

## ОБЗОРЫ

УДК 539.1.01

## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В НОВОСИБИРСКЕ: ПЕРВЫЕ 13 ЛЕТ

Г.Н. Кулипанов, Н.А. Мезенцев, В.Ф. Пиндюрин

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия  
E-mail: V.F.Pindyurin@inp.nsk.su

Статья поступила 12 апреля 2015 г.

С доработки — 25 мая 2016 г.

Описано развитие работ в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения на базе ИЯФ СО РАН начиная с 1974 г., когда экспериментальная история синхротронного излучения в мире только начиналась — не было специализированных источников и работы можно было проводить в нескольких ядерных центрах мира. ИЯФ СО РАН внес существенный вклад в развитие источников синхротронного излучения, а институты СО РАН — в развитие методов его применения для задач химии, катализа, биологии, геологии и материаловедения. Работа выполнена на комплексе ВЭПП-3/ВЭПП-4.

DOI: 10.15372/JSC20160701

**Ключевые слова:** синхротронное излучение, рентгеновская дифракция, рентгеновская спектроскопия, EXAFS спектроскопия, вигглеры, порошковая дифракция, временное разрешение.

## ВВЕДЕНИЕ

Искусственно сгенерированное синхротронное излучение (СИ) впервые было обнаружено случайно в оптическом диапазоне в 1947 г. на синхротроне 70 МэВ компании "Дженерал электрик". Его практическое обнаружение стимулировало дальнейшее развитие теории синхротронного (магнитотормозного) излучения и положило начало систематическому экспериментальному изучению свойств СИ, что в дальнейшем показало хорошее согласие между теорией и экспериментом. Теоретические работы показывали, что СИ, создаваемое ультрарелятивистскими частицами в циклических ускорителях, должно обладать необычными свойствами: высокой интенсивностью, на порядки превышающей интенсивность традиционных источников излучения в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ), мягкой и жесткой рентгеновской областях спектра; сплошным ("белым") спектром; малой угловой расходимостью пучков излучения; высокой степенью поляризации; детерминированной временной структурой. Благодаря этим свойствам в пятидесятых-семидесятых годах прошлого столетия в мире наметился явный интерес к использованию СИ для решения различных научных задач.

В то время реальными источниками СИ являлись синхротроны, созданные и создаваемые для физики высоких энергий и ядерной физики. С конца пятидесятых годов прошлого века ряд синхротронов стал оборудоваться специальными каналами вывода СИ, в первую очередь, для целей спектроскопии в ВУФ области. К таким электронным установкам относились 320 МэВ Корнельский синхротрон (США), 180 МэВ синхротрон SURF (США), 1,15 ГэВ синхротрон во Фраскати (Италия), 750 МэВ синхротрон INS-SOR в Токио (Япония), 6 ГэВ синхротрон DESY в Гамбурге (Германия), 680 МэВ синхротрон С-60 в ФИАН (СССР), 6 ГэВ синхротрон ARUS в Ереване (СССР), 1,5 ГэВ Сириус в Томске (СССР) и ряд других. При этом работы по исполь-

зованию СИ выполнялись либо одновременно с экспериментами по физике высоких энергий (ФВЭ), либо в специально выделенное, сильно ограниченное время.

Следующим этапом, еще более стимулировавшим использование СИ, явилось создание в шестидесятых годах разновидностей синхротронов — накопителей ультрарелятивистских пучков заряженных частиц. В синхротронах пучки заряженных частиц периодически инжектируются на относительно низкой энергии, затем ускоряются до максимальной энергии, а потом сбрасываются, и так с частотами повторения до 50 Гц. В накопителях инжектированные и ускоренные до максимальной энергии пучки частиц, благодаря сверхвысокому вакууму в накопительном кольце, продолжают циркулировать с постоянной энергией в течение часов и десятков часов. Это сильно увеличивает средний ток частиц в накопителе и, соответственно, увеличивает средний поток СИ, делает пучок СИ доступным в любое время (а не в определенные моменты времени, как в циклах ускорения синхротронов), сохраняет спектр излучения, повышает стабильность положения пучков излучающих частиц и резко снижает радиационную опасность при нахождении рядом с накопителем. Несмотря на то, что синхротроны продолжают использоваться в качестве источников СИ, все новые центры по использованию СИ начали основываться на накопителях.

В СССР в этом смысле сложилась уникальная ситуация. Практически все накопительные кольца были сосредоточены в Институте ядерной физики Сибирского отделения Академии наук СССР (ИЯФ СО АН СССР) в Новосибирске. Был еще небольшой 100 МэВ накопитель Н-100 в Харьковском физико-техническом институте АН УССР.

ИЯФ СО АН СССР являлся одним из мировых пионеров метода встречных пучков. Под руководством первого директора Института академика Г.И. Будкера в 1963 г. был создан первый электрон-электронный коллайдер ВЭП-1 (160 МэВ), а затем и электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2 (670 МэВ, 1967 г.). В дальнейшем был запущен электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-3 (2 ГэВ, 1973 г.), а вместо ВЭПП-2 построен и запущен ВЭПП-2М (670 МэВ, 1974 г.). Спектр СИ этих накопителей покрывал весь диапазон от ультрафиолетового до жесткого рентгеновского излучения. Все эти установки предназначались для экспериментов по физике высоких энергий, поэтому с 1963 до 1973 г. синхротронное излучение видимого диапазона из этих установок использовалось только в качестве инструмента для диагностики электронных и позитронных пучков в накопительных кольцах.

