

УДК 621.384.639

РАБОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НОВОСИБИРСКОМ НАУЧНОМ ЦЕНТРЕ

© 2023 г. К. В. Золотарев^{1, 2, 3, *}, А. И. Анчаров^{1, 4}, З. С. Винокуров^{1, 2, 3}, Б. Г. Гольденберг^{1, 2},
Ф. А. Дарьин^{1, 2}, В. В. Кривенцов^{1, 3}, Г. Н. Кулипанов^{1, 2}, К. Э. Купер^{1, 2}, А. А. Легкодымов^{1, 2},
Г. А. Любас⁴, А. Д. Николенко^{1, 2, 3}, К. А. Тен^{1, 5}, Б. П. Толочко^{1, 4}, М. Р. Шарафутдинов^{1, 2, 4},
А. Н. Шмаков^{1, 2, 3}, Е. Б. Левичев^{1, 2}, П. А. Пиминов^{1, 2}, А. Н. Журавлев^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Федеральный исследовательский центр “Институт катализа имени Г.К. Борескова
Сибирского отделения Российской академии наук”, Центр коллективного пользования
“Сибирский кольцевой источник фотонов”, Кольцово, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Федеральный исследовательский центр
“Институт катализа имени Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук”, Новосибирск, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

⁵Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

*E-mail: K.V. Zolotarev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Описаны возможности Центра коллективного пользования “Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения” предоставляющего исследователям доступ к современным аналитическим методам на основе пучков синхротронного излучения для проведения широкого спектра научных работ. В настоящее время генеральное направление развития центра сосредоточено на разработке новых оригинальных подходов в использовании синхротронного излучения.

DOI: 10.31857/S0367676522701095, EDN: KNFFTM

ВВЕДЕНИЕ

Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения, образованный на базе Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск), является центром коллективного пользования и обеспечивает возможность использования синхротронного излучения и излучения лазера на свободных электронах в терагерцовом диапазоне спектра для исследовательских групп из других организаций.

Исследования с использованием СИ проводятся в центре более пятидесяти лет, поэтому можно сказать, что центр является одним из самых долговременно действующих подобных организаций во всем мире. Первые работы с ис-

пользованием СИ в центре начались в семидесятые годы двадцатого века.

Так как центр находится в Новосибирске, удобное географическое положение и большая концентрация научно-исследовательских институтов Сибирского отделения российской академии наук в окружении центра обеспечивают устойчивый спрос на возможности проведения мультидисциплинарных исследований с использованием СИ. Научные группы как из Новосибирска, так и из других крупных научных центров Сибири (Томск, Красноярск, Иркутск, Барнаул, Омск и др.) являются постоянными пользователями аналитических методик, организованных в центре.

На базе центра организовано квалифицированное пользовательское сообщество, позволяющее проводить эффективное использование синхротронного и терагерцового излучения для исследований в различных науках.

Большое количество университетов городов Сибирского научного кластера, обеспечивает постоянных приток молодых пользовательских кадров, специалистов по организации исследований с использованием излучений и для инженерного сопровождения исследовательского процесса.

Возможности центра по обеспечению различных исследований будут рассмотрены в следующих разделах.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЦСТИ

Как отмечалось ранее, основным направлением деятельности центра является организация исследований с использованием синхротронного излучения и терагерцового излучения лазеров на свободных электронах. Среди других направлений деятельности центра можно выделить следующие:

- разработка, создание и эксплуатация лазеров на свободных электронах;
- разработка и создание сильнополевых многополюсных сверхпроводящих устройств генерации излучений;
- разработка и производство магнитных элементов для различных ускорительных комплексов;
- разработка и производство уникальных высокоскоростных рентгеновских однокоординатных детекторов;
- участие в разработке, строительстве и подготовке научной программы ЦКП “Сибирский кольцевой источник фотонов” (СКИФ), участие в создании систем ускорительного комплекса и пользовательских станций;
- организация регулярных международных конференций SFR (Synchrotron and Free Electron Lasers Radiation, Generation and Applications);
- участие в университетских образовательных программах различного уровня, организация стажировок;
- международное сотрудничество.

