадрупольным моментами ядер, сечением поглощения и рассеяния нейтронов, спектром ядерных возбуждений и др. Многие твердые тела состоят из *полиизотопных* элементов.

Изотопный состав ряда элементов, из которых «собраны» многие важные для технических приложений материалы, представлен на рис.1. Физические свойства материалов в той или иной степени зависят от композиции изотопов, в первую

очередь, благодаря различию их атомных масс. Правда, массы изотопов одного химического элемента отличаются незначительно — обычно от единиц до примерно десяти процентов, и, как правило, их вариация влияет на физические свойства сравнительно слабо. Но иногда свойства могут меняться существенно и даже кардинально. Оказывается, добавление в исходно моноизотопную решетку кристалла изотопных примесей со случайным распределением по ее узлам создает «изотопический беспорядок», который может сильно ограничить теплопроводность полиизотопного кристалла. При этом относительное изменение средней массы M элемента может быть небольшим или даже нулевым.

Существует несколько механизмов теплопроводности твердых тел, главные из которых — электронный и фоновый (или решеточный). Первый обусловлен движением свободных электронов под действием градиента температуры, а второй связан с тепловыми колебаниями решетки. В диэлектриках и полупроводниках перенос тепла осуществляется фононами; в металлах доминирует электронный теплоперенос, а вклад фононов оказывается почти незаметным (как правило, не больше нескольких процентов). В сплавах и плохо проводящих металлах (полуметаллах) электронная и фоновая теплопроводности сравнимы по величине.

В кристаллах, где элементы представлены смесью изотопов, из-за случайного распределения масс элементов по узлам кристаллической решетки появляется динамическая разупорядоченность — амплитуда и фаза колебаний «примесных» изотопов отличаются от таковых для изотопов, образующих матрицу кристалла. Динамический беспорядок нарушает трансляционную сим-

© Инюшкин А.В., 2013

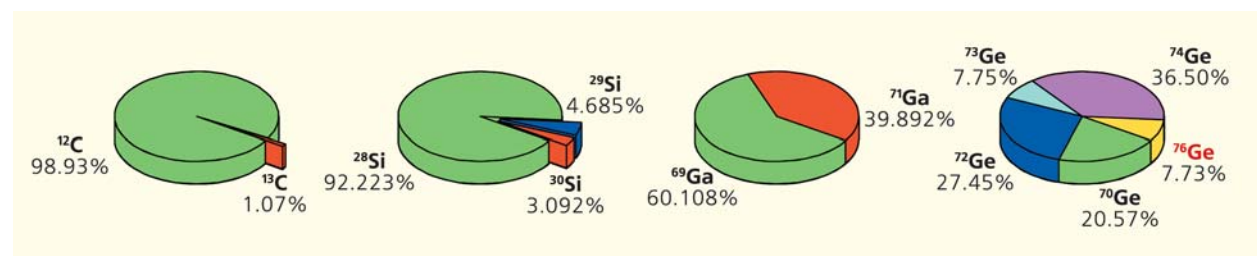


Рис.1. Природная изотопная композиция углерода, кремния, галлия и германия.

метрию решетки, что в конечном итоге приводит к рассеянию фононов на примесных изотопах. Для химически чистых и структурно совершенных неметаллических кристаллов такое «изотопическое» рассеяние может играть значительную роль в теплопроводности при комнатной температуре, а при низких температурах быть даже определяющим, особенно если кристалл «собран» из легких элементов. Этот эффект был предсказан И.Я.Померанчуком в 1942 г. На основе теории возмущений он рассчитал изотопическое рассеяние фононов и нашел, что скорость рассеяния τ_{iso}^{-1} пропорциональна квадрату разности масс и концентрации примесных изотопов. В длинноволновом пределе она описывается формулой «рэлеевского» типа: $\tau_{iso}^{-1} = g_2 V_0 \omega^4 / 4\pi v_s^3$ (V_0 — атомный объем, v_s — скорость звука, ω — частота фононов, а g_2 — параметр изотопического беспорядка [1]). В монокристаллической решетке параметр g_2 определяется выражением $g_2 = \sum c_i (\Delta M_i / M)^2$, где c_i — концентрация i -го изотопа с массой M_i , ΔM_i — отклонение его массы от средней M . В полиатомной решетке формула для g_2 принимает более сложный вид — происходит взвешивание по квадратам масс отдельных элементов [2].

Значения параметра изотопического беспорядка для ряда полупроводников с природным изотопным составом $g_2^{(nat)}$ и с максимально разупорядоченным составом $g_2^{(max)}$ представлены в табл.1. Наиболее разупорядоченные составы, содержащие по 50% «крайних» из списка изотопов данного элемента. Видно, что природная изотопная композиция для углерода сильно отличается от максимально разупорядоченной — параметр g_2 для нее примерно в 20 раз меньше. Но для германия отношение параметров близко к 3, т.е. его природный состав относительно близок к сильно разупорядоченному. Для двухэлементных полупроводников с природной композицией изотопов парциальные вклады элементов в суммарный параметр $g_2^{(nat)}$ могут отличаться кардинально (табл.2): для мышьяка, на-

Таблица 1
Параметр изотопического беспорядка для монокристаллов

Кристалл	C	Si	Ge	Te
$g_2^{(nat)}, 10^{-6}$	73.9	201	587	284
$g_2^{(max)}, 10^{-6}$	1600	1200	1700	1600

Таблица 2
Параметр изотопического беспорядка для бинарных кристаллов и вклады первого $g_2(1)$ и второго $g_2(2)$ элементов

Кристалл	SiC	BN	GaN	GaAs
$g_2^{(nat)}, 10^{-6}$	105.1	263	137.2	45.8
$g_2(1), 10^{-6}$	98.5	257	136.7	45.8
$g_2(2), 10^{-6}$	6.6	6	0.5	0

пример, он вообще равен нулю, поскольку As монокристалл.

Первое экспериментальное подтверждение предсказания Померанчука было получено Т.Джеболом и Дж.Халлом в 1958 г. Они нашли, что теплопроводность обогащенного до 95.8% кристалла германия ^{74}Ge в максимуме (при температуре около 15 К) примерно в 3 раза (!) больше, чем германия природного состава. С тех пор изотопический эффект исследовали (в том числе и в НИЦ КИ) в ряде кристаллов, включая такие важные для приложений материалы, как синтетический алмаз, кремний, германий и арсенид галлия (на рис.2 приведены наши результаты для Ge).

Величина изотопического эффекта (ИЭ), измеряемая как отношение теплопроводностей обогащенного (почти моноизотопного) материала и материала с природной композицией изотопов, увеличивается при понижении температуры. Эффект достигает максимума при температуре T_{max} (где теплопроводность максимальна), причем теплопроводность высококачественных изотопно-обогащенных монокристаллов оказывается на порядок величины (!) выше, чем в природных кристаллах (для Si ИЭ равен 9.9, для Ge — 8).

Отметим, что наши недавние измерения теплопроводности высокообогащенного монокристалла кремния ^{28}Si (99.993%), выращенного в рамках международного проекта «Авогадро», показали рекордно высокую теплопроводность — 451 Вт·см⁻¹·К⁻¹ при $T \sim 24$ К. Для сравнения: кремний с природным изотопным составом имеет максимум теплопроводности 45.5 Вт·см⁻¹·К⁻¹ при 22.3 К, а максимальная измеренная величина теплопроводности изотопно-обогащенного алмаза ^{12}C (99.93%) — 410 Вт·см⁻¹·К⁻¹ при 104 К. Такие эксперименты требуют высокоточных измерений аб-

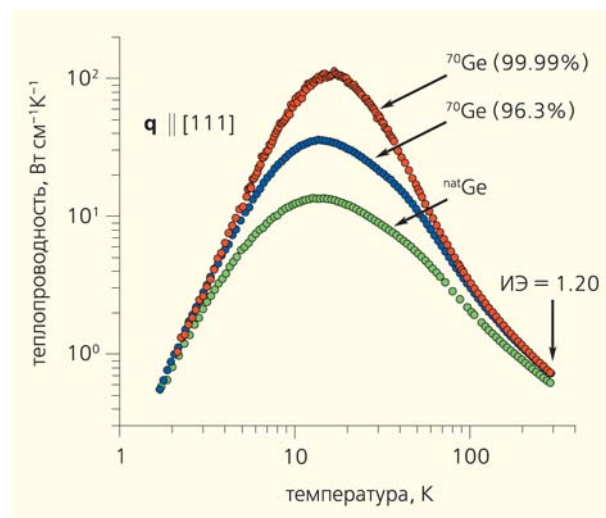


Рис.2. Температурные зависимости теплопроводности монокристаллов германия с разным изотопным составом в двойном логарифмическом масштабе.

