

Diamond Light Source —

Courtesy
of Diamond Light
Source

британский «алмаз» синхротронного излучения

В феврале 2015 г. в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН состоялся российско-британский круглый стол «Новые горизонты ускорительной техники: настоящее и будущее ярких источников синхротронного излучения», организованный Отделом науки и инноваций Посольства Великобритании в России с участием профессоров Р. Уолкера, Э. Харрисона и А. Серого с британской стороны и ведущих сотрудников ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и Курчатовского института РАН (Москва). Традиции подобного сотрудничества идут с начала 1970-х гг., когда английские исследователи, не имевшие в ту пору собственного источника СИ, приезжали в новосибирский Академгородок по обмену. Новосибирские физики, в свою очередь, участвовали в создании крупнейшего в Великобритании синхротронного центра «Diamond Light Source». Руководители этого центра, профессора Эндрю Харрисон и Ричард Уолкер, на встрече с редакторами журнала «НАУКА из первых рук» рассказали о принципах организации работы и основных направлениях деятельности «британского алмаза», а также о широком спектре предоставляемых услуг, которыми – на конкурсной основе – могут воспользоваться исследователи не только из Великобритании, но и других стран мира, в том числе России

Ключевые слова:
рентгеновские
методы
исследования,
источник
синхротронного
излучения, Оксфорд,
Даймонд.
Key words: X-ray
investigation facilities,
synchrotron radiation,
Oxford, Diamond Light
Source

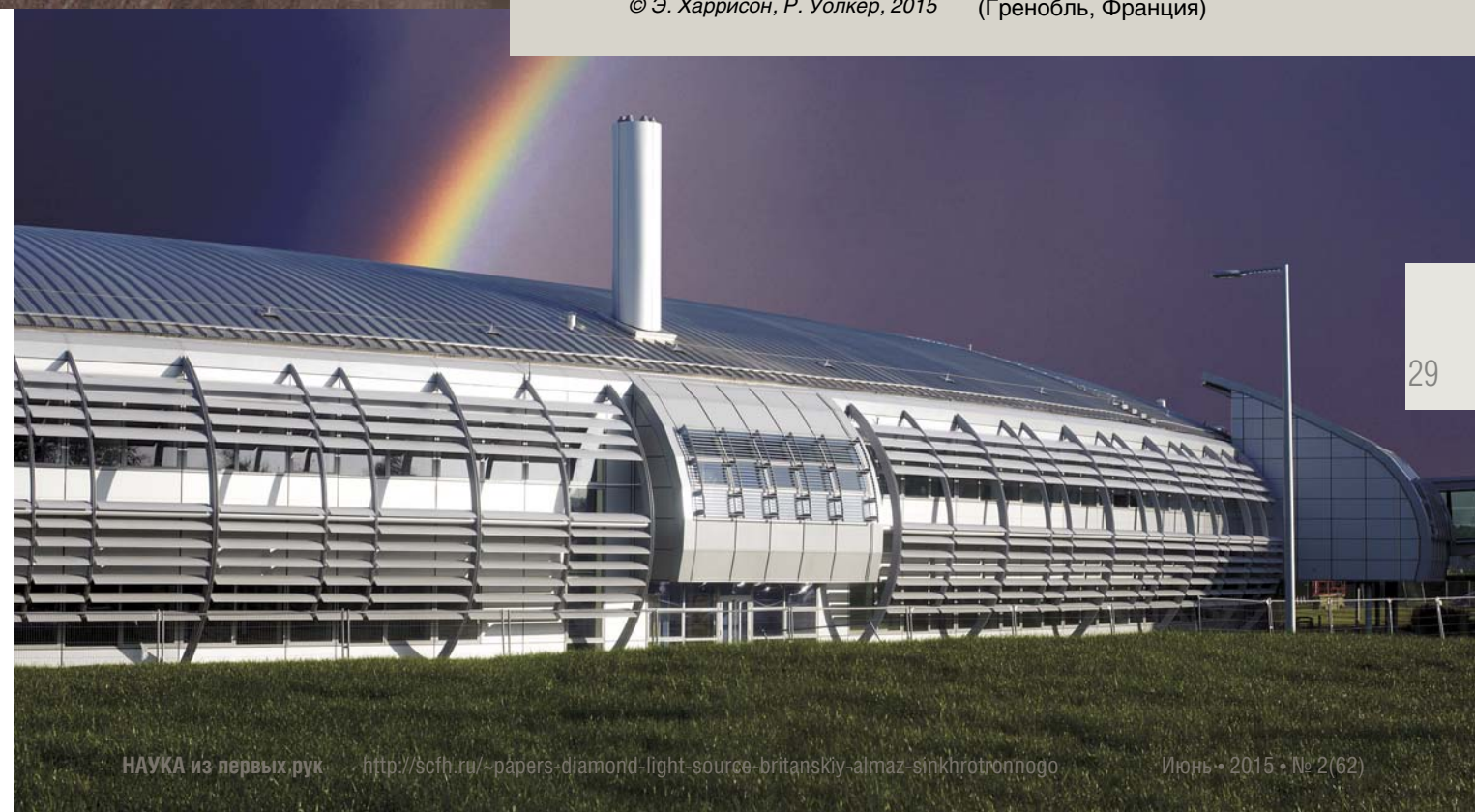


УОЛКЕР Ричард – технический директор компании «Diamond Light Source Ltd» (Оксфордшир, Великобритания) с 2002 г. Приглашенный профессор физики в Университете Оксфорда

© Э. Харрисон, Р. Уолкер, 2015



ХАРРИСОН Эндрю – профессор, специалист в области химии твердого тела, с 2013 г. – генеральный директор компании «Diamond Light Source Ltd» (Оксфордшир, Великобритания). Ранее работал генеральным директором источника нейтронов Института Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция)