Центр коллективного пользования зарегистрирован в национальном каталоге (<https://ckp-rf.ru/ckp/>), что позволяет участвовать в программе развития подобных центров и получать субсидии на развитие и обновление оборудования. Ежегодно проводящийся мониторинг центров подтверждает успешное функционирование центра, подтвержденное неоднократным удовлетворением подава-

емых заявок на выделение субсидий. Ежегодно в центре заключается около 50 пятилетних договоров о сотрудничестве с организациями пользователей. Заявки на проведение исследований можно подавать заполнением специальной формы на сайте центра (<https://ssrc.bioml.org/#!>). Ежегодно регистрируется около 200 заявок.

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В СЦСТИ

В настоящее время в центре используется два источника излучения СИ ВЭПП-3 и ВЭПП-4М. Оба источника образуют единый ускорительный комплекс. ВЭПП-4М является электрон-позитронным коллайдером для проведения экспериментов в области физики высоких энергий и позволяет получать встречные пучки электронов и позитронов с энергией до 4.75 ГэВ. Накопитель ВЭПП-3 используется для предварительного ускорения пучков до энергии 2 ГэВ и иногда для поляризации электронов перед их инжекцией в ВЭПП-4М. Первичные пучки электронов и позитронов поступают в ВЭПП-3 с энергией 360 МэВ из единого инжекционного комплекса ИЯФ, который также снабжает пучками электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000.

Накопитель ВЭПП-3 оборудован трехполюсным шифтером для генерации синхротронного излучения. Излучение транспортируется к экспериментальным станциям по специальным вакуумным каналам, оборудованным специальными системами коллимации пучков и радиационными затворами – фронтендами вывода излучений. Пользовательские станции расположены в специальном экспериментальном зале размером около $7 \times 14 \text{ м}^2$. В настоящее время используется 8 каналов вывода.

На коллайдере ВЭПП-4М генерация излучения для исследований производится с использованием специализированного 9-полюсного вигглера установленного в северном полукольце, а также в двух поворотных магнитах. Для генерации СИ используется только электронное направление. Экспериментальный зал для работ с использованием СИ на ВЭПП-4М имеет существенно большую площадь ($50 \times 15 \text{ м}^2$), что позволяет размещать станции большего размера.

Основные параметры накопителей-источников, устройств генерации и характеристики точек излучения представлены в табл. 1. Спектральные характеристики излучения (в виде плотности потока фотонов) представлены на рис. 1.

В связи с тем, что накопительный комплекс ВЭПП-3/ВЭПП-4М активно используется для экспериментов по физике высоких энергий, и большинство режимов в этих экспериментах не

Таблица 1. Основные параметры источников СИ в СЦСТИ

	ВЭПП-3	ВЭПП-4М, низкая энергия	ВЭПП-4М, высокая энергия	
			Поворотный магнит (1 Тл)	Многополюсный вигглер (1.95 Тл, 7 + 2 полюсов)
Энергия, ГэВ	2	1.9	4.5	
Длина орбиты, м	72	366		
Тип магнитной структуры	FODO	FODO		
Эмиттанс, нм · рад	~360	25	145	
Ток пучка, мА	150	20	20	
Количество сгустков	1, 2	1, 2	1, 2, 6, 17	
Устройства генерации	Трехполюсный шифтер (2 Тл)	Поворотный магнит (0.4 Тл)	Поворотный магнит (1 Тл)	Многополюсный вигглер (1.95 Тл, 7 + 2 полюсов)
Оптические функции β_x, β_y, η_x , м	2, 4.5, 0.7	9.64, 7.9, 0.9	7.5, 6.7, 1.15	9.7, 7.9, 1.16
Размеры источников $\sigma_x \times \sigma_y$, мм	0.9 × 0.3	2.3 × 0.1	3.5 × 0.2	1.5 × 0.25
Критическая энергия фотонов, кэВ	5.3	0.8	12	26.3
Количество каналов вывода	8	1	1	1 (3 станции)

совместимы с работами с использованием СИ, для последних выделяются временные интервалы (“заходы”). Общее количество выделяемого операционного времени на работы с использованием СИ обычно составляет 25% от общего времени функционирования комплекса. Режимы работ во время заходов предусматривают возможность одновременной работы на обоих накопителях. Выбор энергии пучков в обоих накопителях и распределение времени работ и моментов смены пучков в накопителях определяются исходя из планируемой программы исследований и в соответствии с пользовательскими заявками, которые формируются перед началом соответствующего захода. Протокол работ одного из заходов 2022 г. представлен на рис. 2. На графиках показаны значения токов пучка на накопителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4М (соответственно первый сверху и третий графики). Энергия пучков изображается цветом заштрихованных областей под кривыми значения тока. На втором сверху и на нижнем графике показаны состояния радиационных затворов на каналах вывода излучений и соответственно время проведения измерений с использованием СИ.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДИК

В данном разделе представлены краткие описания экспериментальных станций и реализуемых на них аналитических методиках.