солотной величины теплопроводности на относительно небольших образцах в широком диапазоне температур, для чего в НИЦ КИ был создан специальный прибор, использующий метод стационарного продольного теплового потока [3].

Среди исследованных объемных кристаллов самый сильный изотопический эффект при комнатной температуре (около 50%) демонстрирует алмаз. Этот результат был достигнут для монокристаллов алмаза миллиметрового размера, выращенных при высоком давлении и высокой температуре (метод НРНТ) в Исследовательской лаборатории фирмы Джeneral Электрик в самом начале 1990-х. Альтернативным методом синтеза — плазмохимическим осаждением алмаза из газовой фазы (CVD) — получают поликристаллические пластины диаметром до 150 мм и толщиной до 3 мм, а также монокристаллы сантиметровых размеров. CVD-метод интенсивно совершенствуют в последнее десятилетие; в 2007 г. в НИЦ КИ (совместно с Институтом общей физики РАН) так вырастили пластину изотопно-обогащенного поликристаллического алмаза диаметром 57 мм и толщиной 0.36 мм из метана, содержавшего 99.96% изотопа ^{12}C . При комнатной температуре образец имел теплопроводность $25 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, что на 32% выше, чем у поликристалла с природной композицией изотопов углерода ($19 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), а в максимуме при 170 К эффект составил 70%.

Обратим внимание на замечательный экспериментальный результат — теплопроводность изотопно-обогащенного *поликристалла* при комнатной температуре оказалась выше, чем теплопроводность самых совершенных *монокристаллических* алмазов с природным изотопным составом ($22\text{--}24 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$). И это при том, что в нашем поликристалле относительно много дефектов решетки (видимо, из-за несовершенства методики синтеза), которые значительно ограничивают его теплопроводность. Анализ показывает: если снизить их концентрацию, величина ИЭ может возрасти до 37%.

Для многих практически важных материалов экспериментальные исследования изотопического эффекта в теплопроводности пока не проведены. Однако есть теоретические оценки величины эффекта при комнатной температуре, основанные на расчетах теплопроводности кристаллов из первых принципов (табл.3) [4].

Литература

1. *Klemens P.G.* The scattering of low-frequency lattice waves by static imperfections // Proc. Phys. Soc. London Ser. A. 1955. V.68. №12. P.1113—1128.
2. *Tamura S.* Isotope scattering of large-wave-vector phonons in GaAs and InSb: Deformation-dipole and overlap-shell models // Phys. Rev. B. 1984. V.30. №2. P.849—854.
3. *Inyushkin A. V., Taldenkov A. N., Yakubovsky A. Yu., et al.* Thermal conductivity of isotopically enriched 71GaAs crystal // Semicond. Sci. Technol. 2003. V.18. №7. P.685—688.
4. *Lindsay L., Broido D. A., Reinecke T. L.* Phonon-isotope scattering and thermal conductivity in materials with a large isotope effect: A first-principles study // Phys. Rev. B. 2013. V.88. №14. P.144306.

Таблица 3

Рассчитанные значения теплопроводности ($\text{Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$) моноизотопного и природного кристаллов и величина изотопического эффекта при комнатной температуре [4]

Кристалл	κ_{pure}	κ_{nat}	ИЭ
BeO	4.33	4.22	1.03
BeS	1.95	1.76	1.11
BeSe	6.33	1.15	5.50
BeTe	3.71	1.02	3.64
GeC	15.17	2.77	5.48
c-SiC	5.72	4.79	1.20
c-BN	21.46	9.42	2.28
BSb	11.83	4.67	2.53
w-GaN	4.01	2.42	1.66

Огромный изотопический эффект (~450%), превышающий рассчитанные или измеренные значения для любых других материалов, ожидается для кристаллов GeC и BeSe. В случае популярных сегодня кристаллов GaN и SiC теория дает значения эффекта 66% и 20% соответственно. Эти величины достаточно велики, чтобы использование изотопно-обогащенных галлия и кремния для синтеза таких кристаллов было экономически оправданным. Привлекателен своим ИЭ и кристаллический графит, поэтому эти материалы следует исследовать экспериментально с целью достоверного определения величины эффекта.

Итак, моноизотопные кристаллы имеют при комнатной температуре теплопроводность на десятки процентов выше, чем кристаллы с природной изотопной композицией, а при низких температурах выигрыш достигает 1000%. Важно, что при изотопной модификации полупроводников их электронные и химические свойства почти не меняются — это позволяет включать их в существующие технологические процессы. Повышенная теплопроводность особенно нужна в приборах, где происходит большое локальное тепловыделение (в процессорах, полупроводниковых лазерах, мощных оптических и микроволновых устройствах). Ограничение для использования моноизотопных материалов — их высокая стоимость. Однако в случае большого изотопического эффекта (выше ~15%) рост цены материала может оказаться вполне адекватным улучшению рабочих параметров приборов, изготовленных на его основе. ■

Научные сообщения

Casus цинка и серы в болезни Паркинсона

Г.С. Качалова,
кандидат физико-математических наук
Институт биохимии им.А.Н.Баха РАН
Н.Н.Новикова,
доктор физико-математических наук
М.В.Крюкова
НБИКС-Центр

Хроническое нейродегенеративное заболевание, известное как болезнь Паркинсона (БП), по мере старения населения становится все большей проблемой — им страдают 5–10% людей в возрасте 60–80 лет. Своим названием она обязана Джеймсу Паркинсону, который впервые описал ее в книге «Эссе о дрожательном параличе» (1817). Болезнь представляет собой синдром прогрессирующего поражения центральной нервной системы из-за разрушения и гибели нейронов и проявляется в снижении общей двигательной активности, замедленности движений, повышении мышечного тонуса, треморе, а также нарушении походки и позы.

Гистопатологические исследования головного мозга больных привели к открытию: при этом заболевании в черной субстанции среднего мозга происходит гибель или потеря функциональности допаминэргических нейронов, управляющих двигательной активностью. Кроме того, в цитоплазме клеток ствола мозга формируются специфические клеточные включения (известные как тельца Леви), содержащие поврежденные, «неправильно» свернутые белки (в основном альфа-синуклеин) в агрегированной форме, — они и становятся смертельно опасными для клеток.

Согласно современным биохимическим концепциям, образование агрегатов поврежденных белков как правило происходит при нарушении работы клеточной убиквитин-протеасомной системы. В норме такие белки убиквитинилируются, т.е. ковалентно связываются с небольшим белком убиквитином в результате каскада реакций с участием ферментов E1, E2, E3. Убиквитин служит сигналом для транспортировки белка к протеасоме, где и происходит его «утилизация» путем протеолиза с образованием аминокислот и низкомолекулярных пептидов, которые клетка использует для синтеза нового белка.

Изучение молекулярных механизмов патогенеза БП началось после открытия гена PARK2, одного

из шести генов, приводящих к наследственной форме паркинсонизма [1]. Мутации гена PARK2 определяют более 50% известных наследственных форм БП и 15% спорадических форм с началом развития болезни в раннем возрасте [2]. Белок, кодируемый геном PARK2, назвали «паркин», чтобы подчеркнуть его ключевую роль в нейродегенеративных нарушениях. Паркин содержит четыре так называемых RING-домена, в тетраэдрических комплексах которых атомы цинка координируются атомами серы аминокислотных остатков цистеина или атомом азота гистидина. Установлено, что паркин функционирует как E3-убиквитин лигаза, т.е. как компонент убиквитин-протеасомной системы, отвечающей в клетках за «переработку» поврежденных белков. Наследственные мутации цистеинов в RING-доменах паркина приводят к потере E3-лигазной активности белка. По-видимому, «сбои» в работе белка связаны с дестабилизацией Zn-комплексов. На это указывают результаты экспериментов *in vitro*, в которых была обнаружена агрегация рекомбинантных белков при введении мутации цистеинов в RING-доменах. А как связаны между собой нарушение строения Zn-комплексов паркина и самоассоциация молекул, насколько значимы для этих процессов мутации белка? Чтобы ответить на этот вопрос, мы определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа количество цинка в белке паркин при образовании агрегированных комплексов.

