

# КИСИ вчера, сегодня, завтра

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

**Р**яд 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 нанoeлектроники, 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 центростремительной силы Лоренца в зависимости от направления излучения в осях, которые образуются векторами скорости  $\beta$  (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  $\epsilon_c$  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-

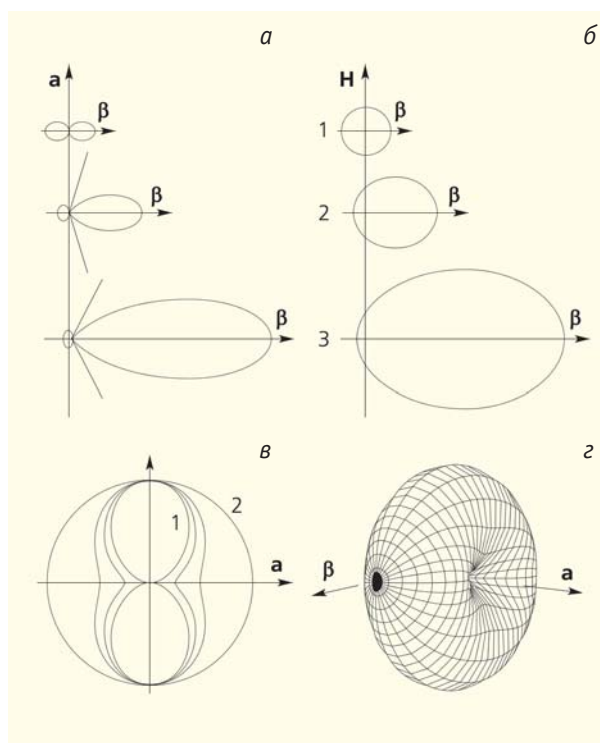


Рис.1. Сечения индикатрисы синхротронного излучения плоскостями  $\beta\mathbf{a}$  (а),  $\beta\mathbf{H}$  (б) при  $\beta = 0.01$  (1),  $\beta = 0.3$  (2) и  $\beta = 0.5$  (3) и плоскостями  $\mathbf{aH}$  (в) для значений  $\beta$  от 0.01 (1) до 1 (2) с объемным изображением (з) при  $\beta =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

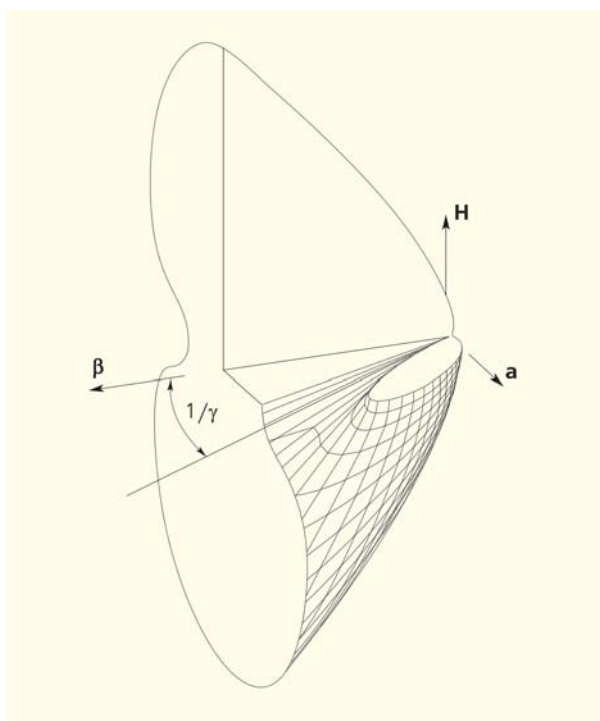


Рис.2. Сечения индикатрисы синхротронного излучения плоскостями  $\beta\mathbf{a}$ ,  $\beta\mathbf{H}$  и плоскостью, параллельной  $\mathbf{aH}$ , для  $\beta = 0.9$  [5].