Станции СИ ВЭПП-3

Станция “Прецизионная дифрактометрия и аномальное рассеяние”

Станция смонтирована на канале № 2 вывода СИ накопителя электронов ВЭПП-3 и предназначена для проведения исследований структуры и фазового состава поликристаллических материалов методами дифракции рентгеновского излучения с высоким инструментальным разрешением. В состав станции входят система коллимации, монохроматор, дифрактометр, радиационная защита и система автоматизации эксперимента. Апертура входного пучка СИ формируется горизонтальными и вертикальными входными танталовыми щелями, имеющими размеры соответственно ~0.1–2.5 и 5 мм. Расстояние от точки из-

лучения до входных щелей станции ~ 10 м. Для монохроматизации первичного “белого” пучка СИ используется совершенный плоский кристалл Si с прорезью по рабочей плоскости 111. Геометрические особенности кристалла позволяют получать монохроматическое излучение в диапазоне длин волн от ~ 0.07 до ~ 0.18 нм со степенью монохроматизации $\Delta\lambda/\lambda \sim (1-3) \cdot 10^{-4}$. Дифрактометр, установленный на станции, создан на базе двух прецизионных гониометров производства фирмы Microcontrol, обеспечивающих независимое движение образца и детектора с минимальным шагом по углу $2\Theta = 0.001^\circ$. Регистрация дифрагированного излучения осуществляется сцинтилляционным детектором “сцинтиллятор NaI(Tl) – фотумножитель ФЭУ-130”. Перед детектором установлен плоский совершенный кристалл-анализатор Ge(111), ориентированный под углом Брэгга к направлению дифрагированного пучка и играющий роль узкой “приемной щели”, обеспечивая высокое инструментальное разрешение дифрактометра.

На станции реализованы методики прецизионного определения параметров элементарной ячейки поликристаллических материалов, рентгенофазового анализа, дифракции под скользящим углом для исследования структуры и фазового состава приповерхностных слоев, определения микронапряжений и размеров областей когерентного рассеяния, а также гибридных дифракционно-спектральные методы, использующие возможность произвольного выбора рабочей энергии излучения и основанные на резонансных эффектах вблизи краев поглощения входящих в структуру химических элементов.

Станции “Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ”

Станция смонтирована на третьем канале вывода излучения из накопителя ВЭПП-3 проводятся неdestructивные исследования по определению элементного состава (от S до U), природных и техногенных образцов.

Станция состоит из основных модулей: монохроматор-“бабочка” Si (111), энергетическое разрешение $dE/E \sim 3 \cdot 10^{-4}$, рабочий диапазон энергий 6–41 кэВ; системы коллимации и фокусировки пучка СИ, в режиме коллимации в диапазоне 50×50 мкм²– 2×12 мм², в режиме фокусировки 10×10 мкм²– 100×100 мкм² системы 3D подвижек образца с шагом 1 мкм–10 мм; детекторы Si(Li) Oxford Pentafet, Amptek XR100SDD и Hitachi Vortex ex-60. Обработка данных производится в программах AXIL и РумСА. Определение концентрации проводится методом внешнего стандарта, имеются собственные разработки для анализа методом фундаментальных параметров.