Рентгенофлуоресцентный анализ сегодня — один из самых распространенных спектроскопических методов изучения элементного состава вещества. Пожалуй, главная проблема его применения в медико-биологических исследованиях связана с тем, что определять нужно «ничтожное в малом» — содержание следовых элементов в биоорганических микрообразцах. И здесь на помощь приходит метод рентгенофлуоресцентного анализа в геометрии полного внешнего отражения (TXRF-анализ).

Явление полного внешнего отражения (ПВО) наблюдается в рентгеновском диапазоне длин

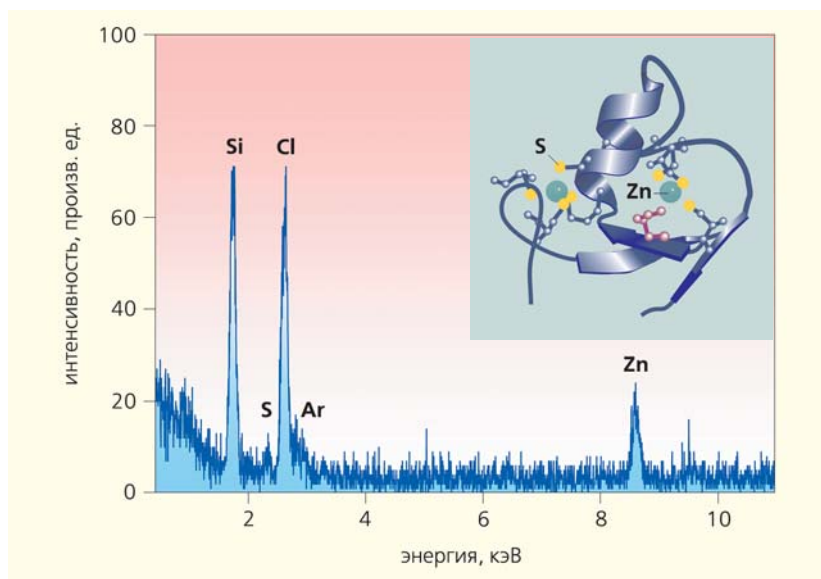
волн благодаря тому, что величина показателя преломления таких лучей меньше единицы для любого вещества. Значит, при падении рентгеновской волны из вакуума (или воздуха) на гладкую поверхность угол, под которым преломленная волна распространяется в веществе, всегда меньше угла падения. Если последний окажется меньше некоторого критического значения θ_c , угол преломления станет равным нулю, т.е. преломленная волна будет распространяться вдоль поверхности, причем ее интенсивность будет равна интенсивности падающей.

Идею использовать явление ПВО для анализа элементного состава вещества высказали в 1971 г. японские ученые И.Ионедэ и Т.Хориучи. TXRF-анализ проводится так: раствор пробы наносят в виде тонкого слоя (толщиной не более 100 мкм) на гладкие плоские подложки, а характеристические спектры флуоресцентного излучения от образца регистрируют при фиксированном угле падения, меньшем критического угла ПВО для подложки. Так удается значительно снизить фоновое излучение от подложки, поскольку в условиях ПВО первичное излучение в нее практически не проникает. Это позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум и заметно уменьшить пределы обнаружения химических элементов в образце, вплоть до концентраций мкг/л.

Мы исследовали рекомбинантные белки полноразмерного паркина, содержащего все 4 RING-домена, а также его сплайс-варианта, включающего только 2 RING-домена. Белок был получен генно-инженерными методами с использованием клеток *Escherichia coli* и очищен с помощью аффинной хроматографии. Секвенирование соответствующих геномных последовательностей установило полное отсутствие привнесенных мутаций выделенных белков. Эффективный молекулярный вес фракций белка определяли методом гель-фильтрации. Оказалось, что во всех фракциях, содержащих полноразмерный паркин, и практически во всех фракциях, содержащих его сплайс-вариант, «молекулярный вес» значительно превышал ожидаемое значение, что свидетельствует о самоассоциации белка.

Литература

1. Kitada T., Asakawa S., Hattori N. et al. Mutations in the parkin gene cause autosomal recessive juvenile parkinsonism // Nature. 1998. V.392. P.605—608.
2. Lücking C.B., Durr A., Bonifati V. et al. Association between early-onset Parkinson's disease and mutations in the parkin gene // N. Engl. J. Med. 2000. V. 342. P.1560—1567.



Типичный характеристический спектр флуоресцентного излучения от раствора белка паркина. На вставке — пространственная структура RING-домена белка.

Количество ионов цинка, связанных с белком, определяли на лабораторном рентгеновском спектрометре PICOFOX S2 (Bruker). Помимо самого интенсивного пика от кремния из подложки, на спектре (см. рис.) хорошо различимы пики от ионов, присутствующих в самом белке, — это прежде всего цинк, который находится в RING-доменах паркина. Кроме того, четко виден пик от серы, входящей в состав аминокислотных остатков белковых молекул. На спектре также присутствует довольно интенсивный пик от хлора из буферного раствора, содержащего NaCl.

Анализ данных показал, что во фракциях, соответствующих агрегированному состоянию белковых молекул, количество связанных с белком ионов цинка меньше, чем теоретически расчетное значение для нативного белка. Можно предположить, что уменьшение содержания ионов цинка происходит в результате разрушения нативных лигандных комплексов RING-доменов паркина с образованием межмолекулярных S—S связей цистеиновыми лигандами. В свою очередь, образование межмолекулярных дисульфидных мостиков приводит к самоассоциации молекул паркина. Полученные результаты свидетельствуют, что механизмы нарушения лигазной активности этого белка могут быть связаны не только с наследственными генными мутациями, но и с окислительно-восстановительными процессами в нейронах. ■

Тематический указатель за 2013 год

ФИЛОСОФИЯ И ИСТОРИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ НАУКИ

Десять лет из жизни Огюстена Френеля.		
Щербаков Р.Н.	5	61
Карл Клаус: он предавался любви к химии и ботанике. Саксонов С.В., Сенатор С.А.	4	78
Катавасия каталогов катастроф. Никонов А.А.	4	3
Конгресс Федерации европейских биохимических обществ 2013 «Биологические механизмы».		
Интервью с А.Г.Габиевым	9	83
ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2012 ГОДА	1	74
По физике — С.Арош и Д.Вайнленд.		
Бялко А.В., Медведев Э.С.	1	74
По химии — Р.Лэфковиц и Б.Кобилка.		
Колесников С.С.	1	78
По физиологии или медицине — Д.Б.Гёрдон, С.Яманака.		
Шутова М.В., Киселев С.Л.	1	82
Нобелевские премии, которые не получил Понтекорво. Герштейн С.С.	11	76
Новые штрихи к портрету В.И.Вернадского.		
По страницам неопубликованных писем В.И.Вернадского и П.П.Пилипенко. Кузнецов Г.В.	10	68
Переводчики — коллеги И.П.Павлова.		
Космачевская Э.А., Громова Л.И.	1	59
Причудливые ходы гиппогрифа.		
К 125-летию Ерванда Когбетлянца. Блох Ю.И.	7	74
С.Н.Виноградский — патриарх Бри-Конт-Робер.		
Из истории становления экологической микробиологии. Колотилова Н.Н.	8	76
Физика Флерова = трансурановые элементы + тяжелые ионы.		
К 100-летию со дня рождения Г.Н.Флерова.		
Карнаухов В.А.	4	73
«ЦАРСТВО МОИХ ИДЕЙ ВПЕРЕДИ»		
К 150-летию со дня рождения В.И.Вернадского	3	33
Идея «вечности» жизни и принцип постоянства биосферы. Ярошевский А.А.	3	34
От эмпирического факта к научному объяснению. Наумов Г.Б.	3	38
Взаимодействие геосфер — основа жизни нашей планеты. Мирлин Е.Г., Миронов Ю.В.	3	43
Великие современники: В.И.Вернадский и И.П.Павлов Космачевская Э.А., Громова Л.И.	3	50
Линии судьбы: однокурсники Владимир Вернадский и Петр Столыпин.		
Сорокина М.Ю.	3	56
«Найти ненужным и меня...». Об одном конспиративном письме В.И.Вернадского.		
Лавров В.В.	3	63
Во главе КЕПС. Чесноков В.С.	3	70