#### НАЧАЛО И РАЗВИТИЕ РАБОТ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СИ В НОВОСИБИРСКЕ

Учитывая нарастающий интерес в мире к использованию СИ, в декабре 1972 г. было принято решение о создании канала для вывода рентгеновской части синхротронного излучения из только что запущенного накопителя ВЭПП-3 (энергия частиц до 2,2 ГэВ). В июле 1973 г. первый канал вывода СИ был смонтирован, и рентгеновский пучок был выведен в атмосферу в зал накопителя ВЭПП-3. Пучок СИ выводился из поворотного магнита ВЭПП-3 в атмосферу через две вакуумноплотные 150 мкм бериллиевые фольги, при этом расстояние от точки излучения до выхода канала составляло 2,5 м [1, 2].

В том же году на выведенном рентгеновском пучке СИ из ВЭПП-3 группой д-ра Марка Мокульского из Биологического отдела Института атомной энергии им. И.В. Курчатова (г. Москва) были получены первые СИ-дифрактограммы натриевых и цезиевых солей ДНК. В следующем, 1974 г., группа д-ра Альвины Вазиной из Института биофизики АН СССР (г. Пущино) начала изучение структур биополимеров с большими периодами, в частности, структуры мышцы. Начав с регистрации малоугловой дифракции на рентгеновскую пленку, они, используя разработанный в ИЯФ однокоординатный рентгеновский детектор ОД-1, быстро перешли к технике рентгендифракционного "кино" сначала со 100 мс временным разрешением, а в дальнейшем и с 2 мс разрешением. В дальнейшем коллективу А. Вазиной в результате многолетних систематических исследований мышцы в процессе сокращения удалось построить структурную модель мышцы и показать, как она работает.

В том же году на выведенном рентгеновском пучке СИ из ВЭПП-3 группой д-ра М. Мокульского с использованием специально созданного дифрактометра СИД-1 были получены первые

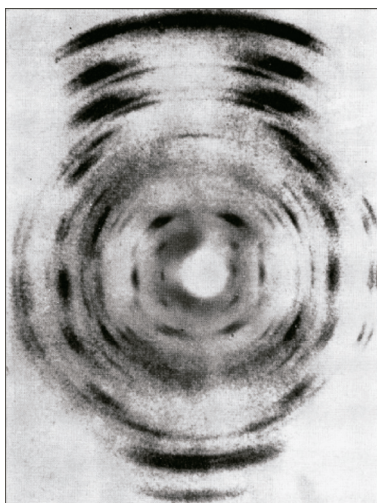


Рис. 1. Рентгенограмма Na ДНК тимуса теленка,  $\lambda = 2 \text{ \AA}$ , А-форма. Время регистрации 9 мин при токе в накопителе 25 мА [ 2 ]

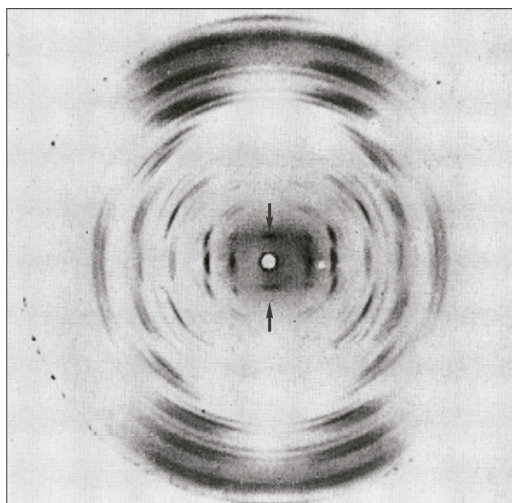


Рис. 2. Рентгенограмма Cs ДНК тимуса теленка,  $\lambda = 1,2 \text{ \AA}$ , А-конформация [ 3 ]. Меридиональный рефлекс на первой слоевой линии (показан стрелками) отсутствует на аналогичных рентгенограммах "легкой" Na ДНК в А-форме. Время экспозиции 19 мин при токе накопителя 55 мА

СИ-дифрактограммы (рис. 1—3) ряда образцов [ 1, 2 ]. Дифрактометр включал в себя однокристалльный монохроматор с отклонением монохроматического пучка в горизонтальной плоскости, рентгеновскую камеру для регистрации дифракционной картины на рентгеновскую пленку и ряд вспомогательных устройств. Были получены дифракционные картины от образцов различной природы — монокристаллов KBr, слюды и алюминиевой фольги, рентгенограммы в монохроматическом излучении на разных длинах волн от ориентированного полиэтилена, древесины и ДНК с аксиальной текстурой, монокристаллов белка антиноксантина. В то время в мире стали только появляться первые публикации о методике рентгеноструктурных исследований на СИ, поэтому значительное внимание в этих первых работах уделялось времени экспозиции и качеству дифракционных картин. Было показано, что по сравнению с рентгеновскими трубками ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$   $\text{CuK}_\alpha$ ) наблюдается весьма значительное (~50—100 раз) сокращение времени регистрации дифракционных картин без применения каких-либо фокусирующих устройств.

Обнадеживающие результаты первых экспериментов позволили приступить к решению задачи определения координат металлов в структуре молекул ДНК. Эти молекулы часто связаны с атомами металлов, например натрия, что важно для их биологической функции. Но атомы легкого металла не дают заметного вклада в дифракционную картину, а атомы подходящего тяжелого металла, например цезия, настолько сильно увеличивают поглощение в образце, что длительность съемки достигает сотен часов, за которые образец разрушается под облучением, и получить хороший снимок невозможно.