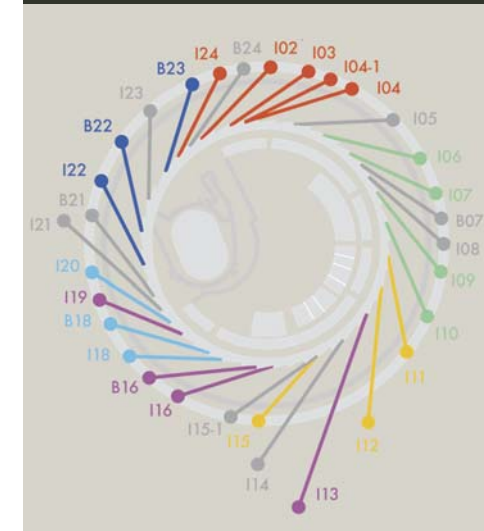
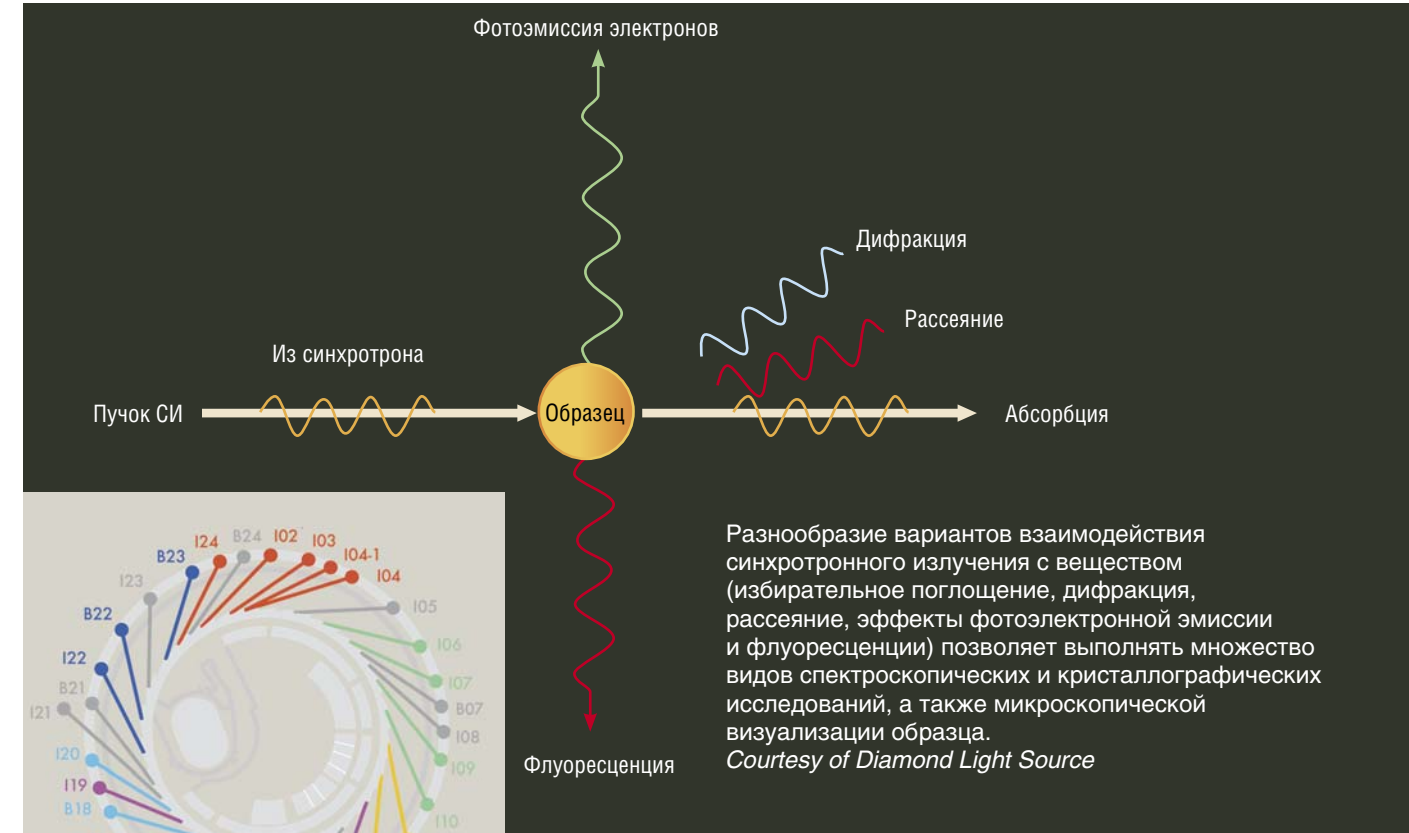


Ускорительный комплекс *Diamond Light Source* производит синхротронное излучение в диапазоне от рентгеновского до инфракрасного. Накопительное кольцо представляет собой 24-периодную структуру периметром 562 м, энергия электронного пучка – 3 ГэВ. Затраты на строительство комплекса составили 260 млн фунтов, годовой бюджет, включая затраты на исследования и эксплуатационные расходы, – 50 млн фунтов. Сегодня здесь работает 25 пользовательских станций разной специализации (справа), еще восемь находятся в стадии разработки. *Courtesy of Diamond Light Source*

Синхротронное излучение исторически, как известно, явилось «побочным продуктом» исследований в физике высоких энергий, поэтому первоначально его источником служили лишь ускорители, предназначенные для исследования элементарных частиц, дававшие весьма ограниченный выход СИ. Последующая реконструкция таких ускорителей путем создания специальных кольцевых накопителей полностью не решила проблемы, поскольку при этом можно было использовать только пучки частиц относительно малых энергий.

Первый в мире источник второго поколения, предназначенный исключительно для получения синхротронного излучения, – ускоритель электронов до энергии 2 ГэВ с кольцевым накопителем, был построен близ Дарсбери в английском графстве Чешир и успешно проработал с 1981 по 2008 г. Его эстафету принял ускорительный комплекс *Diamond Light Source* (DLS), ставший крупнейшим научным проектом Великобритании за последние сорок лет. DLS относится уже к источникам СИ 3-го поколения, которые

Компания «Diamond» была основана в 2002 г. как совместное венчурное предприятие с ограниченной ответственностью, финансируемое правительством Великобритании в рамках Совета научно-технических организаций (STFC) и треста *Wellcome Trust*, которые владеют 86% и 14% акций соответственно. На сегодня здесь работает свыше 500 человек – ученых, инженеров, техников и вспомогательного персонала из более чем 40 стран мира. На деятельность компании влияют комитеты, представляющие основные группы заинтересованных сторон, в том числе Консультативный комитет по науке, Комитет пользователей и Комитет промышленной науки