«ЭВОЛЮЦИОНИСТ, ГЕНЕТИК, ХУДОЖНИК И ОТЧАЯННЫЙ ПРАВОЗАЩИТНИК»		
К 100-летию со дня рождения Р.Л.Берг	5	70
Преданная генетике. Киселев С.Л.	5	71
Геометрия живого и прогресс.		
Этюды о совершенстве. Берг Р.Л.	5	72
Мы прозрели рядом с ней. Горбунова В.Н.	5	79
Фантастические — и человек, и судьба. Фет В.Я.	5	83
Японское (Восточное) море — акватория противоречий. Глушков В.В.	9	68

АСТРОНОМИЯ. АСТРОФИЗИКА. КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Видел ли Ломоносов атмосферу Венеры?		
Нестеренко А.Р.	4	11
Космическая миссия «ПЛАНК»: предварительные результаты. Сажин М.В., Сажина О.С.	9	3

ПЛАНЕТОЛОГИЯ. МЕТЕОРИТИКА. ФИЗИКА И ХИМИЯ АТМОСФЕРЫ. КОСМОХИМИЯ

Взаимодействие климата и экосистем: исследования на стыке наук. Елисеев А.В.	9	10
Глобальное потепление и аномальная погода начала XXI века. Семенов В.А.	10	31
Красная планета в 3D: гипсометрический глобус Марса. Бреховских Ю.А., Родионова Ж.Ф.	6	12
Суета вокруг сажи. Кароль И.Л., Киселев А.А.	6	3

МАТЕМАТИКА. ИНФОРМАТИКА

Как твердое ядро Земли сутки изменяет.		
Денисов Г.Г., Новиков В.В., Федоров А.Е.	5	3
Землетрясения не возмущают вращение Земли.		
А метеориты? Бялко А.В.	5	10
Порядок в хаосе океанских течений.		
Пранц С.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю.	3	3

ФИЗИКА. ТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

К 70-летию Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»		
От атомного проекта к «конвергенции» ¹ .		
Ковальчук М.В.	12	3
Долгий путь к гибриду.		
Азизов Э.А., Велихов Е.П.	12	8
Перспективы ядерной энергетики.		
Штромбах Я.И., Гагаринский А.Ю.	12	17

¹ Авторская сокращенная версия доклада на торжественном заседании, посвященном 70-летию НИЦ «Курчатовский институт».

КИСИ вчера, сегодня, завтра. Ковальчук М.В., Квардаков В.В., Корчуганов В.Н.	12	25
Экспериментальные станции КИСИ.		
Зубавичус Я.В., Мухамеджанов Э.Х., Сенин Р.А.	12	37
Физика нейтрино: промежуточные итоги.		
Скорохватов М.Д.	12	45
Тонкопленочные солнечные элементы в прошлом и будущем. Кашкаров П.К., Казанский А.Г., Форш П.А., Емельянов А.В.	12	56
Биотопливные элементы. Василов Р.Г., Решетилов А.Н., Шестаков А.И.	12	65
Таргетная терапия рака. Северин С.Е., Москалева Е.Ю., Посыпанова Г.А.	12	71
Нанокapsулы из полимеров. Букреева Т.В., Фейгин Л.А.	12	78
Обогащая кристаллы изотопами, повышаем их теплопроводность. Инюшкин А.В.	12	85
<i>Casus</i> цинка и серы в болезни Паркинсона. Качалова Г.С., Новикова Н.Н., Крюкова М.В.	12	88
Взаимодействие наносистем на расстоянии. Волокитин А.И.	10	13
Еще раз об информационной природе «парадокса Гиббса». Ярошевский А.А.	7	48
Из прошлого в будущее. Герштейн С.С.	1	3
К открытию бозона Хиггса. Высоцкий М.И.	1	4
Как твердое ядро Земли сутки изменяет. Денисов Г.Г., Новиков В.В., Федоров А.Е.	5	3
Землетрясения не возмущают вращение Земли. А метеориты? Бялко А.В.	5	10
НОВЫЕ ГРАНИ КРИСТАЛЛОГРАФИИ		
К 70-летию Института кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН. Ковальчук М.В.	11	3
Неювелирное призвание сапфира. Буташинов А.В., Муслимов А.Э., Каневский В.М., Федоров В.А.	11	4
Суперпротоны — кристаллы с изменяющимися связями. Гребенев В.В., Макарова И.П.	11	10
Почему вращаются молекулярные моторы. Пикин С.А.	11	19
Малоугловое рассеяние, нано, грипп, etc... Штыкова Э.В.	11	28
О трековых мембранах. Березкин В.В., Васильев А.Б., Виленский А.И., Мчедлишвили Б.В.	11	37
Рентгеновские методы — нанотехнологиям. Ковальчук М.В., Новикова Н.Н., Якунин С.Н.	11	45
Фермионный конденсат — норма аномалии. Амусья М.Я., Попов К.Г., Шагинян В.Р.	7	3
Фотографирует электрический разряд: древесный водопровод. Иванов-Омский В.И., Иванова Е.И.	3	14
Фотокристаллография. Асланов Л.А.	1	35

ХИМИЯ

Макромолекулярный дизайн. Черникова Е.В.	8	3
Фотокристаллография. Асланов Л.А.	1	35

БИОЛОГИЯ

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

К 75-летию Беломорской биологической станции им.Н.А.Перцова

Здесь становятся биологами. Цетлин А.Б., Гаврилов В.М.	2	3
Рождение Беломорской биологической станции. Шноль С.Э.	2	10
В далеком 1946 г. Пастернак Р.К.	2	18
И были с нами ангелы морские... Сахаров Д.А.	2	21
Морфогенез беспозвоночных. Белоусов Л.В.	2	30
Беломорские просторы для сравнительной физиологии. Балезина О.П.	2	34
Кисло-сладкие озера, полные чудес. Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н.	2	39
О саккоглоссусе, зоологах и перевернутых хордовых. Ежова О.В., Малахов В.В.	2	49
Зоологическое открытие: паразит полихеты оказался карликовым самцом. Ворцешнева Е.В., Цетлин А.Б.	2	57
О бесполом размножении беломорской полихеты. Колбасова Г.Д.	2	61
Строители на дне моря. Неретин Н.Ю.	2	65
Сердечные тайны камптозой. Борисанова А.О.	2	70
ДНК-штрихкодирование организмов. Неретина Т.В., Мюге Н.С.	2	73
Наблюдения над гидроидными медузами. Прудковский А.А.	2	76
Стрекающие — миниатюрные обитатели толщи грунта. Пятаева С.В.	2	80
Моллюск-долгожитель. Исаченко А.И., Мокневский В.О.	2	84
Реагрегация клеток у губок. Лавров А.И., Косевич И.А.	2	87
Морские травы: взгляд из космоса. Макаров А.В., Спиридонов В.А.	2	91
Зоостера выходит из кризиса. Любезнова Н.В.	2	95
Жизнь беломорского припая. Романенко Ф.А., Репкина Т.Ю., Ефимова Л.Е., Булочникова А.С.	2	97
Биота льдов в Кандакшском заливе. Ильяш Л.В., Житина Л.С., Колосова Е.Г., Белевич Т.А.	2	102
Диатомовые водоросли-обрастатели. Георгиев А.А.	2	106
Метеорология на морозе. Константинов П.И.	2	110
Живые камни. Репкина Т.Ю., Шевченко Н.В., Косевич Н.И.	2	113
Фундаментальный итог (рецензия на кн.: Каталог биоты Беломорской биологической станции МГУ). Краснова Е.Д.	2	117
Фотосъемка — наука или искусство? Семенов А.А.	2	120
Кто живет в Белом море? (рецензия на кн.: Флора и фауна Белого моря). Будаева Н.Е.	2	124
Секрет процветания. Калякин М.В.	2	127
Гималайский медведь: воспитание медвежат-сирот. Колчин С.А.	8	44
Долина Москвы-реки и почвы столицы. Прокофьева Т.В., Варава О.А.	6	33