Используя излучение с длиной волны  $\lambda = 1,2 \text{ \AA}$ , т.е. более жесткое, чем использовавшееся обычно, и тем самым уменьшив поглощение в образце, авторы

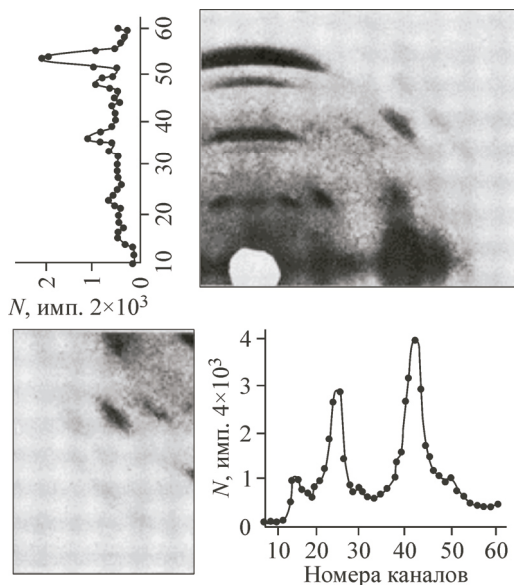


Рис. 3. Рентгенограмма хитиновой пластинки (из краба), снятая на пленку, и графики сечений матрицы интенсивностей (по экватору и меридиану), полученной с помощью детектора [ 5 ]

смогли получить хорошие рентгенограммы Cs ДНК тимуса телят и Cs ДНК фага T2 на пленке РТ-1 за время порядка 1 ч при токе в накопителе 30—40 мА [3, 4]. Полученные рентгенограммы позволили провести работу по определению координат атомов металла в молекуле ДНК [4].

Существенен и еще один аспект этих первых работ с СИ — это использование позиционно-чувствительных рентгеновских детекторов и автоматизация экспериментов с помощью компьютеров, то, что уже широко использовалось в экспериментах по физике высоких энергий и в управлении ускорителями-накопителями. В 1975 г. в ИЯФ был создан первый в СССР 4096 канальный двумерный детектор мягкого рентгеновского излучения на основе многопроволочной пропорциональной камеры со смесью аргона и  $\text{CO}_2$  в качестве рабочего газа [5]. Детектор имел  $64 \times 64$  канала с размером канала  $2 \times 2$  мм и общим рабочим полем  $128 \times 128$  мм. Эффективность регистрации детектора для рентгеновских квантов с энергией 6 кэВ составляла 30 %, максимальное быстродействие детектора 130 кГц. Электронный блок регистрации детектора, определяющий адрес зарегистрированного кванта, соединялся с ЭВМ М-6000, где происходило накопление информации и ее первичная обработка.

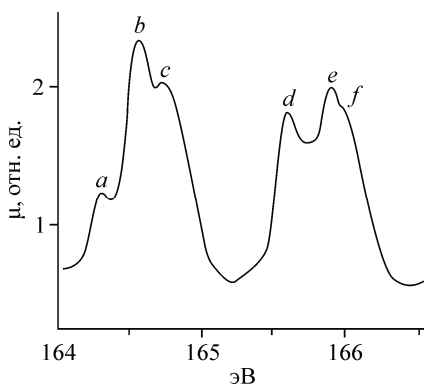
В 1975 г. группа Изабеллы Овсянниковой из Института катализа СО АН СССР на том же канале вывода СИ начала рентгеноспектральные исследования катализаторов — были получены эмиссионные  $K$ -спектры никеля в нанесенных катализаторах с концентрацией Ni до 1 %.

Практически одновременно, в 1974 г., был создан первый канал вывода вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения на накопителе ВЭПП-2М и создана станция спектроскопии для получения ультрамягких рентгеновских спектров поглощения высокого разрешения. Первые прецизионные эксперименты по спектроскопии простых молекул были проведены в 1975 г. группой Л. Мазалова из Института неорганической химии СО АН СССР. В состав группы входили Е. Глушкин, А. Красноперова, В. Кочубей.

Сотрудники ИНХ СО РАН установили спектрометр РСМ-500 с дифракционной решеткой ( $R = 2$  м,  $p = 600$  штрихов/мм,  $S = 5$  мк) на ВЭПП-2 [6]. На этом спектрометре было исследовано фотопоглощение молекулы  $\text{SO}_2$  вблизи  $L_{II,III}$ -края поглощения серы [7]. Основное внимание в работе уделялось изучению квазистационарных состояний за порогом  $L_{II,III}$ -поглощения серы. В первых полосах поглощения впервые обнаружена тонкая структура в виде максимумов и особенностей,  $a, b, c, d, e, f$  (рис. 4). Эта тонкая структура обусловлена проявлением электронно-колебательных переходов и проявлением мультиплетных термов, образующихся при взаимодействии возбужденного электрона с открытой  $2p$ -оболочкой серы. Кроме того, в этом исследовании обнаружен ненаблюдавшийся ранее пик поглощения на  $E = 173$  эВ, который не укладывается в серию Ридберга.

Эта же группа авторов при исследовании предпороговой области  $L_{II,III}$ -спектра поглощения серы в  $\text{SF}_6$  снова обнаружила пик на  $E = 177$  эВ, не укладывающийся в серию Ридберга [8]. Авторы объяснили природу этого пика проявлением диполь-запрещенного перехода на молекулярную орбиталь  $t_{1u}$ -симметрии.

С конца семидесятых годов значительный интерес у материаловедов и химиков вызвало применение синхротронного излучения для исследования изменений материалов при различ-

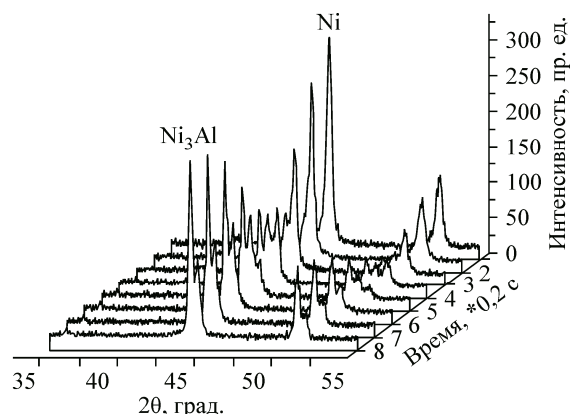


ных воздействиях или в процессе химических реакций методом рентгенодифракционного "кино". Эти методы стали успешно развиваться и использоваться на пучках СИ ВЭПП-3 различными институтами: группа д-ра Б.П. Толочко (Институт химии твердого тела и минерального сырья СО АН СССР) [9—11] — исследование твердофазных реакций, в том числе самораспространяющийся высокотемпературный синтез (рис. 5), д-р Б.К. Барахтин с коллегами (Физико-

Рис. 4. Тонкая структура полос A и B в  $L_{II,III}$ -спектре поглощения серы в молекуле  $\text{SO}_2$

Рис. 5. Образование промежуточной фазы при взаимодействии механоактивированной фазы Ni+Al во время самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Время протекания реакции порядка одной секунды.