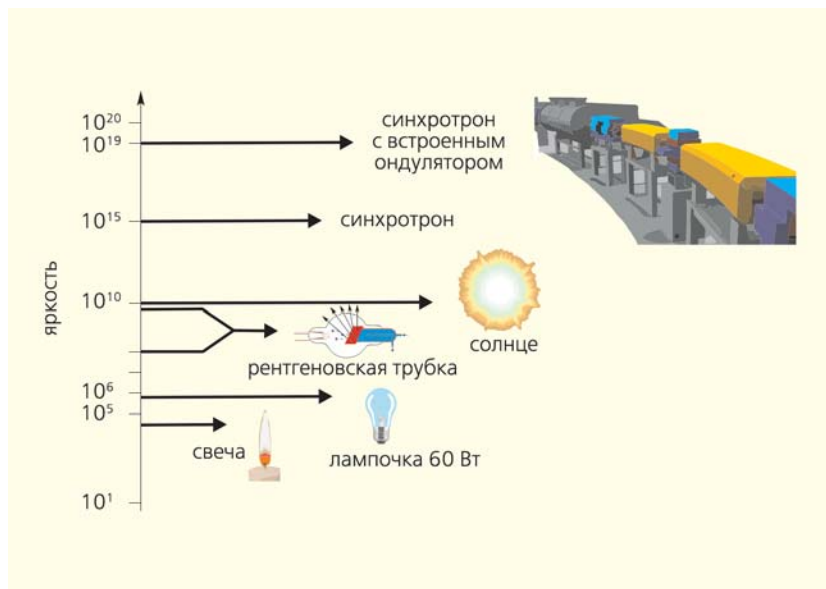


Рис.3. Яркость различных источников в единицах «фотон/с·мм²·мрад²·(0.1%)».

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 колайдеры, 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 колайдере 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:  $\lambda_c = 4\pi R / (3\gamma^2)$ , где  $R$  — радиус поворота. Она связана с длиной волны, при которой спектр имеет максимум,  $\lambda_{max}$ , 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 — слабополюсных 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

$$K = eB_m \lambda_{wii} / 2\pi mc,$$

где  $B_m$  — амплитуда знакопеременной индукции магнитного поля вставного устройства, а  $\lambda_{wii}$  — 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.

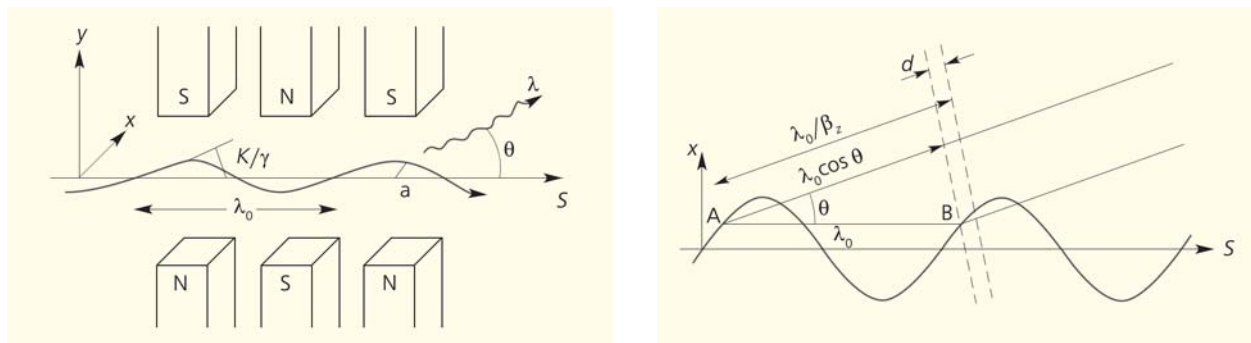


Рис.6. Схема плоского ондулятора (или вигглера) и система координат (слева). Интерференция в ондуляторе (справа).

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

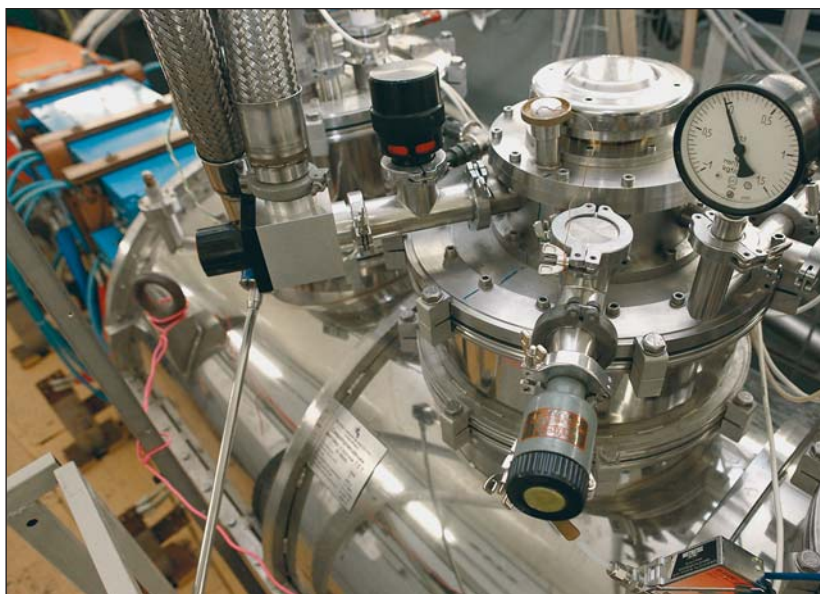


Рис.7. Сверхпроводящий вигглер на накопителе большого кольца.