Монгольский Алтай глазами энтомологов.					
Яковлев Р.В., Гуськова Е.В.	5	21			
НА БЕЛОМОРСКИХ БИОСТАНЦИЯХ	4	42			
К 75-летию ББС МГУ. Хлебович В.В.	4	42			
«Волны жизни» беломорской колюшки.					
Лайус Д.Л., Иванова Т.С., Шатских Е.В., Иванов М.В.	4	43			
Симбиоз водорослей и грибов.					
Коновалова О.П., Бубнова Е.Н.	4	53			
Новый завоеватель мира из Азии. Захаров И.А.	7	66			
О поведении склерактиний. Келлер Н.Б.	4	27			
О чем поет большая конюга? Клёнова А.В., Зубакин В.А.	7	12			
Формирование фаун птиц Палеарктики. Колбин В.А.	4	37			
Фотографирует электрический разряд: древесный водопровод. Иванов-Омский В.И., Иванова Е.И.	3	14			
БОТАНИКА. ЗООЛОГИЯ. МИКРОБИОЛОГИЯ					
Заметки о скорпионах и скорпиологах. Фет В.Я.	10	52			
Косатки — рыболовы и охотники. Филатова О.А., Ивкович Т.В., Шпак О.В., Борисова Е.А., Федутин И.Д.	5	28			
ПЛАНЕТА БАКТЕРИЙ					
К 80-летию со дня рождения академика Г.А.Заварзина	9	33			
Новые термофильные прокариоты.					
Бонч-Осмоловская Е.А.	9	34			
Ацидобактерии — неизвестные доминанты наземных экосистем. Дедыш С.Н., Серкебаева Ю.М.	9	42			
Гумус в ранних наземных экосистемах.					
Заварзина А.Г., Заварзин А.А.	9	49			
Железоредукторы содовых озер — реликты «железного века»? Заварзина Д.Г.	9	59			
Подледное скопление сайки в районе Северного полюса. Мельников И.А., Чернова Н.В.	1	49			
ГЕНЕТИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ. БИОХИМИЯ. БИОФИЗИКА. БИОТЕХНОЛОГИЯ					
Волны в сердце: моделирование сердечного ритма. Алиев Р.Р.	5	13			
Испанский олень и испанский певец. Володин И.А., Володина Е.В., Авилес Э., Фрай Р., Ландеге-Кастильехос Т.	4	20			
По стопам Гутенберга: трехмерная биопечать органов. Миронов В.А.	10	3			
Физическая водобоязнь. Чугунов А.О., Полянский А.А., Ефремов Р.Г.	1	24			
ФИЗИОЛОГИЯ. ПСИХОЛОГИЯ. МЕДИЦИНА. ДЕМОГРАФИЯ. СОЦИОЛОГИЯ					
Волны в сердце: моделирование сердечного ритма. Алиев Р.Р.	5	13			
ЭКОЛОГИЯ. ОХРАНА ПРИРОДЫ. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ					
Восточнокавказский тур — краса и гордость заповедника. Газаев М.А., Тогузаева Л.А., Атабиева Ф.А.	8	56			
Гималайский медведь: воспитание медвежат-сирот. Колчин С.А.	8	44			
Долина Москвы-реки и почвы столицы. Прокофьева Т.В., Варава О.А.	6	33			
Жемчужина Нижнего Приамурья. Шлотгауэр С.Д., Пронкевич В.В., Кондратьева Е.В.	7	42			
Жизнь северной пустыни. Корсун О.В.	11	66			
Заповедное высокогорье. Газаев М.А., Атабиева Ф.А., Тогузаева Л.А.	4	57			
Затерянный мир «Лианхуашаня». Шефтель Б.И., Махров А.А., Бобров В.В., Артамонова В.С., Александров Д.Ю., Коблик Е.А., Банникова А.А.	7	56			
Кризис, из которого нет и не будет выхода. Гиляров А.М.	8	38			
Новый завоеватель мира из Азии. Захаров И.А.	7	66			
Самые живописные места планеты. Князев Ю.П.	7	24			
Сердце Кулунды. Андреева И.В., Силантьева М.М.	5	47			
ГЕОЛОГИЯ. ГЕОТЕКТОНИКА					
Гигантские карстовые провалы в Нижегородской области. Давыдько Р.Б., Махнатов С.А., Уткин М.М., Зотов Р.В.	5	59			
Жизнь соленосных недр Мертвого моря и его аналогов. Беленицкая Г.А.	10	42			
Природные соляно-нафтидные узлы. Беленицкая Г.А.	1	11			
Происхождение солей, диапиров и рассолов Мертвого моря. Беленицкая Г.А.	8	28			
Роль подземных вод при наводнениях и селях. Трифонов Т.А.	8	13			
Секреты золотого гиганта. Портнов А.М.	9	27			
Секреты мыльного камня. Комаров В.Н., Багатаев С.Г.	7	70			
Соленосное чудо планеты. Беленицкая Г.А.	6	21			
ГЕОХИМИЯ. МИНЕРАЛОГИЯ. КРИСТАЛЛОХИМИЯ					
Еще раз об информационной природе «парадокса Гиббса». Ярошевский А.А.	7	48			
Пейзажный камень. Гафуров Ш.З., Дусманов Е.Н.	5	55			
Хан Уран и страна Уранофания. Минералогическая сказка. Расцветаева Р.К.	4	64			
ГЕОФИЗИКА					
Спектр возмущений земных суток. Бялко А.В.	8	63			
СЕЙСМОЛОГИЯ. ВУЛКАНОЛОГИЯ					
Вулкан Толбачик: гавайские извержения на Камчатке. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.	10	59			
«Песнь о Гайавате» в оркестровке сейсмолога. Никонов А.А.	11	53			
Сильное извержение вулкана Пик Сарычева. Гришин С.Ю.	6	54			
ГЕОГРАФИЯ. КЛИМАТОЛОГИЯ. МЕТЕОРОЛОГИЯ. ГЛЯЦИОЛОГИЯ					
Арктические ледники и глобальное потепление. Корякин В.С.	7	35			
В Азовском море и зимой кипит жизнь. Матишов Г.Г., Степаньян О.В.	3	20			
Восточнокавказский тур — краса и гордость заповедника. Газаев М.А., Тогузаева Л.А., Атабиева Ф.А.	8	56			