На первом кадре видна рентгенограмма смеси никеля и алюминия. На последнем — продукт реакции Ni<sub>3</sub>Al. Четко видно образование промежуточной фазы, идентифицируемой как твердый раствор NiAl



технический институт им. А.Ф. Иоффе АН СССР, г. Ленинград) — исследование динамики дислокационной структуры во время процесса деформации металлов, д-р P. Forgacs (Research Institute for Plastics, Budapest, Hungary) — исследование фазовых переходов в пластмассах [12, 13], профессор U. Steinike (Central Institute of Physical Chemistry, Berlin, Germany) — химические процессы в механоактивированных системах [14, 15], д-р U. Lembke (Rostok University, Rostok, Germany) — золь-гель процессы [16] и другие.

Для исследования реакций в твердом теле широко используется рентгеноструктурный анализ. Однако стремление получить информацию *in situ* было главной задачей сотрудников Института химии твердого тела и механохимии СО РАН [17]. Но на начальном этапе развитие работ тормозилось отсутствием необходимой аппаратуры, адекватной задачам химии твердого тела: не было рентгеновской оптики, позволяющей получать информацию из областей микронных размеров за время порядка 1 мкс и меньше. Отсутствовали реакторы, позволяющие проводить рентгендифракционные исследования в режиме *in situ* химических реакций в твердом теле.

Наиболее остро отсутствие аппаратно-методического обеспечения ощущалось при исследовании быстротекущих процессов: самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и химических превращений при ударно-волновом нагружении (удар при механохимической реакции). Для СВС требовалось разрешение порядка 1 мс, а для ударноволновых процессов — порядка 1 нс.

Для решения задач химии твердого тела была разработана экспериментальная станция, позволяющая проводить эксперименты с миллисекундным временным разрешением [17].

Выполненная серия работ по исследованию СВС [18, 19] позволила изменить представления о механизме химических превращений в зоне реакции СВС. До этого эксперимента считалось, что все химические превращения системы заканчиваются в очень узкой зоне фронта волны горения, а оказалось, что химические процессы длятся в течение сотен миллисекунд, а некоторые процессы (рекристаллизация, периориентация кристаллитов, отжиг структуры) происходят в секундном диапазоне времен (см. рис. 5). Дальнейшее развитие этих работ совместно с сотрудниками Института структурной макрокинетики РАН позволило получить данные о кинетике химического процесса [20]. Эти работы явились фундаментом для развития дифракционного эксперимента с наносекундным временным разрешением [20, обзор Толочко в настоящем номере], и когда в 2015 г., благодаря поддержке РФФ, был разработан детектор DIMEX-M, эксперимент вышел на следующие параметры: экспозиция 73 пс, время между рентгенограммами 100 нс, точность синхронизации с исследуемым процессом 1 пс.

Рентгеновское излучение современных рентгеновских трубок проникает в образец на глубину порядка несколько микрометров (медное излучение,  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ , проникает в медь на 8 мкм), поэтому информация о процессах внутри образца недоступна для исследования. Это же относится к исследованию процессов на границе раздела электролит — твердый электрод. Было актуально разработать методы использования СИ для исследования процессов как в электроде, так и на границе раздела электролит — твердый электрод [22]. В работах ИХТТМ СО РАН [23] теоретически обоснована возможность регистрации рентгенограмм от образцов, находящихся под слоем электролита, что позволило подобрать условия для реализации метода получения структурной информации об электроде и электрохимическом осадке непосредствен-

но в процессе электролиза. Экспериментально подтверждено, что переход в жесткую область излучения — 30 кэВ и более — позволяет преодолеть эту проблему. Решение проблемы рассеяния излучения в электролите позволило провести несколько исследований процессов, происходящих на границе раздела электролит — твердое тело: 1) быстропротекающие релаксационные процессы деформированных металлических электродов, находящихся в контакте с электролитом; 2) наводораживание никеля; 3) образование и разложение гидроксида никеля [ 24 ].

Выход из печати обзора Г.Н. Кулипанова и А.Н. Скринского [ 25 ] в 1978 г. о работах с СИ способствовал стремительному росту числа новых исследовательских групп.

В 1975 г. на накопителе ВЭПП-3 для физики высоких энергий остро встал вопрос оперативного измерения энергии частиц в накопителе с точностью лучше  $10^{-3}$ . По предложению Г.Н. Кулипанова и А.Н. Скринского сотрудниками ИЯФ был разработан и реализован метод оперативного измерения энергии на основе спектральных особенностей СИ (экспоненциальный спад интенсивности в высокоэнергетической части спектра) сначала с точностью  $10^{-3}$ , а затем точность метода была доведена до  $10^{-4}$ .

Разрабатывались методы исследования люминесценции и исследовались образцы различных веществ при возбуждении как рентгеновским, так и вакуумным ультрафиолетовым синхротронным излучением, включая исследования быстрой люминесценции с субнаносекундным временным разрешением (В.В. Михайлин и коллеги (МГУ), В.В. Шелковников и коллеги (Институт органической химии СО АН СССР), А.А. Обычный (Институт химической кинетики и горения СО АН СССР), В.А. Пустоваров и коллеги (Уральский политехнический институт), Е.С. Глушкин, Э.И. Зинин (ИЯФ) и др.).