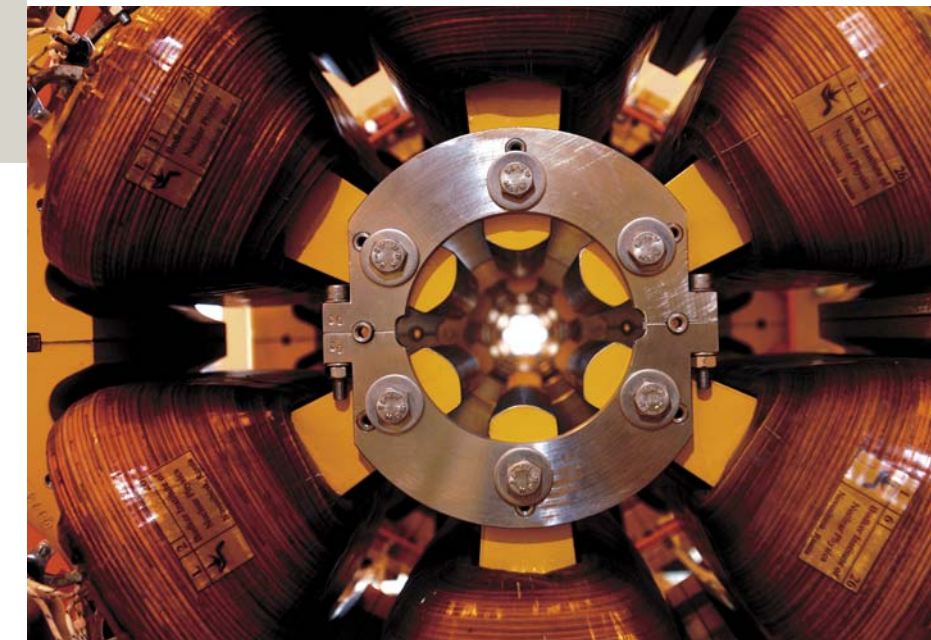


Специализация рабочих станций

- Кристаллография макромолекул
- Исследование аморфных сред
- Спектроскопия
- Исследование материалов
- Экстремальные условия
- Исследование поверхности
- В тестовой эксплуатации

характеризуются более высокой спектральной яркостью и пространственной когерентностью излучения благодаря использованию специализированных вставочных устройств (вигглеров и ондуляторов) и поворотных магнитов.

Строительство DLS началось в Южном Оксфордшире в марте 2003 г., а уже в январе 2007 г.



Последовательность таких шестипольных электромагнитов, разработанных и изготовленных в ИЯФ СО РАН, направляет пучок электронов в циклотроне DLS. *Courtesy of Diamond Light Source*



От хрупких белковых кристаллов...

DLS начал свою деятельность с трех пользовательских линий для кристаллографического исследования макромолекул. Это было вызвано высоким «спросом», так как в Великобритании сложилось очень активное сообщество структурных биологов. Рентгеновская кристаллография, начавшаяся в 1912 г. с работ У.-Г. и Л. Брэггов, позволяет использовать для определения точного положения атомов внутри объекта дифракционную картину, получающуюся при «освещении» любого кристаллизованного образца рентгеновскими лучами. Именно с помощью рентгеновской кристаллографии была открыта знаменитая двойная спираль ДНК, сегодня же этот метод широко используется для изучения самых разных биомолекул и более сложных биологических объектов, таких как вирусы, а также при разработке нанотехнологических материалов и т. п.

Внутри синхротронного кольца DLS сегодня располагается уникальная лаборатория для исследования мембранных белков. Дело в том, что четверть всех известных на сегодня белков встроены или ассоциированы с мембранами клеток или клеточных органелл, и именно эти белки являются мишенью для более чем половины всех современных лекарственных препаратов. Для рентгеноструктурного анализа белки обычно переводятся в кристаллическую форму, однако кристаллизация мембранных белков представляет собой реальную проблему. И то, что лаборатория находится буквально в паре метров от пучка СИ, очень помогает при изучении таких «нежных» белковых образцов.

Роботизированные системы позволяют за день подвергать рентгеноструктурному анализу сотни образцов, причем половина всех измерений проводится в режиме удаленного доступа. *Courtesy of Diamond Light Source*



Для определения структуры нативных белков и нуклеиновых кислот используется вакуумный рентгеновский дифрактометр. Проведение исследования в вакууме необходимо, так как в воздухе «мягкие» рентгеновские лучи сильно рассеиваются. *Courtesy of Diamond Light Source*

открыли свои двери для пользователей первые рабочие станции комплекса. Нужно отметить, что в его строительстве принимали участие и российские специалисты, в том числе из новосибирского Института ядерной физики СО РАН, который поставил 168 шести полюсных магнитов и два сверхпроводящих вставочных устройства для рабочих линий I-12 и I-15, построенных на первом этапе строительства центра.

Когда DLS начал работать, он был одним из самых ярких источников синхротронного излучения в мире: на этом ускорителе синхротронного типа электроны разгоняются до энергии 3 ГэВ, а благодаря специализированным вставочным устройствам производится синхротронное излучение в 10 млрд раз ярче солнечного, в широком диапазоне длин волн ($6 \cdot 10^{-12}$ – $2 \cdot 10^{-3}$ м). Такие характеристики СИ позволяют получать с его помощью информацию на атомном уровне и, при необходимости, в режиме реального времени, что дает возможность решать широкий ряд задач в самых актуальных областях современной науки и технологии, от структурной биологии до катализа и нанотехнологий.

ЗДОРОВОЕ НАСТОЯЩЕЕ

Более 40% исследований, проводимых сегодня на британском ускорительном комплексе DLS, относятся к наукам о жизни. Здесь изучается атомная и молекулярная структура вирусов и бактерий, вызывающих заболевания человека и животных, исследуются клеточные процессы, приводящие к возникновению патологий, а фармакологические компании тестируют потенциальные лекарственные средства.