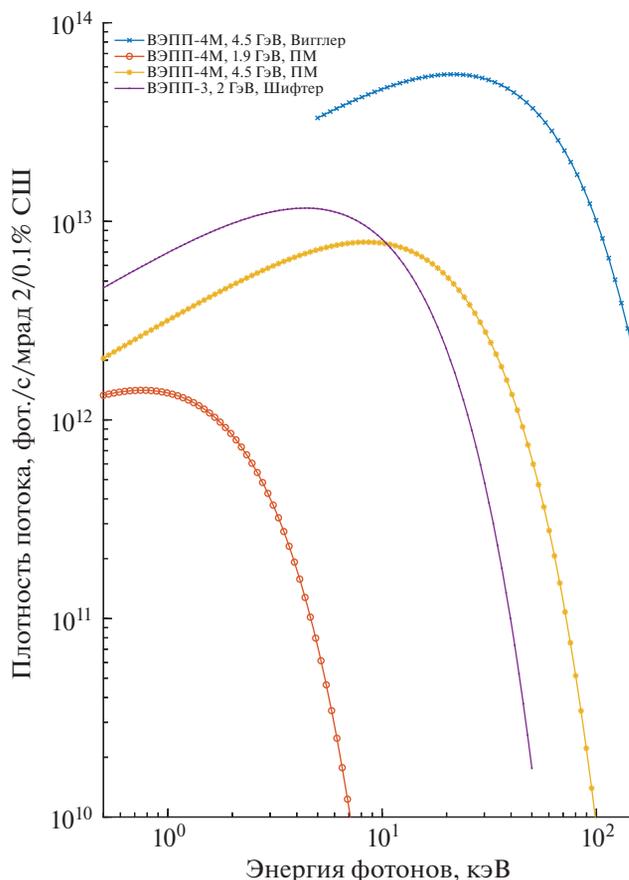


Рис. 1. Спектральные зависимости плотностей фотонных потоков основных устройств генерации излучений в СЦСТИ.

Аналитические исследования могут быть проведены в следующих экспериментальных режимах:

1. Анализ дискретных и протяженных образцов длиной до 300 мм. В этом режиме протяженные образцы сканируются с минимальным шагом 100 мкм, ширина пучка на образце задается выходными щелями монохроматора в диапазоне от 0.05–11 мм, а размер по высоте – набором щелей от 100 мкм до 2 мм.

2. Конфокальная рентгеновской микроскопия (КРМ) в 2D и 3D вариантах. Модуль КРМ позволяет проводить исследования образца с высоким пространственным разрешением в однолинзовой схеме или конфокальной [1]. Исследование проводится за счет перемещения образца по трем координатам с минимальным шагом 0.1 мкм, максимальный размер исследуемой области составляет 25.4 мм по трем координатам. Размеры фокусного пятна на образце или конфокального объема (для двулинзовой схемы) можно изменять с учетом аппаратной функции прибора [2, 3]. Ха-