Заповедное высокогорье. Газаев М.А., Атабиева Ф.А., Тогузаева Л.А.	4	57	Вулкан Толбачик: гавайские извержения на Камчатке. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.	10	59
Когда снегопад становится опасным. Гаврилова С.А.	8	20	Глубоководные обитаемые аппараты «Мир» на Байкале. Сагалевич А.М.	5	38
Ледники Новой Земли в XX веке и глобальное потепление. Корякин В.С.	1	42	Жизнь северной пустыни. Корсун О.В.	11	66
Монгольский Алтай глазами энтомологов. Яковлев Р.В., Гуськова Е.В.	5	21	Затерянный мир «Лианхуашаня». Шефтель Б.И., Махров А.А., Бобров В.В., Артамонова В.С., Александров Д.Ю., Коблик Е.А., Банникова А.А.	7	56
Необычные структуры на поверхности льда Каспийского моря. Сазонов К.Е.	8	72	Необычные структуры на поверхности льда Каспийского моря. Сазонов К.Е.	8	72
Спектры возмущений климатической системы. Бялко А.В.	9	17	Сильное извержение вулкана Пик Сарычева. Гришин С.Ю.	6	54
Страна голубых лабиринтов. Михайлов В.М.	10	20	ВСТРЕЧИ С ЗАБЫТЫМ		
Формирование фаун птиц Палеарктики. Колбин В.А.	4	37	Из жизни зоологической лаборатории. Фандо Р.А.	10	85
Чарынские каньоны. Горбунов А.П., Горбунова И.А.	9	77	Из истории ранней оптической астрономии. Кузьмин А.В.	1	92
Японское (Восточное) море — акватория противоречий. Глушков В.В.	9	68	Княгиня Голицына. Валькова О.А.	8	92
ОКЕАНОЛОГИЯ			«От биологии к биотехнии»: траектория одной научной биографии. Белозеров О.П.	6	72
Глубоководные обитаемые аппараты «Мир» на Байкале. Сагалевич А.М.	5	38	Последний конкистадор Британии. Белов С.В.	5	90
Глубоководный обитаемый аппарат «Яолонг». Сагалевич А.М.	9	75	ЗАМЕТКИ И НАБЛЮДЕНИЯ		
О поведении склерактиний. Келлер Н.Б.	4	27	Гигантские карстовые провалы в Нижегородской области. Давыдько Р.Б., Махнатов С.А., Уткин М.М., Зотов Р.В.	5	59
Порядок в хаосе океанских течений. Пранц С.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю.	3	3	Новый завоеватель мира из Азии. Захаров И.А.	7	66
ПАЛЕОНТОЛОГИЯ. ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ. ПАЛЕОКЛИМАТОЛОГИЯ			Пейзажный камень. Гафуров Ш.З., Дусманов Е.Н.	5	55
Ископаемые растения в работах К.К.Флёрова. Наугольных С.В.	6	44	Секреты мыльного камня. Комаров В.Н., Багатаев С.Г.	7	70
Структура ринхолитов — челюстей ископаемых головоногих. Комаров В.Н., Рыбакова А.В., Чеботарева Я.И.	1	54	Чарынские каньоны. Горбунов А.П., Горбунова И.А.	9	77
АРХЕОЛОГИЯ. АНТРОПОЛОГИЯ. ЭТНОГРАФИЯ			НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ		
Природный камень в жизни средневекового человека. Панова Т.Д.	7	51	<i>Casus</i> цинка и серы в болезни Паркинсона. Качалова Г.С., Новикова Н.Н., Крюкова М.В.	12	88
Ранние этапы становления земледелия и скотоводства. Гилярова О.А., Гиляров А.М.	11	61	Глубоководный обитаемый аппарат «Яолонг». Сагалевич А.М.	9	75
Сапоги поморов Зимнего берега Белого моря. Осипов Д.О.	8	68	Обогащая кристаллы изотопами, повышаем их теплопроводность. Инюшкин А.В.	12	85
АПРЕЛЬСКИЙ ФАКУЛЬТАТИВ			Структура ринхолитов — челюстей ископаемых головоногих. Комаров В.Н., Рыбакова А.В., Чеботарева Я.И.	1	54
Слоны перелетные ²	4	62	НЕКРОЛОГ		
Хан Уран и страна Уранофания. Минералогическая сказка. Расцветаева Р.К.	4	64	Редет ближний круг..		
В КОНЦЕ НОМЕРА			Памяти Астона Антоновича Комара	7	90
Библиографическая редкость — журнал «Тьетта». Раменская М.Е.	4	92	Эколог, педагог, популяризатор. Памяти А.М.Гилярова	11	64
К Полюсу относительной недоступности. Мельников И.А.	7	92	НОВЫЕ КНИГИ		
Камнерезное искусство в Китае. Уфимцев Г.Ф.	9	93	1 90; 3 74; 4 91; 5 88; 6 70; 7 92; 8 88; 9 90; 11 88		
Предваряя выход книги. Мочалов И.И.	3	77	РЕДАКЦИОННАЯ ПОЧТА		
ВЕСТИ ИЗ ЭКСПЕДИЦИЙ			Вернуть науке былой авторитет. Мелихов А.М.	10	77
В Азовском море и зимой кипит жизнь. Матишов Г.Г., Степаньян О.В.	3	20	Как управлять наукой? Расницын А.П.	11	92
			Не ведают, что творят. Шноль С.Э.	11	94
			РЕЗОНАНС		
			Наука и шарлатаны. Шарлатанство ради денег. Ливанов К.Д.	1	67

² Подготовил и проиллюстрировал Г.М.Виноградов.

Наука и шарлатаны. Шарлатанство ради идеи.

Ливанов К.Д.

3 24

РЕКЛАМА, ОБЪЯВЛЕНИЯ

РЕЦЕНЗИИ

Интересная книга о российском арктическом мореплавании (на кн.: Марченко Н. Моря Российской Арктики. Условия навигации и происшествя).

Корякин В.С.

6 67

Историография российской научной эмиграции (на кн.: Ульянкина Т.И. «Дикая историческая полоса...»: судьбы российской научной эмиграции в Европе (1940–1950)). **Фандо Р.А.**

11 86

Книга, написанная с любовью (на кн.: Карцев В.М., Фарафонова Г.В., Ахатов А.К. и др. Насекомые европейской части России). **Михайлов К.Г.**

8 85

Кто живет в Белом море?

8 91

(на кн.: Флора и фауна Белого моря). **Будаева Н.Е.**

2 124

Планеты далекие и близкие (на кн.: Сурдин В.Г.

Разведка далеких планет). **Вибе Д.З.**

1 87

Семья и геоботаника (на кн.:

Семенова-Тян-Шанская А.М. Записки о пережитом).

Гиляров А.М.

7 85

Систематика — народная и научная (на кн.:

Павлинов И.Я., Любарский Г.Ю. Биологическая

систематика: эволюция идей). **Расницын А.П.**

4 86

Фундаментальный итог (на кн.: Каталог биоты Беломорской биологической станции МГУ).

Краснова Е.Д.

2 117

Авторский указатель за 2013 год

Авилес Э. (Володин И.А., Володина Е.В., Фрай Р., Ландете-Кастильехос Т.)* 4 20
Азизов Э.А. (Велихов Е.П.) 12 8
Александров Д.Ю. (Шефтель Б.И., Махров А.А., Бобров В.В., Артамонова В.С., Коблик Е.А., Банникова А.А.) 7 56
Алиев Р.Р. 5 13
Амусья М.Я. (Попов К.Г., Шагинян В.Р.) 7 3
Андреева И.В. (Силантьева М.М.) 5 47
Артамонова В.С. (Шефтель Б.И., Махров А.А., Бобров В.В., Александров Д.Ю., Коблик Е.А., Банникова А.А.) 7 56
Асланов Л.А. 1 35
Атабиева Ф.А. (Газаев М.А., Тогузаева Л.А.) 4 57
8 56
Багатаев С.Г. (Комаров В.Н.) 7 70
Балезина О.П. 2 34
Банникова А.А. (Шефтель Б.И., Махров А.А., Бобров В.В., Артамонова В.С., Александров Д.Ю., Коблик Е.А.) 7 56
Белевич Т.А. (Ильяш Л.В., Житина Л.С., Колосова Е.Г.) 2 102

Беленицкая Г.А. 1 11
6 21
8 28
10 42
Белов С.В. 5 90
Белозеров О.П. 6 72
Белоусов А.Б. (Белоусова М.Г.) 10 59
Белоусов Л.В. 2 30
Белоусова М.Г. (Белоусов А.Б.) 10 59
Берг Р.Л. 5 72
Березкин В.В. (Васильев А.Б., Виленский А.И., Мchedlishvili Б.В.) 11 37
Блох Ю.И. 7 74
Бобров В.В. (Шефтель Б.И., Махров А.А., Артамонова В.С., Александров Д.Ю., Коблик Е.А., Банникова А.А.) 7 56
Бонч-Осмоловская Е.А. 9 34
Борисанова А.О. 2 70
Борисова Е.А. (Филатова О.А., Ивкович Т.В., Шпак О.В., Федутин И.Д.) 5 28
Бреховских Ю.А. (Родионова Ж.Ф.) 6 12
Бубнова Е.Н. (Коновалова О.П.) 4 53
Будаева Н.Е. 2 124
Будянский М.В. (Пранц С.В., Улейский М.Ю.) 3 3
Букреева Т.В. (Фейгин Л.А.) 12 78