Сотрудниками ИЯФ и ряда других организаций разрабатывался метод рентгенофлюоресцентного элементного экспресс-анализа с возбуждением пучком синхротронного излучения (РФА—СИ). Практически уже в первых экспериментах была показана перспективность применения РФА—СИ для многоэлементного экспресс-анализа образцов и для анализа очень малых образцов. В частности, в начале 1980-х годов метод РФА—СИ в ИЯФ активно использовался группой д-ра Л.С. Тарасова с коллегами (Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского АН СССР, г. Москва) для исследования геохимических особенностей лунного грунта, доставленного на Землю американскими кораблями "Аполлон" и советскими автоматическими станциями "Луна".

Д-ром О.П. Алешко-Ожевским из Института кристаллографии АН СССР (г. Москва) исследовались возможности применения СИ для рентгеновской топографии кристаллов, включая наблюдения фазовых переходов, электрических и магнитных доменов, получение топограмм от сильно нарушенных и сильно поглощающих кристаллов. Рентгенотопографические исследования различных кристаллов на СИ из накопителя ВЭПП-3 проводились сотрудниками и ряда других организаций.

Значительный интерес у многих исследователей вызывал в то время новый метод EXAFS-спектроскопии. Сотрудниками ИЯФ совместно с командой из Института катализа СО АН СССР (д-р Д.И. Кочубей с коллегами) на ВЭПП-3 была создана экспериментальная станция, позволившая получать EXAFS-спектры различных веществ [ 26 ]. На этой станции активно работали ученые ГДР [ 27, 28 ] и Чехословакии. С тех пор эта станция по-прежнему остается одной из наиболее востребованных пользователями.

Развивались и методы рентгеновской микроскопии (рис. 6). Совместно с сотрудниками Института автоматики и электротехники СО АН СССР (В.П. Коронкевич, В.И. Наливайко) исследовали применение нестандартных регистрирующих сред — халькогенидных материалов для контактной рентгеновской микроскопии. Развитие цифровой техники позволило начать работы по сканирующей рентгеновской микроскопии, в том числе и разностной микроскопии на краях поглощения элементов. Продолжением этих работ явилась серия микроскопических и микрофотографических исследований распределений ряда контрастирующих элементов в медиастинальных лимфоузлах животных и человека в норме и в патологических процессах с целью изучения механизма функционирования лимфатической системы (совместно с сотруд-

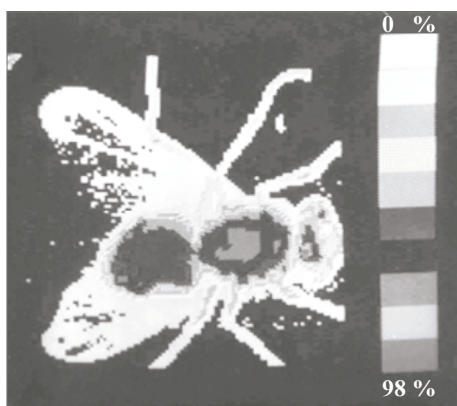


Рис. 6. Рентгеновская сканирующая микроскопия мухи Сибирской (пучок СИ из ВЭПП-3, пространственное разрешение 100 мкм, число точек изображения 100×100, энергия квантов 13,5 кэВ)



Рис. 7. Первый быстрый сцинтилляционный однокоординатный рентгеновский детектор для цифровой разностной ангиографии на синхротронном излучении (пространственное разрешение 1,5 мм, число каналов 128, скорость счета 128×1 МГц)

никами Института физиологии СО АМН СССР (г. Новосибирск) Г.Н. Драгуном, Ю.И. Бородиным и другими.

Совместно с врачами из новосибирской областной больницы (А.П. Огиренко, В.М. Омигов, В.Н. Рошупкин) активно разрабатывалась и техника цифровой разностной ангиографии для исследования кровеносной системы человека. Был разработан и создан специализированный быстрый однокоординатный сцинтилляционный рентгеновский детектор (рис. 7) для регистрации ангиограмм на  $K$ -крае поглощения иода, и в 1985 г. на пучке СИ из накопителя ВЭПП-4 получены первые изображения брюшной аорты живой собаки.

Сотрудниками московского Института атомной энергии (А.Н. Артемьев, Е.П. Степанов, А.И. Чечин и др.) и сотрудниками ИЯФ (В.А. Кабанник и др.) развивались работы по мессбауэровскому возбуждению ядер с использованием синхротронного излучения. С использованием монохроматизации пучка СИ за счет отражения от монокристалла гематита  $\alpha$ - $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$  были получены первые обнадеживающие результаты по возбуждению мессбауэровского уровня  $^{57\text{m}}\text{Fe}$  (14,4 кэВ).

На накопителе ВЭПП-2М в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена кроме обширного круга спектроскопических работ, проводимых различными исследователями из советских и зарубежных организаций, были начаты и проведены первые метрологические измерения солнечнослепых ФЭУ, вторичных электронных умножителей, спектральной аппаратуры (Е.С. Глушкин (ИЯФ), В.А. Кочубей (Новосибирский государственный университет), В.И. Наливайко (Институт автоматики и электрометрии СО АН СССР), В.И. Огурцов (Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Ленинград).