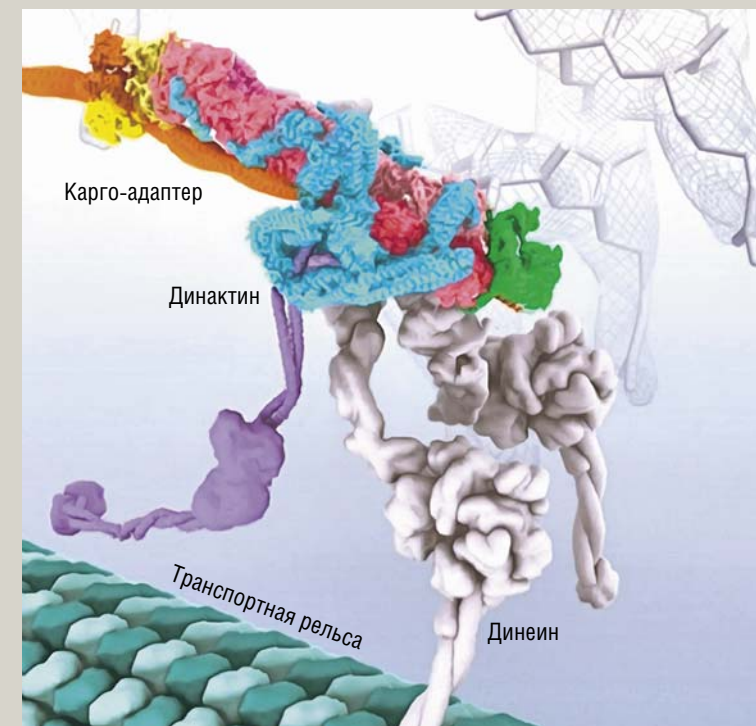
Одной из глобальных проблем современного здравоохранения является возникновение у микроорганизмов (от бактерий до грибов) устойчивости к химиопрепаратам, в том числе лекарственная устойчивость бактерий к антибиотикам. Поскольку механизмы возникновения подобной устойчивости очень различны, то и способы борьбы с ними должны быть разными. Исследования грамотрицательных бактерий, вызывающих широкий спектр инфекций, от сальмонеллеза и гонореи до менингита, показали, что их наружная поверхность покрыта настоящим камуфляжем из молекул липосахаридов, которые скрывают бактерию от иммунной системы организма и служат барьером против антибиотиков. С помощью СИ удалось точно определить структуру бактериального белка, ответственного за окончательный этап создания этого «защитного щита». На основе этих результатов можно создать новое поколение антибиотиков, активных в отношении широкого спектра возбудителей (Dong *et al.*, 2014).

Еще одним шагом в понимании механизмов, помогающих бактериям «обманывать» иммунную систему человека, является исследование структуры и действия «молекулярной линейки», регулирующей синтез полисахаридных полимеров бактериальных оболочек. Этот процесс сродни отрезанию куска ткани от рулона: когда полимер вырастает до определённой длины, его синтез останавливается. Хотя концепция «молекулярной линейки» восходит к началу 1970-х гг., сам этот белок удалось визуализировать на молекулярном уровне впервые с помощью СИ. И хотя эта работа относится к области структурной биологии, она может дать химикам элегантное решение для контроля над полимеризацией, что является проблемой для многих производственных процессов (Hagelueken *et al.*, 2014).

Сегодня около трети населения земного шара инфицированы туберкулезной палочкой: после ВИЧ эта бактерия убивает больше людей, чем любая другая инфекция. С каждым годом все чаще встречается и лекарственно-устойчивая форма туберкулеза – такие бациллы гораздо агрессивнее и живучее, чем обычные. Проблема борьбы с инфекцией в том, что эти бациллы покрыты особым защитным восковым налетом. Фермент, участвующий в производстве этого вещества, был открыт еще 18 лет назад, однако на получение единственного кристалла бактериального белка меньше булавочной головки у ученых из Окс-

фордского университета и Кингстона ушло около 15 лет работы! Анализ этого поистине драгоценного кристалла с помощью СИ позволил установить симметрию и четкую пространственную структуру белка, который должен стать потенциальной мишенью для новых противотуберкулезных лекарств.

Большие фармацевтические перспективы имеют и результаты исследования транспортного механизма наших клеток. Одним из ключевых компонентов такой транспортной сети является белковый комплекс динеин, который работает как маленький «мотор», перенося различные грузы по клетке. Однако динеин транспортирует не только «полезный груз», такой как митохондрии или молекулы мРНК, несущие информацию о составе новых белков, но и токсичные элементы. Среди последних – агрегированные белки, которые вызывают гибель нервных клеток, что приводит к развитию деменции и болезни Паркинсона. Кроме того, динеин могут захватывать вирусы (например, из семейства герпесвирусов), которые таким образом попадают в ядра



Модель структуры транспортного комплекса, состоящего из цитоплазматического белкового динеина, связанного через карго-адаптер аппарата Гольджи с белком динактином. Динеин опускается вниз, чтобы связаться с транспортной «рельсой», вдоль которой он будет тащить свой груз. На заднем плане – икебана из электронных структур комплекса, полученных методом криоэлектронной микроскопии. *Дизайнер – Джанет Иуоце (Janet Iwasa), Университет штата Юта. Courtesy of Diamond Light Source*

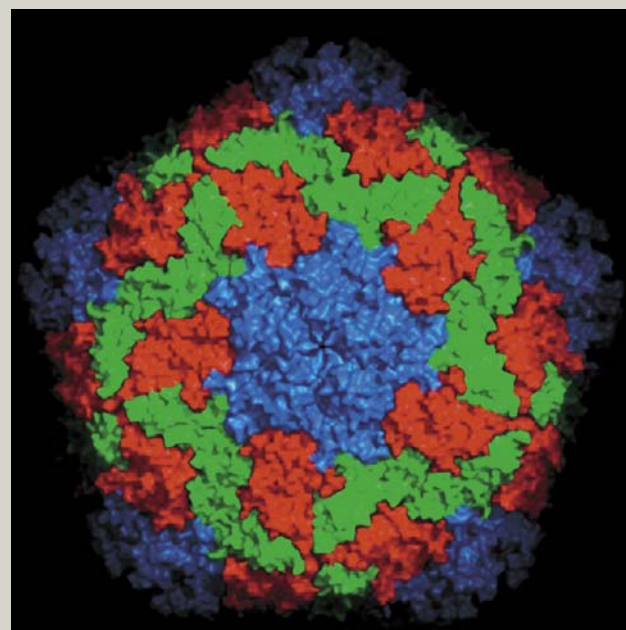
Мощный пучок жестких (53—150 кэВ) рентгеновских лучей и два универсальных экспериментальных отсека станции I-12 (JEEP) позволяют проводить долговременные исследования с помощью визуализации, томографии и дифракции. На фото – второй экспериментальный отсек, в котором можно разместить крупный испытуемый образец весом до двух тонн. Courtesy of Diamond Light Source



нервных клеток и таким способом провоцируют вспышку заболевания. Используя синхротронное излучение станции I-03, ученым из Медицинского центра Кембриджского университета впервые удалось визуализировать этот сложный субклеточный процесс и описать сценарий работы динеина в составе белкового комплекса.