Булочникова А.С. (Романенко Ф.А., Репкина Т.Ю., Ефимова Л.Е.) 2 97
Бутахин А.В. (Муслимов А.Э., Каневский В.М., Федоров В.А.) 11 4
Бялко А.В. (Медведев Э.С.) 1 74
Бялко А.В. 5 10
8 63
9 17
Валькова О.А. 8 92
Варава О.А. (Прокофьева Т.В.) 6 33
Василов Р.Г. (Решетилов А.Н., Шестаков А.И.) 12 65
Васильев А.Б. (Березкин В.В., Виленский А.И., Мchedlishvili Б.В.) 11 37
Велихов Е.П. (Азизов Э.А.) 12 8
Вибе Д.З. 1 87
Виленский А.И. (Березкин В.В., Васильев А.Б., Мchedlishvili Б.В.) 11 37
Володин И.А. (Володина Е.В., Авилес Э., Фрай Р., Ландете-Кастильехос Т.) 4 20
Володина Е.В. (Володин И.А., Авилес Э., Фрай Р., Ландете-Кастильехос Т.) 4 20
Волокитин А.И. 10 13
Ворцпеннева Е.В. (Цетлин А.Б.) 2 57
Высоцкий М.И. 1 4
Габибов А.Г. 9 83
Гаврилов В.М. (Цетлин А.Б.) 2 3
Гаврилова С.А. 8 20

* Здесь и далее в скобках указаны соавторы.

Гагаринский А.Ю. (Штрэмбах Я.И.)	12	17	Иношкин А.В.	12	85	Крюкова М.В. (Качалова Г.С., Новикова Н.Н.)	12	88
Газзев М.А. (Атабиева Ф.А., Тогузаева Л.А.)	4	57	Исаченко А.И. (Мокиевский В.О.)	2	84	Кузнецов Г.В.	10	68
Гафуров Ш.З. (Дусманов Е.Н.)	5	55	Казанский А.Г. (Кашкаров П.К., Форш П.А., Емельянов А.В.)	12	56	Кузьмин А.В.	1	92
Георгиев А.А.	2	106	Калякин М.В.	2	127	Лавров А.И. (Косевич И.А.)	2	87
Герштейн С.С.	1	3	Каневский В.М. (Буташинов А.В., Муслимов А.Э., Федоров В.А.)	11	4	Лавров В.В.	3	63
Гиляров А.М. (Гилярова О.А.)	11	61	Карнаухов В.А.	4	73	Лайбус Д.Л. (Иванова Т.С., Шатских Е.В., Иванов М.В.)	4	43
Гиляров А.М.	7	85	Кароль И.Л. (Киселев А.А.)	6	3	Ландете-Кастильехос Т. (Володин И.А., Володина Е.В., Авилес Э., Фрай Р.)	4	20
Гилярова О.А. (Гиляров А.М.)	11	61	Качалова Г.С. (Новикова Н.Н., Крюкова М.В.)	12	88	Ливанов К.Д.	1	67
Глушков В.В.	9	68	Кашкаров П.К. (Казанский А.Г., Форш П.А., Емельянов А.В.)	12	56	Любезнова Н.В.	2	95
Горбунов А.П. (Горбунова И.А.)	9	77	Квардаков В.В. (Ковальчук М.В., Корчуганов В.Н.)	12	25	Макаров А.В. (Спиридонов В.А.)	2	91
Горбунова В.Н.	5	79	Келлер Н.Б.	4	27	Макарова И.П. (Гребенев В.В.)	11	10
Горбунова И.А. (Горбунов А.П.)	9	77	Киселев А.А. (Кароль И.Л.)	6	3	Малахов В.В. (Ежова О.В.)	2	49
Гребенев В.В. (Макарова И.П.)	11	10	Киселев С.Л. (Шутова М.В.)	1	82	Матишов Г.Г. (Степаньян О.В.)	3	20
Гришин С.Ю.	6	54	Киселев С.Л.	5	71	Махнатов С.А. (Давыдько Р.Б., Уткин М.М., Зотов Р.В.)	5	59
Громова Л.И. (Космачевская Э.А.)	1	59	Клёнова А.В. (Зубакин В.А.)	7	12	Махров А.А. (Шефтель Б.И., Бобров В.В., Артамонова В.С., Александров Д.Ю., Коблик Е.А., Банникова А.А.)	7	56
Гуськова Е.В. (Яковлев Р.В.)	5	21	Князев Ю.П.	7	24	Медведев Э.С. (Бялко А.В.)	1	74
Давыдько Р.Б. (Махнатов С.А., Уткин М.М., Зотов Р.В.)	5	59	Коблик Е.А. (Шефтель Б.И., Махров А.А., Бобров В.В., Артамонова В.С., Александров Д.Ю., Банникова А.А.)	7	56	Мелихов А.М.	10	77
Дедыш С.Н. (Серкебаева Ю.М.)	9	42	Ковальчук М.В. (Квардаков В.В., Корчуганов В.Н.)	12	25	Мельников И.А. (Чернова Н.В.)	1	49
Денисов Г.Г. (Новиков В.В., Федоров А.Е.)	5	3	Корчуганов В.Н.	12	25	Мельников И.А.	7	92
Дусманов Е.Н. (Гафуров Ш.З.)	5	55	Ковальчук М.В. (Новикова Н.Н., Якунин С.Н.)	11	45	Мирлин Е.Г. (Миронов Ю.В.)	3	43
Ежова О.В. (Малахов В.В.)	2	49	Ковальчук М.В.	11	3	Миронов В.А.	10	3
Елисеев А.В.	9	10	Колбасова Г.Д.	2	61	Миронов Ю.В. (Мирлин Е.Г.)	3	43
Емельянов А.В. (Кашкаров П.К., Казанский А.Г., Форш П.А.)	12	56	Колбин В.А.	4	37	Михайлов В.М.	10	20
Ефимова Л.Е. (Романенко Ф.А., Репкина Т.Ю., Булочникова А.С.)	2	97	Колесников С.С.	1	78	Михайлов К.Г.	8	85
Ефремов Р.Г. (Чугунов А.О., Полянский А.А.)	1	24	Колосова Е.Г. (Ильяш Л.В., Житина Л.С., Белевич Т.А.)	2	102	Мокиевский В.О. (Исаченко А.И.)	2	84
Житина Л.С. (Ильяш Л.В., Колосова Е.Г., Белевич Т.А.)	2	102	Колотилова Н.Н.	8	76	Москалева Е.Ю. (Северин С.Е., Посыпанова Г.А.)	12	71
Заварзин А.А. (Заварзина А.Г.)	9	49	Колчин С.А.	8	44	Мочалов И.И.	3	77
Заварзина А.Г. (Заварзин А.А.)	9	49	Комаров В.Н. (Багатаев С.Г.)	7	70	Муслимов А.Э. (Буташинов А.В., Каневский В.М., Федоров В.А.)	11	4
Заварзина Д.Г.	9	59	Комаров В.Н. (Рыбакова А.В., Чеботарева Я.И.)	1	54	Мухамеджанов Э.Х.		
Захаров И.А.	7	66	Кондратьева Е.В. (Шлотгауэр С.Д., Пронкевич В.В.)	7	42	(Зубавичус Я.В., Сеннин Р.А.)	12	37
Зотов Р.В. (Давыдько Р.Б., Махнатов С.А., Уткин М.М.)	5	59	Коновалова О.П. (Бубнова Е.Н.)	4	53	Мчедлишвили Б.В. (Березкин В.В., Васильев А.Б., Виленский А.И.)	11	37
Зубавичус Я.В. (Мухамеджанов Э.Х., Сеннин Р.А.)	12	37	Константинов П.И.	2	110	Мюге Н.С. (Неретина Т.В.)	2	73
Зубакин В.А. (Клёнова А.В.)	7	12	Корсун О.В.	11	66	Наугольных С.В.	6	44
Иванов М.В. (Лайбус Д.Л., Иванова Т.С., Шатских Е.В.)	4	43	Корчуганов В.Н. (Ковальчук М.В., Квардаков В.В.)	12	25	Наумов Г.Б.	3	38
Иванова Е.И. (Иванов-Омский В.И.)	3	14	Корякин В.С.	1	42	Неретин Н.Ю.	2	65
Иванова Т.С. (Лайбус Д.Л., Шатских Е.В., Иванов М.В.)	4	43	Косевич И.А. (Лавров А.И.)	2	87	Неретина Т.В. (Мюге Н.С.)	2	73
Иванов-Омский В.И. (Иванова Е.И.)	3	14	Косевич Н.И. (Репкина Т.Ю., Шевченко Н.В.)	2	113	Нестеренко А.Р.	4	11
Ивкович Т.В. (Филатова О.А., Шпак О.В., Борисова Е.А., Федутин И.Д.)	5	28	Космачевская Э.А. (Громова Л.И.)	1	59	Никонов А.А.	4	3
Ильяш Л.В. (Житина Л.С., Колосова Е.Г., Белевич Т.А.)	2	102	Краснова Е.Д. (Пантюлин А.Н.)	2	39	Новиков В.В. (Денисов Г.Г., Федоров А.Е.)	5	3
			Краснова Е.Д.	2	117	Новикова Н.Н. (Ковальчук М.В., Якунин С.Н.)	11	45
						Новикова Н.Н. (Качалова Г.С., Крюкова М.В.)	12	88
						Осипов Д.О.	8	68
						Панова Т.Д.	7	51