Рентгеновская голография с нанометровым разрешением давно является мечтой исследователей. Работы, проведенные в 1974 г. на пучке СИ из ВЭПП-3, позволили получить первые дифракционные картины от щели в рентгеновском диапазоне. Это был первый успех, но одновременно пришло понимание, что даже интенсивности СИ из поворотного магнита недостаточно для реализации рентгеновской голографической микроскопии высокого разрешения из-за требования проводить эксперимент с пучками высокой степени монохроматизации. Для увеличения интенсивности СИ в экспериментах по микроскопии и голографии в начале 1980-х годов был изготовлен первый в мире спиральный ондулятор с параметрами: период 2,4 см, полное число периодов 10, максимальное магнитное поле на оси ондулятора 1,3 кГс. Сотрудниками Е. Глушкиным (ИЯФ) и П. Ильинским (НГУ) было проведено исследование излучения в области длин волн 100÷300 Å. Было показано, что ондуляторное излучение с его естественной монохроматизацией явно выигрывает для применения в рентгеновской голографии по сравнению с излучением из поворотных магнитов и что с существующими рентгеновскими резистами

вполне достижимо пространственное разрешение голограмм  $\sim 50 \text{ \AA}$ . Совместно с д-ром П. Дезом (LURE, Orsay, France) были проведены исследования поляризационных свойств ондуляторного излучения. Этот ондулятор в течение длительного времени оставался единственным источником в мире квазимонохроматического ондуляторного излучения с циркулярной поляризацией.

Конец семидесятых—начало восьмидесятых было временем бурного расцвета работ по рентгеновской литографии с нацеленностью на производство больших и сверхбольших интегральных схем с субмикронными размерами элементов. В качестве источника излучения серьезно рассматривалось только СИ с типичной длиной волны  $\sim 10 \text{ \AA}$ . ИЯФ совместно с новосибирским научно-производственным предприятием "Восток" на накопителе ВЭПП-2М была создана станция рентгеновской литографии и начато исследование физических и технологических процессов, отработка специализированного технологического оборудования.

Знаковым событием тех лет стало создание первого в мире 20-полюсного сверхпроводящего вигглера с магнитным полем 33 кГс и периодом 9 см. В 1979 г. вигглер был установлен в прямолинейный проежуток накопителя ВЭПП-3 и из него был получен рентгеновский пучок с суммарной мощностью  $\sim 1 \text{ кВт}$ . По сравнению с излучением из поворотного магнита ВЭПП-3 интенсивность СИ из вигглера в области длин волн  $\sim 1 \text{ \AA}$  выросла примерно в 200 раз. Полученный опыт создания и работы с первым сверхпроводящим вигглером позволяют сейчас команде проф. Н.А. Мезенцева разрабатывать, создавать и поставлять во многие мировые центры СИ сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы.

В 1984 г. сверхпроводящий вигглер с тремя центральными дипольными магнитами с полем 75 кГс и двумя боковыми с полем 45 кГс был установлен на накопителе ВЭПП-2М (рис. 8, 9). Излучение из вигглера использовалось для работ по рентгеновской литографии. В частности, на пучке излучения из этого вигглера впервые на СИ была осуществлена передача изображения (на длине волны  $1,7 \text{ \AA}$ ) брэгг-френелевской рентгеновской линзой, изготовленной в Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов АН СССР (Черноголовка, Московская обл.).

В 1977 г. Н.А. Винокуров и А.Н. Скринский, развивая идею лазера на свободных электронах, предложили оптический клистрон, включающий пару ондуляторов и группирующую магнитную секцию между ними. С тех пор в ИЯФ начало развиваться направление работ, связанное с лазерами на свободных электронах (ЛСЭ). Оптический клистрон экспериментально изучали на накопителе ВЭПП-3 с 1979 г. Был изучен спектр спонтанного излучения и измерен коэффициент усиления за пролет. Было создано и исследовано несколько конструкций ондулято-

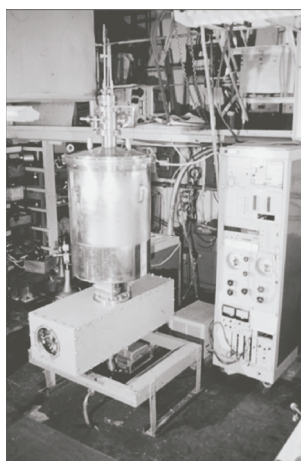


Рис. 8. Первый сверхпроводящий 20-полюсный вигглер с магнитным полем 33 кГс и периодом 9 см

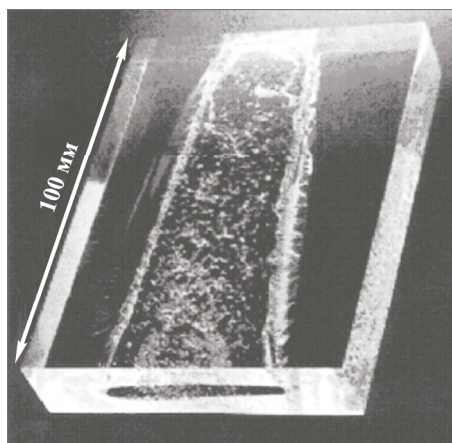


Рис. 9. Оргстеклянный параллелепипед (10 см длина), прожженный мощным рентгеновским пучком из первого сверхпроводящего вигглера на ВЭПП-3 (первая "сверхглубокая рентгеновская литография")



ров на постоянных магнитах. Проведенные в те годы работы с оптическим клистроном послужили основой для получения впервые в мире на накопителе генерации излучения в ультрафиолетовом диапазоне (1988 г.) и создания в дальнейшем мощного лазера на свободных электронах (1994 г.).

Начальный период работ с синхротронным излучением в ИЯФ характеризовался и существенным расширением экспериментальных площадей для работ с пучками СИ. В конце 1970-х на накопителе ВЭПП-3 началось строительство специализированного помещения — бункера СИ. Кроме профессиональных рабочих в строительстве посылно участвовали и научные сотрудники. С 1981 г. все работы с пучками СИ на ВЭПП-3 начали проводиться в этом бункере, куда выводилось излучение как из поворотного магнита, так и из сверхпроводящего вигглера. На накопителе ВЭПП-2М был также построен "новый рентгенолитографический" бункер СИ, где расположились станция рентгенолитографии и чистые технологические помещения.