С использованием СИ удалось пролить свет на еще один нейродегенеративный процесс – болезнь Альцгеймера. Оказалось, что формирование в пораженных нейронах глыбок белка бета-амилоида сопровождается накоплением в них нейротоксического вещества – двухвалентного железа. Это знание открывает новые направления в разработке препаратов, способных останавливать этот процесс, а также создания ранней МРТ-диагностики, которую можно будет

Используя две рабочие кристаллографические станции DLS – I-03 and I-24, команда ученых из Пекина и Оксфорда сумела впервые в мире определить точную, вплоть до отдельных атомов, молекулярную структуру вируса гепатита А. Courtesy of Diamond Light Source



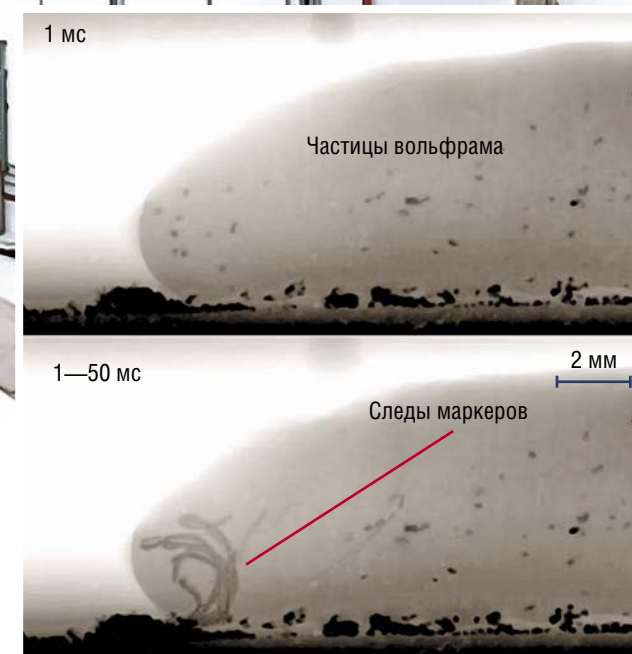
проводить еще до наступления необратимого повреждения мозга (Everett *et al.*, 2014).

Специально модифицированные кристаллографические станции центра предоставляют уникальные возможности для работы с вирусами – старейшими и самыми распространенными живыми организмами на нашей планете, многие из которых патогенны для человека. Вирусы изменяются столь стремительно, что восстановить их эволюционную историю крайне трудно, однако данные о ней крайне важны, чтобы успешно противостоять этим инфекционным агентам, не имеющим клеточного строения и устойчивым к действию большинства известных химиопрепаратов.

Одно из недавних достижений, сделанных с помощью СИ, – определение точной атомной структуры вируса гепатита А командой ученых из Пекина и Оксфорда. Оказалось, что этот вирус, вероятно, является недостающим эволюционным звеном между пикорнавирусами, заражающими людей и животных (к ним относится вирус полиомиелита), и вирусами насекомых. Вероятно, именно этим обстоятельством можно объяснить особую выносливость вируса и его необыкновенную устойчивость к высоким температурам и агрессивным средам. Неудивительно, что несмотря на наличие вакцины, эта болезнь продолжает поражать до полутора миллионов человек ежегодно.

Вирусы представляют серьезную угрозу не только для человека, но и сельскохозяйственных животных. Один из наиболее опасных инфекционных агентов – вирус ящура, из-за которого только в Великобритании в 2001 г. погибло свыше 7 млн голов крупного рогатого скота. Для борьбы с этим заболеванием в мире ежегодно требуется 3—4 млрд доз вакцины. С использованием микрофокусного пучка СИ рабочей станции I-24 был разработан новый тип вакцины, в которой в качестве основы используется не сам вирус, а его искусственно созданная «пустая» белковая оболочка. Вакцина, не содержащая живых вирусов, более безопасна и остается стабильной при обычных температурах что позволяет легко транспортировать и использовать ее в любых условиях. (Porta *et al.*, 2013).

Для динамической визуализации (1000 кадров/сек) потоков в расплаве стали во время электродной сварки в качестве маркеров использованы крупинки вольфрама. Наложение друг на друга рентгенограмм сварочного шва, полученных в течение 50 мс, проявляет картину вихревых течений в металле и демонстрирует, что часть капли не успела застыть. Courtesy of Diamond Light Source



Наконец, DLS является единственной в Европе организацией, предоставляющей возможность работать с живыми вирусами и такими инфекционными белковыми агентами, как прионы, относящиеся к 3-й категории биологической опасности.

Кристаллографические исследования на станциях в значительной мере автоматизированы, поэтому за восьмичасовую рабочую смену исследователи успевают изучить до нескольких сотен образцов. Если же пользователь не может сам присутствовать при эксперименте, он может контролировать его дистанционно, через двустороннюю видеосвязь.

Результаты работы DLS в рентгеновской кристаллографии биомолекул говорят сами за себя: сегодня центр занимает третье место в мире по числу расшифрованных белковых структур, хранящихся в мировом банке данных. Здесь постоянно ведутся и исследования, направленные на разработку новых препаратов для лечения рака, болезней сердца, вирусных и бактериальных инфекций, ранней диагностики нейродегенеративных заболеваний и других патологий.

... ДО ДВУХТОННЫХ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

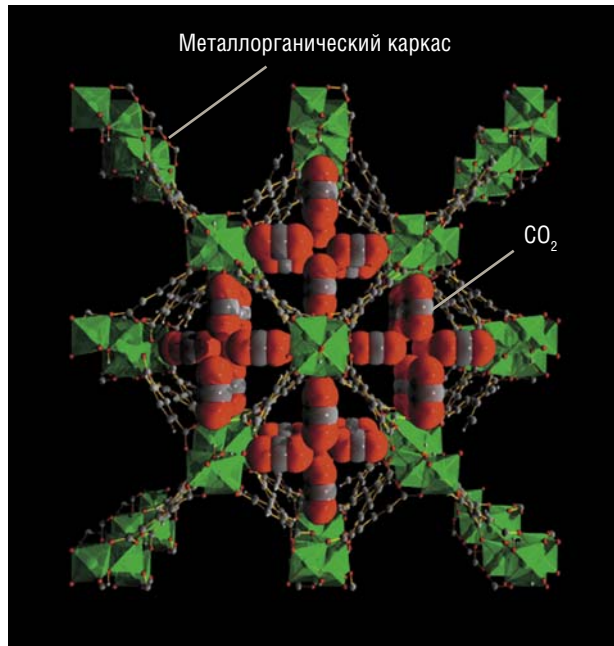
Но структурная биология и медицина – далеко не единственные области, где зарекомендовал себя DLS. Экологи используют многопрофильные и пользовательские станции СИ для поиска способов очистки загрязненной территории; вулканологи и геологи – для проведения экспериментов при экстремальных

температурах и давлениях, имитирующих условия в земных глубинах; археологи изучают предметы древнего искусства, химики создают новые материалы, а технологи – проверяют старые и т.п.