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-

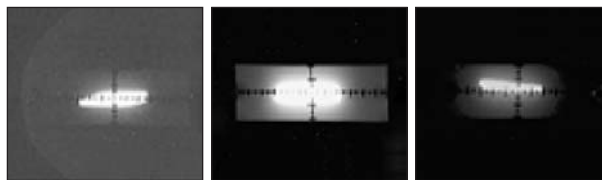


Рис.8. Излучение, выведенное из 7.5 Тл-сверхпроводящего вигглера по трем каналам ( $-13, 0, 17$  мрад) в экспериментальный зал КИСИ. Показаны фотографии пучков на люминесцентных датчиках, установленных на торцах каналов СИ.

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)

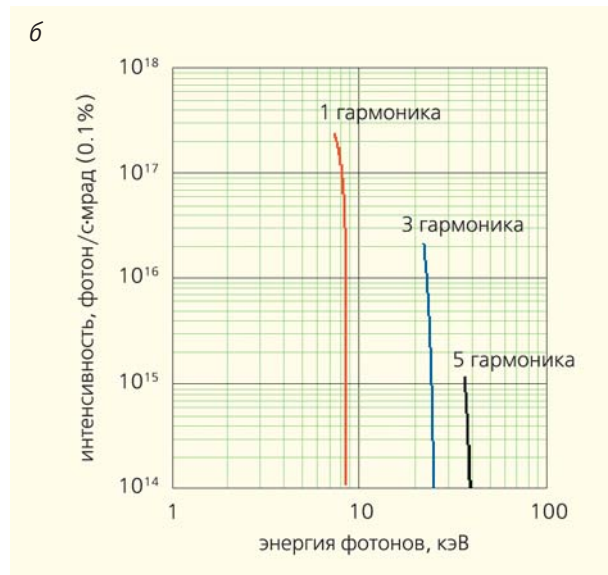
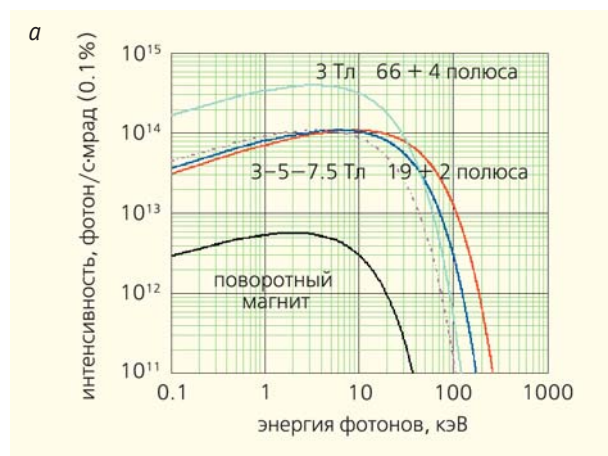


Рис.9. Интенсивность синхротронного излучения из поворотного магнита в зависимости от энергии фотонов — для сверхпроводящих 1.7 Тл- и 3 Тл-вигглера (66+4-полюсного) и 3—5—7.5 Тл-вигглера (19+2-полюсного) (а). Энергия электронов 2.5 ГэВ, ток электронов 100 мА. Расчетный линейчатый спектр излучения из 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 Курчатовского 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 Курчатовский источник по-прежнему остается знаковой, уникальной установкой для российской науки. Именно в его стенах президент 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 формировалась 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 Курчатовского 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 м<sup>2</sup>, 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 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 инжекции 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 перебоев 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 четвёртого поколения» (ИССИ-4) [12, 13]. На ее базе предусматривается создание уникального исследовательско-технологического комплекса с рекордными на настоящий момент параметрами синхротронного излучения (таб.).

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 ( $\sim 0.01$  нм·рад) и энергетическим разбросом 0.01%. Используемые электроны замедляются в тех же ускоряющих структурах, где они разогнались, 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 $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}$ ( $\Delta\lambda/\lambda = 0.1\%$ ) <sup>-1</sup>	$10^{24}$
Пиковая яркость, фотон $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}$ ( $\Delta\lambda/\lambda = 0.1\%$ ) <sup>-1</sup>	$10^{27}$
Поляризация (линейная, либо круговая)	полная
Длительность электронного пучка, 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.