В связи с развитием работ по оптическому клистроноу, излучение из которого должно было также выводиться в бункер СИ ВЭПП-3, все работы с пучками рентгеновского СИ в 1984 г. были перенесены во вновь построенный бункер СИ накопителя ВЭПП-4 (5,5 ГэВ), где и проводились до августа 1985 г.

Во второй половине 70-х и в первой половине 80-х гг. пучки синхротронного излучения в ИЯФ начали активно использоваться не только исследователями из бывшего Советского Союза, но и учеными из зарубежных стран. В разное время зарубежные ученые из Англии (K. Bowen, S. Davies), Франции (P. Dhez), бывшей ГДР (W. Blau, K.-H. Hallmeier, A. Meisel, H.-G. Eberle, E. Schnurer, U. Steinike), Венгрии (P. Forgacs), Чехословакии (L. Pajasova, J. Hrdy, E. Krousky) проводили свои работы на пучках СИ из накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-2М. Среди них выделяется один из пионеров работ с синхротронным излучением во Франции д-р Пьер Дез, проживший и проработавший в Новосибирске год, занимаясь исследованием рентгеновских многослойных зеркал и поляризационных свойств ондуляторного излучения.

#### КОНФЕРЕНЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В декабре 1975 г. в Новосибирске состоялось Первое рабочее совещание по синхротронному излучению СИ-75 (официально называлось "The 1st Meeting on Using Electron Storage Rings SR Sources for Experiments in Biology, Chemistry and Physics"). На СИ-75 было представлено всего четыре доклада по экспериментальным результатам на пучках СИ из накопителей ВЭПП-2М и ВЭПП-3 в ИЯФ: М. Мокульского, о рентгеноструктурном анализе дезоксирибонуклеазы (ДНК); А. Вазинной, об изучении структуры биополимеров с большими периодами, в частности, структуры мышцы; И. Овсянниковой, о рентгеновском спектральном изучении катализаторов; Е. Глускина, об изучении рентгеновского спектра поглощения химических соединений в сверхмягком рентгеновском излучении. Также был представлен доклад И. Коопа (ИЯФ) о первой версии концептуального проекта будущего накопителя — источника СИ для Московской области.

Дальше последовали регулярные совещания и конференции по использованию синхротронного излучения СИ-77, СИ-78, СИ-79, СИ-80, и дальше с периодичностью раз в два года. За исключением СИ-90, прошедшей в г. Москве, все остальные конференции проведены (и проводятся до настоящего времени) в г. Новосибирске. С 1986 г. (СИ-86) Труды конференций начали публиковаться в виде специальных выпусков журнала *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. Число участников конференций нарастало и быстро перевалило за две сотни, включая десятки зарубежных ученых.

Учитывая сформировавшееся новое направление работ, связанное с синхротронным излучением, и его важность для фундаментальных исследований в физике, химии, биологии, материаловедении, для разработки новых технологий при решении различных прикладных задач, Президиум Сибирского отделения АН СССР своим постановлением от 1981 г. создал на базе комплекса ВЭПП-2, ВЭПП-3 и ВЭПП-4 — источников СИ и лабораторий ИЯФ — Сибирский центр синхротронного излучения для проведения исследований с использованием СИ, который

действует и в настоящее время. Много лет этот центр оставался основным и постоянно действующим в СССР, а затем и в России для исследований на пучках СИ.

Первый библиографический указатель "Синхротронное излучение в ИЯФ СО АН СССР", включающий публикации по генерации и использованию синхротронного излучения, выполненные в ИЯФ СО АН СССР с начала развития работ по СИ по май 1986 г. [29].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активными инициаторами и вдохновителями развития работ с синхротронным излучением в ИЯФ являлись первый директор ИЯФ академик Г.И. Будкер и академик А.Н. Скринский. В целом ряде работ они были и непосредственными участниками.

Первое десятилетие работ с синхротронным излучением в ИЯФ характеризуется резким нарастанием числа экспериментальных групп из СССР и зарубежных стран, использующих это излучение от пяти в 1975 г. до 87 в 1984 г., стремительным расширением фронта работ с пучками СИ как для исследовательских, так и для технологических целей, формированием квалифицированного сообщества пользователей СИ.

Исследователям действительно становилось тесно на пучках СИ из накопителей ИЯФ, изначально созданных для физики высоких энергий. Возрастали и требования исследователей к пучкам СИ. Поэтому в мире уже разрабатывались и создавались специализированные накопительные кольца — источники СИ, в том числе и в ИЯФ: накопители "Сибирь" для Института атомной энергии (г. Москва), для Технологического накопительного комплекса в г. Зеленограде.

В данной статье описано начало и становление работ по использованию синхротронного излучения из накопителей — источников СИ в Институте ядерной физики СО АН СССР. Временной интервал в основном охватывает диапазон с 1973 по 1985 г.

В силу большого объема и разнообразия проводившихся работ статья неизбежно носит фрагментарный характер, хотя авторы старались отразить или хотя бы упомянуть основные работы, проводившиеся на пучках СИ. В статье сознательно не рассматриваются проводившиеся в то же время работы по разработке и созданию специализированных накопителей — источников СИ (накопители "Сибирь" для Института атомной энергии в г. Москве; накопители для Технологического накопительного комплекса в г. Зеленограде) и работы по лазерам на свободных электронах.