Сегодня в центре работает 25 пользовательских станций самого разного назначения, и еще 8 планируется ввести в строй до конца 2016 г.

Среди уникальных пользовательских линий центра – многоцелевая станция I-12 (JEEP), где проводятся эксперименты на материалах с высокой плотностью, в том числе металлах. В первом отсеке станции можно исследовать образцы размером от песчинки до нескольких сантиметров. То, что этот отсек находится на расстоянии всего лишь 50 м от места генерации СИ, обеспечивает высокую интенсивность пучка, необходимую для проведения дифракционных экспериментов и микроскопии. Во втором экспериментальном отсеке, расположенном за пределами главного здания, проводятся крупномасштабные и долгосрочные эксперименты для промышленных целей. Здесь исследователи могут вести непрерывный контроль за внутренним состоянием (напряжением кристаллической структуры) инженерных объектов в условиях, моделирующих реальную промышленную эксплуатацию. И в этом случае образцы могут достигать длины несколько метров и веса до 2 т!

Проследить за изменчивостью характеристик порошка или поликристаллического образца в течение длительного времени позволяет еще одна уникальная рабочая линия – I-11, предназначенная для порошковой дифрактометрии. Образцы при этом помещаются в особой «клетке», где они могут находиться от нескольких



С помощью порошковой дифрактометрии и метода неупругого рассеяния нейтронов изучаются химические процессы селективного связывания молекул в пористых органических структурах, которые используются для отделения редких и вредных компонентов и разделения хиральных молекул. *Courtesy of Diamond Light Source*

недель до года и даже более. Большой экспериментальный отсек станции дает возможность вести сразу несколько параллельных экспериментов с еженедельным сбором рентгеноструктурных данных.

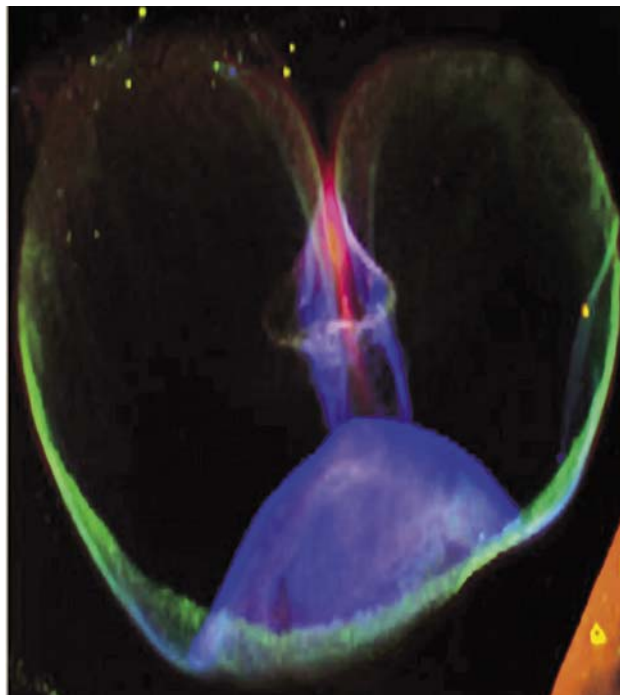
Одно из актуальных направлений современного материаловедения – структурный анализ поверхностей и интерфейсов (фазовых границ). Рабочая линия I-09 позволяет исследовать атомные и электронные структуры вещества вблизи границы раздела фаз с высоким пространственным разрешением и химической избирательностью. Для этого одновременно используется целый набор методов: от фотоэлектронной спектроскопии и фотоэлектронной дифракции до рентгеновской абсорбционной и отражательной спектроскопии. Достичь такого результата, а также добиться эффективного поглощения излучения на краях образца, что особенно важно при анализе сложных поверхностей, удалось с помощью двух ондуляторов, установленных в циклотроне наклонно друг к другу. Один из них генерирует «мягкие» (с длиной волны 1–10 нм) рентгеновские лучи, другой – «жесткие» (0,05–0,5 нм), при этом оба пучка СИ «освещают» одно и то же место исследуемого образца.

Время «открытых дверей»

DLS – крупнейший британский исследовательский центр, и здесь сделано все, чтобы обеспечить пользователям, число которых за год составляет свыше 3 тыс. человек, максимальные удобства. Центр работает круглосуточно при шестидневной рабочей неделе (за исключением двухмесячного ежегодного техобслуживания), т. е. около 5 тыс. часов ежегодно.

Спрос превышает предложение, поэтому заявки принимаются на конкурсной основе, при этом решения о допуске принимаются не руководством компании, а группой независимых экспертов в различных областях науки. Среди пользователей – сотрудники университетов, научно-исследовательских и промышленных организаций, а также частные лица. При условии открытой публикации полученных результатов услуги центра предоставляются бесплатно, причем доля таких пользователей должна составлять не менее 80–90%. Что касается платного доступа, то сейчас этой услугой

С помощью СИ на I-18 Э. Нил с Ротамстедской сельскохозяйственной станции ищет способы повысить доступность питательных веществ зерна пшеницы, что может помочь решить проблему недоедания в развивающихся странах. На фото зерна цветом отмечены места концентрации различных микроэлементов (зеленым – железо, красным – цинк, фиолетовым – марганец). Рентгенофлуоресцентный элементный анализ. Фото Э. Нила (Великобритания). *Courtesy of Diamond Light Source*