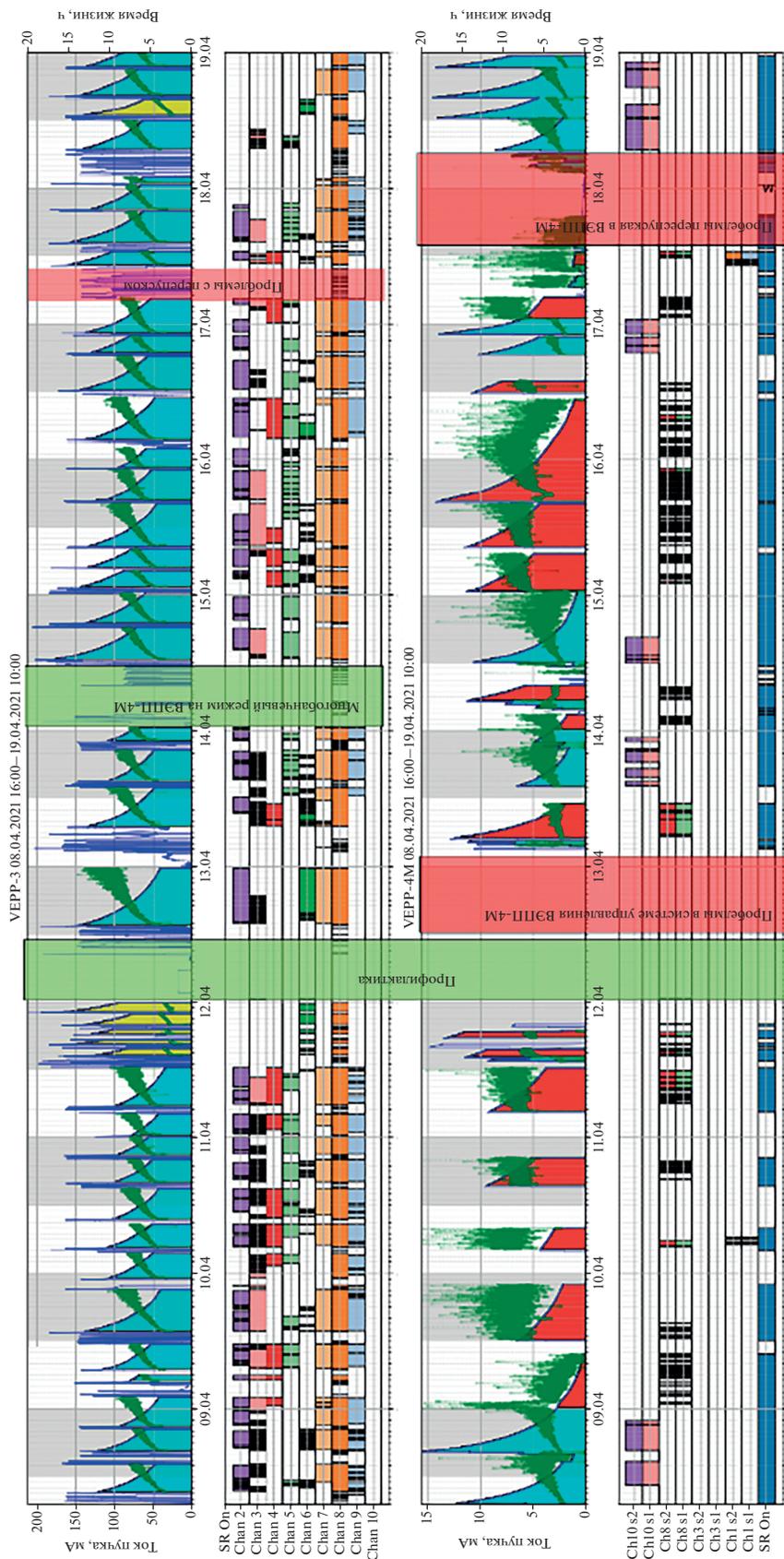


Рис. 2. Протокол работ с использованием СИ (заход 08-19.04.2022).

ракетные размеры конфокального объема составляют от 10 до 50 мкм.

3. Полное внешнее отражение (ПВО). В этом режиме используются два детектора, закрепленные сверху и сбоку от образца.

На станции разработаны и аттестованы три методики измерений: “Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3” [4], “Методика выполнения измерений при проведении рентгенофлуоресцентного анализа с использованием рентгеновской концентрирующей оптики (поликапиллярные линзы)” [5] и “Конфокальная рентгеновская микроскопия в диапазоне энергий 12–26 кэВ на основе поликапиллярной оптики”.

Станция “Высокие давления”

Станция установлена на канале СИ № 4 ВЭПП-3. Предназначена для исследования структуры вещества с использованием излучения с энергией 33 кэВ.

При уменьшении длины волны используемого рентгеновского излучения, происходит уменьшение углов дифракции, и все дифракционные максимумы смещаются в область малых углов. Поэтому появляется возможность, с помощью плоского двухкоординатного детектора зарегистрировать основную набор дифракционных максимумов. Использование двухкоординатного детектора дает возможность получать информацию не только о положении и интенсивности дифракционных колец, но и о распределении интенсивности по кольцу.

Для исследований, проводимых на станции, были разработаны следующие методики:

- *In situ* дифрактометрия для исследования структурных изменений, происходящих в ходе химических реакций при высоких температурах.
- Рентгендифракционные исследования при высоких давлениях в алмазных наковальнях [6].
- Проведение рентгендифракционных исследований структуры веществ в условиях низких температур.
- Проведение рентгендифракционных исследований структуры веществ в условиях сдвига под давлением.
- Методика выполнения измерений температурного коэффициента линейного расширения кристаллических веществ методом дифракции синхротронного излучения с использованием рентгеновского двухкоординатного детектора.

- Фазовый анализ сварных швов алюминиевых сплавов при сканировании пучком СИ микронных размеров.

В последние годы получены интересные результаты:

– при исследовании двойных карбонатов К-Са с различной стехиометрией К:Са в широком диапазоне P - T , выявлены новые интересные особенности механизмов сжатия структуры, которые свидетельствуют об ограниченном распространении карбонатов щелочных металлов в виде кристаллических фаз в глубинноземных условиях.