Работа по модернизации рентгеновского детектора DIMEX выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мокульская Т.Д., Мокульский М.А., Никитин А.А., Анашин В.В., Кулипанов Г.Н., Лукашов В.А., Скринский А.Н. Использование синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3 для рентгеноструктурных исследований // Препринт ИАЭ-2385. — 1974.
2. Мокульская Т.Д., Мокульский М.А., Никитин А.А., Анашин В.В., Кулипанов Г.Н., Лукашов В.А., Скринский А.Н. // Докл. АН СССР. — 1974. — **218**, № 4. — С. 824 — 827.
3. Мокульская Т.Д., Мокульский М.А., Никитин А.А., Скуратовский И.Я., Бару С.Е., Кулипанов Г.Н., Сидоров В.А., Скринский А.Н., Хабахпаев А.Г. // Кристаллография. — 1977. — **22**, № 4. — С. 744 — 752.
4. Мокульский М.А. // Вестн. АН СССР. — 1978. — № 8. — С. 8 — 14.
5. Бару С.Е., Мокульская Т.Д., Мокульский М.А., Сидоров В.А., Хабахпаев А.Г. // Докл. АН СССР. — 1976. — **227**, № 1. — С. 82 — 84.
6. Глускин Е.С., Мазалов Л.Н., Красноперова А.А., Кочубей В.А., Мишнев С.А., Скринский А.Н., Трахтенберг Э.М., Тумайкин Г.М. // Изв. АН СССР, Сер. физ. — 1976. — **40**. — С. 225.
7. Красноперова А.А., Глускин Е.С., Мазалов Л.Н., Кочубей В.А. // Журн. структур. химии. — 1976. — № 6. — С. 1113 — 1116.
8. Глускин Е.С., Красноперова А.А., Мазалов Л.Н. // Журн. структур. химии. — 1977. — № 1. — С. 185 — 187.
9. Boldyrev V.V., Gaponov Y.A., Lyakhov N.Z., Politov A.A., Tolochko B.P., Shakhhtshneider T.P., Sheromov M.A. // Nuclear Inst. Methods Phys. Res., A. — 1987. — **261**, N 1-2. — P. 192 — 199.
10. Aleksandrov V.V., Korchagin M.A., Tolochko B.P., Sheromov M.A. // Combustion, Explosion, and Shock Waves. — 1983. — **19**, N 4. — P. 430 — 431.

11. *Lyakhov N.Z., Mytnichenko S.V., Sheromov M.A., Smirnykh V.V., Tolochko B.P.* // Nuclear Inst. Methods Phys. Res., A. – 1986. – **246**, N 1-3. – P. 776 – 778.
12. *Forgacs P., Mezentssev M.A., Pindiurin V.F., Sheromov M.A., Tolochko B.P.* // J. Polymer Sci. Polymer Phys. Ed. – 1980. – **18**. – P. 2155 – 2168.
13. *Forgacs P., Sheromov M.A., Tolochko B.P.* // Polymer Bull. – 1981. – **6**. – P.127 – 133.
14. *Neissendorfer F., Steinike U., Tolochko B.P., Sheromov M.A.* // Nuclear Inst. Methods Phys. Res., A. – 1987. – **261**, N 1-2. – P. 216 – 218.
15. *Neissendorfer F., Steinike U., Tolochko B.P., Sheromov M.A.* // Nuclear Inst. Methods Phys. Res., A. – 1987. – **261**, N 1-2. – P. 219 – 220.
16. *Gaponov Yu.A., Karakchiev L.G., Lyakhov N.Z., Tolochko B.P., Lembke U., Bohlmann K., Dolbnya I.P.* // Nuclear Inst. Methods Phys. Res., A. – 1995. – **359**, N 1-2. – P. 170 – 174.
17. *Mesentsev N.A., Sheromov M.A., Smirnykh V.V., Sokolov A.S., Sukhorukov A.V., Tolochko B.P., Ushakov V.A., Vlasov A.M.* // Nuclear Inst. Methods Phys. Res., A. – 1986. – **246**, Iss. 1-3. – P. 604 – 608.
18. *Aleksandrov V.V., Korchagin M.A., Tolochko B.P., Sheromov M.A.* // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 1983. – **19**, Iss. 4. – P. 430 – 431.
19. *Boldyrev V.V., Alexandrov V.V., Korchagin M.A., Tolochko B.P., Gusenko S.N., Sokolov A.S., Sheromov M.A., Lyakhov N.Z.* // Dokl. Phys. Chem. – 1981. – **259**, N 5. – P. 722.
20. *Sharafutdinov M., Evdokov O., Naumov D., Pirogov B., Tolochko B., Alexandrov V., Pismenskaya E., Rogachev A.* // J. Synchrotron Radiat. – 2003. – **10**, N 5. – P. 384 – 386.
21. *Tolochko B.P., Aleshaev A.N., Fedotov M.G., Kulipanov G.N., Lyakhov N.Z., Luk'yanchikov L.A., Mishnev S.I., Sheromov M.A., Ten K.A., Titov V.M., Zubkov P.I.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2001. – **467-468** (PART II). – P. 990 – 993.
22. *Толочко Б.П., Маслий А.И., Ляхов Н.З.* // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1985. – **1**, № 2. – С. 54.
23. *Толочко Б.П., Маслий А.И., Шеромов М.А.* // Изв. СО АН СССР. Сер. Химия. – 1985. – **1**. – С. 48 – 54.
24. *Lyakhov N.Z., Maslii A.I., Tolochko B.P., Sheromov M.A.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1987. – **261**, № 1-2. – С. 209 – 215.
25. *Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н.* // Успехи физ. наук. – 1977. – **122**, № 3. – С. 369 – 418.
26. *Vlasov A.M., Zamaraev K.I., Kochubei D.I., Kozlov M.A., Shedrov M.A.* // Хим. физика. – 1983. – **6**. – P. 793.
27. *Zschech E., Blau W., Vega H., Kleinstrueck K., Mager S., Kozlov M.A., Sheromov M.A.* // Phys. Status Solidi (A) Appl. Res. – 1984. – **86**, N 1. – P. 117 – 124.
28. *Zschech E., Blau W., Kleinstück K., Hermann H., Mattern N., Kozlov M.A., Sheromov M.A.* // J. Non-Crystalline Solids. – 1986. – **86**, N 3. – P. 336 – 349.
29. *Синхротронное излучение в ИЯФ СО АН СССР: Библиогр. указатель.* – Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1986.