ОСВЕЩАЯ ПРОШЛОЕ

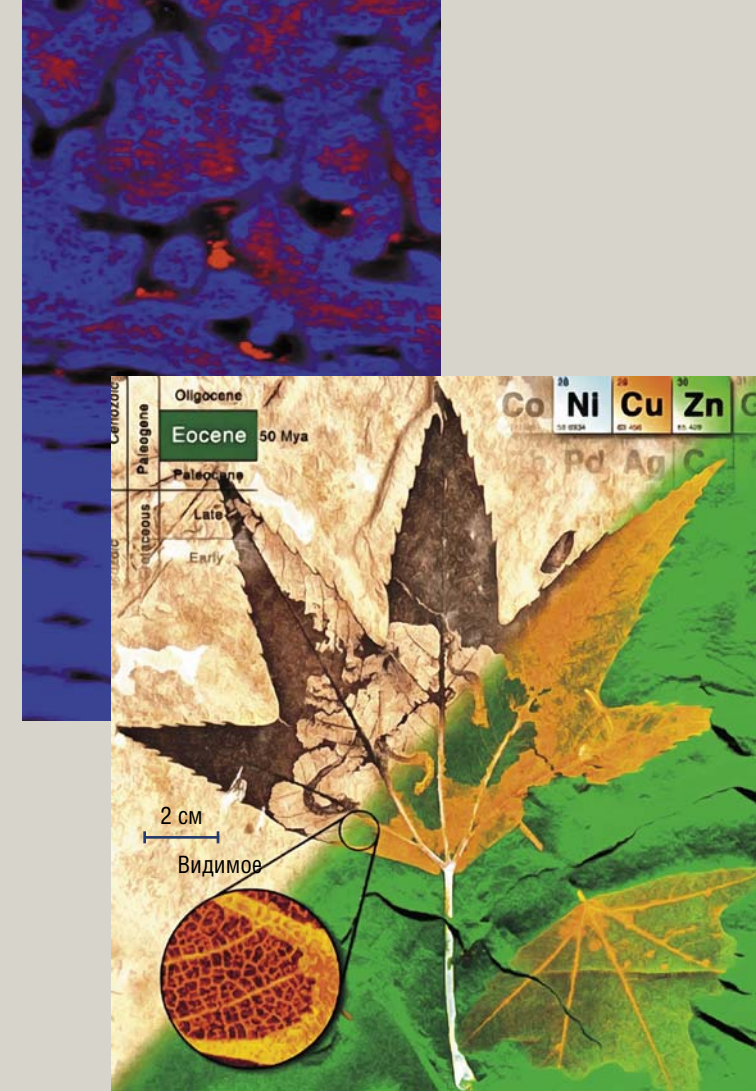
Одной из наиболее интригующих загадок далекого прошлого до сих пор остаются динозавры. Изучение окаменевших останков этих доисторических созданий с использованием синхротронного излучения DLS позволило приоткрыть завесу тайны над их удивительной жизнестойкостью, позволившей динозаврам царствовать на планете в течение многих миллионов лет.

Команда ученых из Университета Манчестера впервые использовала микрофокусную спектроскопию рабочей станции I-18 для изучения трещин, переломов и разрывов на костях хищных динозавров возрастом 150 млн лет. При обычном исследовании такие окаменевшие кости подвергаются рассечению, однако синхротронная визуализация позволила не только обнаружить следы заживших травм, многие из которых были бы летальны для человека, но и описать «химический сценарий» восстановления костей динозавров. Диагностирование защитных механизмов этих поразительных животных важны не только для эволюционных исследований: в конечном счете химия нашего тела и какого-нибудь аллозабра не так уж и отличается, и понимание того, как шел процесс заживления у динозавров может помочь разработать новые методы диагностики и лечения множества современных болезней.

Синхротронное исследование окаменевших останков динозавров дает и неожиданное решение для ... экологической проблемы захоронения ядерных отходов. Оказалось, что фосфат кальция – ключевой элемент костной ткани, обладает способностью связывать радиоактивные элементы из среды, в которой эти кости были захоронены. На основе этого вещества могут быть созданы химические структуры, которые смогут удерживать в себе ядерные отходы в течение длительных периодов времени.

Под «прицел» СИ попали не только ископаемые животные: команде ученых из Университета Манчестера, DLS и Стэнфордской лаборатории синхротронного излучения с помощью микрофокусной спектроскопии удалось подтвердить, что элементный состав даже окаменевших растений сохраняется на протяжении сотен миллионов лет. Оказалось, что распределение меди, цинка и никеля в хорошо сохранившихся ископаемых листьях эпохи эоцена и листьях современных растений очень схоже. И, по-видимому, именно медь выступила в качестве естественного антибиотика, замедлившего обычный микробный распад хрупких тканей листа. Эти результаты открывают возможность изучения биохимии растений, живших на планете в глубокой древности, и проследить возможные изменения в использовании металлов в растительном царстве на протяжении большого геологического периода.

Вот так существа, умершие много миллионов лет назад, теперь помогают ученым, благодаря использованию



Вверху – найденная кость аллозабра помимо естественного элемента – кальция (синий), содержит необычно много цинка (красный).

Внизу – композитное изображение окаменевшего листа дерева, возрастом 50 млн лет, сделанное в видимом и рентгеновском свете. Фиктивные цвета рентгеновской половины показывают наличие металлов (никеля Ni, меди Cu, цинка Zn), которые концентрируются в анатомических структурах листа. Также видны характерные воронкообразные изогнутые трубки, представляющие собой отходы пищеварения древних гусениц; их микроэлементный состав такой же, как и у листьев. Рентгенофлуоресцентный элементный анализ. *Courtesy of Diamond Light Source*

синхротронного излучения, получать результаты на переднем крае современной науки, от разработки безопасных промышленных технологий до биомедицинских исследований. Как точно заметил один из ведущих экспертов Великобритании по динозаврам Ф. Мэннинг из Университета Манчестера, «суть науки состоит не только в том, чтобы находить ответы, но и в том, чтобы задавать действительно хорошие вопросы...»

ЗАГЛЯНУТЬ В БУДУЩЕ

Огромные возможности синхротронного излучения сегодня широко используются в материаловедении и инженерии для создания новых материалов и эффективных и экологически чистых промышленных технологий.

Так, одной из актуальных проблем переработки сырой нефти является разделение сложной газообразной смеси углеводородов на отдельные «чистые» компоненты. Для этих целей обычно используется криогенная дистилляция, требующая огромных затрат энергии для поддержания высоких давлений и низких температур. Инновационным решением стал новый пористый металлоорганический материал, своего рода «химическая губка», изготовленная из доступных компонентов и способная абсорбировать из нефти различные компоненты с разной скоростью. С помощью синхротронного излучения DLS было доказано, что новый материал «NOTT-300» хорошо работает в реальных условиях. Его применение может революционизировать нефтеперерабатывающую промышленность, значительно сократить ее энергопотребление.