Пантюлин А.Н. (Краснова Е.Д.)	2	39	Северин С.Е. (Москалева Е.Ю.,		Фрай Р. (Володин И.А.,	
Пастернак Р.К.	2	18	Посыпанова Г.А.)	12	Володина Е.В., Авилес Э.,	
Пикин С.А.	11	19	Семенов А.А.	2	Ландете-Кастильехос Т.)	4 20
Полянский А.А.			Семенов В.А.	10	Хлебович В.В.	4 42
(Чугунов А.О., Ефремов Р.Г.)	1	24	Сенатор С.А. (Саксонов С.В.)	4	Петлин А.Б. (Ворцепнева Е.В.)	2 57
Попов К.Г.			Сенин Р.А. (Зубавичус Я.В.,		Цетлин А.Б. (Гаврилов В.М.)	2 3
(Амусья М.Я., Шагинян В.Р.)	7	3	Мухамеджанов Э.Х.)	12	Чеботарева Я.И.	
Портнов А.М.	9	27	Серкебаева Ю.М. (Дедыш С.Н.)	9	(Комаров В.Н., Рыбакова А.В.)	1 54
Посыпанова Г.А. (Северин С.Е.,			Силантьева М.М.		Черникова Е.В.	8 3
Москалева Е.Ю.)	12	71	(Андреева И.В.)	5	Чернова Н.В. (Мельников И.А.)	1 49
Пранц С.В. (Будянский М.В.,			Скорохватов М.Д.	12	Чесноков В.С.	3 70
Улейский М.Ю.)	3	3	Сорокина М.Ю.	3	Чугунов А.О. (Полянский А.А.,	
Прокофьева Т.В.			Спиридонов В.А.		Ефремов Р.Г.)	1 24
(Варава О.А.)	6	33	(Макаров А.В.)	2	Шагинян В.Р.	
Пронкевич В.В. (Шлотгауэр С.Д.,			Степаньян О.В. (Матишов Г.Г.)	3	(Амусья М.Я., Попов К.Г.)	7 3
Кондратьева Е.В.)	7	42	Тогузаева Л.А.		Шатских Е.В. (Лайус Д.Л.,	
Прудковский А.А.	2	76	(Газазев М.А., Атабиева Ф.А.)	4	Иванова Т.С., Иванов М.В.)	4 43
Пятаева С.В.	2	80	Трифоновна Т.А.	8	Шевченко Н.В. (Репкина Т.Ю.,	
Раменская М.Е.	4	92	Улейский М.Ю.	8	Косевич Н.И.)	2 113
Расницын А.П.	4	86	(Будянский М.В., Пранц С.В.)	3	Шестаков А.И. (Василов Р.Г.,	
	11	92	Уткин М.М. (Давыдько Р.Б.,	3	Решетиллов А.Н.)	12 65
Расцветаева Р.К.	4	64	Махнатова С.А., Зотов Р.В.)	5	Шефтель Б.И. (Махров А.А.,	
Репкина Т.Ю. (Романенко Ф.А.,			Уфимцев Г.Ф.	9	Бобров В.В., Артамонова В.С.,	
Ефимова Л.Е., Булочникова А.С.)	2	97	Фандо Р.А.	10	Александров Д.Ю., Коблик Е.А.,	
Репкина Т.Ю. (Шевченко Н.В.,				11	Банникова А.А.)	7 56
Косевич Н.И.)	2	113	Федоров А.Е. (Денисов Г.Г.,		Шлотгауэр С.Д. (Пронкевич В.В.,	
Решетиллов А.Н.			Новиков В.В.)	5	Кондратьева Е.В.)	7 42
(Василов Р.Г., Шестаков А.И.)	12	65	Федоров В.А. (Бутахин А.В.,	5	Шноль С.Э.	2 10
Родионова Ж.Ф.			Муслимов А.Э., Каневский В.М.)	11		11 94
(Бреховских Ю.А.)	6	12	Федутин И.Д. (Филатова О.А.,	4	Шпак О.В. (Филатова О.А.,	
Романенко Ф.А. (Репкина Т.Ю.,			Ивкович Т.В., Шпак О.В.,		Ивкович Т.В., Борисова Е.А.,	
Ефимова Л.Е., Булочникова А.С.)	2	97	Борисова Е.А.)	5	Федутин И.Д.)	5 28
Рыбакова А.В. (Комаров В.Н.,			Фейгин Л.А. (Букреева Т.В.)	12	Штромбах Я.И. (Гагаринский А.Ю.)	12 17
Чеботарева Я.И.)	1	54	Фет В.Я.	5	Штыкова Э.В.	11 28
Сагалевич А.М.	5	38		10	Шутова М.В. (Киселев С.Л.)	1 82
	9	75	Филатова О.А. (Ивкович Т.В.,	10	Щербаков Р.Н.	5 61
Сажин М.В. (Сажина О.С.)	9	3	Шпак О.В., Борисова Е.А.,		Яковлев Р.В. (Гуськова Е.В.)	5 21
Сажина О.С. (Сажин М.В.)	9	3	Федутин И.Д.)	5	Якунин С.Н.	
Сазонов К.Е.	8	72	Форш П.А. (Кашкаров П.К.,	5	(Ковальчук М.В., Новикова Н.Н.)	11 45
Саксонов С.В. (Сенатор С.А.)	4	78	Казанский А.Г., Емельянов А.В.)	12	Ярошевский А.А.	3 34
Сахаров Д.А.	2	21		56		7 48

ПРИРОДА

Над номером работали

Ответственный секретарь
Е.А. КУДРЯШОВА

Научные редакторы
О.О. АСТАХОВА
К.Л. СОРОКИНА

Литературный редактор
Е.Е. ЖУКОВА

Художественный редактор
Т.К. ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф. АЛЕКСАНДРОВА

Перевод:
С.В. ЧУДОВ

Корректоры:
М.В. КУТКИНА
Л.М. ФЕДОРОВА

Графика, верстка:
А.В. АЛЕКСАНДРОВА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Российская академия наук,
президиум

Адрес издателя: 117997,
Москва, Профсоюзная, 90

Адрес редакции: 119049,
Москва, Марононский пер., 26
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77
Факс: (499) 238-24-56

E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 18.11.2013
Формат 60×88 1/8
Офсетная печать

Заказ 1853
Набрано и сверстано в редакции

Отпечатано в ППП типографии «Наука»
Академиздатцентра «Наука» РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6