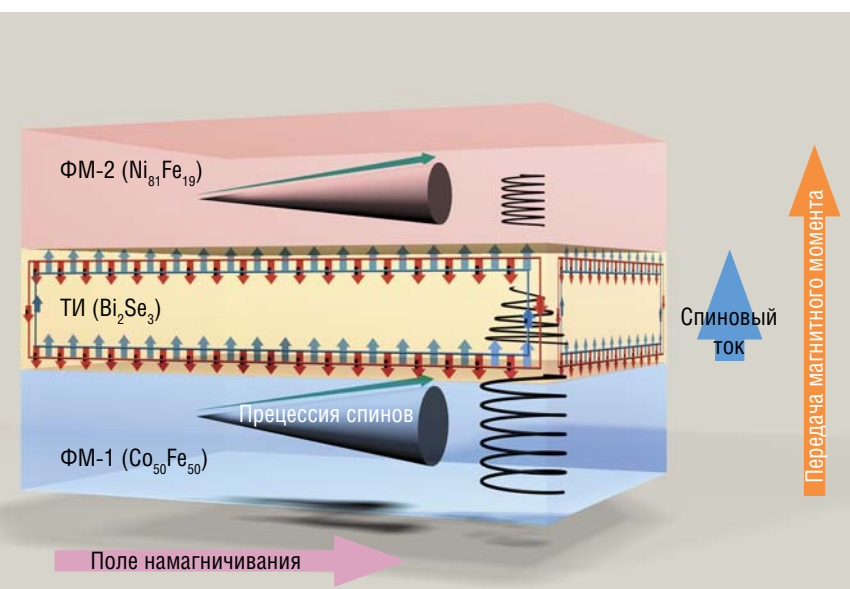
Одним из наиболее перспективных наноматериалов для электроники в

наши дни считается графен, представляющий собой листы толщиной в один слой атомов углерода. Этот двумерный, по сути, материал обладает очень высокой электрической проводимостью, однако для практического использования его иногда приходится укладывать множеством слоев. С использованием синхротронного излучения станции I-05 DLS был открыт новый тип материала, имеющий электронные свойства графена, но гораздо более простой в использовании благодаря своей «трехмерности». Этот суперматериал, представляющий собой гибрид 3D-версии графена и того, что называют «топологическим изолятором», может совершить настоящий переворот в производстве новых электронных гаджетов, которые должны стать меньше, быстрее и менее «прожорливыми» (Yang *et al.*, 2015).

Значительно улучшить способы магнитного хранения информации позволили успехи в спинтронике – быстро развивающейся области приборной технологии, базирующейся на манипулировании электронными спинами. Однако разработка спинтронических аналогов активных электронных устройств оказалась намного более сложной задачей. Недавно в результа-

те сотрудничества экспериментаторов и теоретиков из семи стран Европы и Азии было показано, что полупроводник с химической формулой WSe_2 проявляет поверхностные спин-поляризованные электронные состояния, в то время как в целом объеме инверсионная симметрия сохраняется. Это исследование, в котором для спектроскопических измерений фотоземиссии использовалась рабочая станция I-05, открывает возможности создания нового класса материалов, в которых спиновыми состояниями можно управлять, что представляет большой интерес для ряда логических приложений.

«Спиновый клапан» – возможный элемент будущих квантовых компьютеров, может быть создан из двух разных ферромагнетиков (ФМ) с тонкой (менее 20 нм) прослойкой из немагнитного материала со свойствами так называемого «топологического изолятора» (ТИ), эффективная передача электрического заряда возможна только по его поверхности. В ферромагнетиках под действием поперечного радиочастотного магнитного поля вектор намагниченности будет прецессировать вокруг вектора поля намагничивания, в результате чего электроны с разными спинами будут стремиться в противоположных направлениях, образуя спиновую поляризацию. Прослойка ТИ играет роль «фильтра», отсекающего зарядовый ток и обеспечивающего чисто спиновый ток от ФМ-1 к ФМ-2. Методом резонансного поглощения на рабочей станции I-10 DLS удалось измерить намагниченность каждого ферромагнитного слоя в отдельности и подтвердить возможность передачи информации, закодированной в электронных спинах, что было бы невозможно с помощью обычной техники магнитометрии с разрешающей способностью около 100 нм (Baker, 2015)



Вид на центр синхротронного излучения в пору цветения рапса.
Courtesy of Diamond Light Source

пользуется около 80 промышленных потребителей, и это число растет по мере того, как увеличивается число рабочих станций DLS. Более того, примерно пятая часть академических пользователей также декларирует, что полученные ими результаты могут быть непосредственно использованы в промышленности.

На DLS также проходят обучение студенты и аспиранты (сейчас их около 700, при этом 50 из них получают специальные стипендии на обучение) и технический персонал. А дважды в год, на «день открытых дверей», его посещает около 2 тыс. людей самого разного возраста, образования и профессии, которые интересуются исследованиями на переднем крае современной науки.

Конечно, производство и использование синхротронного излучения – предмет, нелегкий для понимания, ведь его нельзя пощупать или увидеть, поэтому на DLS имеется специальный «отдел по коммуникациям». Просветительская работа организована так, чтобы общение с широкой публикой происходило на самых разных уровнях, от младших школьников до пенсионеров преклонного возраста. Так, в канун прошлого рождества центр организовал необычное мероприятие для детей младшего возраста, на котором они строили мини-модель DLS из деталей любимого всеми детьми конструктора *Lego*. Благодаря такой игровой подаче непростого материала любой ребенок может наглядно увидеть, как организована командная работа внутри огромного синхротронного комплекса.

В арсенале просветительской деятельности центра – постоянно обновляемый новостной раздел на веб-сайте центра; брифинги и интервью с журналистами, которые проходят буквально каждую неделю; лекции, которые читают в школах сотрудники DLS; собственные тематические выставки и участие в выставках национального масштаба и, конечно, научно-популярные публикации.

При общении с широкой общественностью акцент обычно делается не на техническую сторону производ-

ства СИ, а на области его применения – от археологии до фармацевтики, которые вызывают интерес и достаточно просты для понимания. Ведь большую часть из нас, как правило, гораздо больше интересует не устройство того или иного технического девайса, а цели, для которого он используется. При этом всегда можно найти некий разумный баланс между научной терминологией и доступностью информации, которую нужно донести до самых широких масс.

Все интересные открытия, которые были сделаны на DLS за его пока недолгую восьмилетнюю историю, просто невозможно перечислить. Можно лишь упомянуть, что сотрудники центра вместе с его пользователями за это время опубликовали свыше 3,5 тыс. научных работ в самых актуальных научных областях, от молекулярной биологии и медицины до электроники.

Чтобы сохранить центр в авангарде мировой синхротронной науки, в DLS сейчас разрабатывается 10-летняя стратегия развития объекта, которая базируется на успешном опыте взаимодействия с другими исследовательскими организациями в таких областях, как разработка детекторов радиации, новых инструментов для электронной микроскопии и т. п.

Таким образом, к 2022 г. центр должен радикально обновиться. Все это делается для того, чтобы в XXI в. Великобритания обладала как можно более совершенным универсальным научным инструментом познания мира, каким на сегодня является синхротронное излучение.

В публикации использованы материалы с сайта <http://www.diamond.ac.uk>

Редакция благодарит Отдел науки и инноваций Посольства Великобритании в Москве за помощь в подготовке публикации