– исследована эволюция структурно-фазового состава сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых и алюминиево-литиевых сплавов с помощью СИ и показано, что при лазерной сварке сплава Д16Т на границе дендрита в сварном шве формируются мелесодержащие стабильные фазы $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ и $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ [7].

Станция “Рентгеновская микроскопия и томография”

Станция “Рентгеновская микроскопия и томография” создана на базе канала вывода СИ № 5-А из ускорителя электронов ВЭПП-3. Источником СИ является вигглер с магнитным полем 2 Тл, расположенным на расстоянии 15 м от места размещения объекта исследования. На станции проводятся эксперименты, позволяющие исследовать структуру образца на микрометровом уровне методами рентгеномископии, топографии и томографии. Возможности станции позволяют работать как с монохроматическим, так и с полихроматическим рентгеновским излучением. Для монохроматизации пучка СИ используется монокристалл кремния с вырезанным каналом и рабочей плоскостью (111), находящийся на расстоянии 12 м от источника излучения. Монохроматор позволяет работать с энергетическим спектром излучения в диапазоне от 5 до 45 кэВ. Рабочее поле исследования образца составляет $3 \times 3 \text{ мм}^2$. В качестве детектора рентгеновского излучения используется ПЗС матрица с размером 2048×2048 пикселей ORCA Flash4.0 v3 фирмы “Hamamatsu” и сцинтиллятор GGAG толщиной 10 мкм. Приведенный размер пикселя в соответствии оптической системой детектора составляет $1.65 \times 1.65 \text{ мкм}^2$. Система окружения образца позволяет проводить исследования при давлениях до 10 МПа и температуре до -40°C [8].

Станция “Дифракционное кино”

Станция “Дифракционное кино” установлена на канале СИ № 5-Б ВЭПП-3. Она предназначена для исследования изменения структуры веще-

ства во время химических твердотельных реакций, и под воздействием различных внешних воздействий — высокой/низкой температуры, давления и т.п., а также для исследования слабо рассеивающих объектов [9–11].

Из “белого” пучка синхротронного излучения с помощью изогнутого кристалла Si(111) вырезается и фокусируется на детектор монохроматическое излучение с $\Delta E/E \sim 10^{-3}$. На текущий момент длина волны составляет ~ 1.5 А.

Дифрагированное образцом излучение регистрируется однокоординатным детектором ОД-3 или двухкоординатным SX-165 CCD. Безпараллаксный детектор ОД-3 с фокусным расстоянием 350 мм имеет 3328 каналов, угол регистрации ~ 30 градусов, максимальную загрузку — около 10 МГц, минимальное время кадра — 1 мкс, максимальное количество кадров — 64 (при максимальном угловом разрешении).

На станции реализованы методики:

- порошковая дифрактометрия с временным разрешением (режим “кино”);
- малоугловое рентгеновское рассеяния;
- высокотемпературная дифрактометрия;
- аномальное рассеяние на К-краю никеля;
- дифрактометрия самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [12].

Станция оснащена уникальным оборудованием:

- однокоординатным детектором ОД-3;
- двухкоординатными детекторами SX-165 CCD и EIGER2 R 1M;
- криогенной гелиевой камерой с диапазоном температур 4–400 К.

Один из последних экспериментов на станции — изучено *in situ* влияние γ -облучения на макрокинетические параметры синтеза во время теплового взрыва [13]. Установлено, что воздействие γ -облучения на механоактивированную порошковую смесь состава Ti 64 мас. % + Al приводит к изменению тепловых параметров горения: максимальная температура синтеза и скорость горения снижаются. Скорость нагрева необлученной смеси составляет 204.8 К/с, а облученной — 81.6 К/с. Рассчитаны зависимости массовых долей синтезированных соединений от времени и температуры от стадии предварительного нагрева до завершения теплового взрыва. Однофазный равновесный продукт состава γ -(TiAl) образуется в γ -облученной механоактивированной смеси. Синтезированный продукт горения без γ -облучения имеет сложный фазовый состав: 72% γ -(TiAl); TiAl₃ (26%) и остаточный Ti (2%).

Станция “LIGA-технология и рентгеновская литография”

Станция расположена на нулевом (центральном) канале вывода излучения из шифтера на накопителе ВЭПП-3. Станция предназначена для отработки следующих технологических процессов:

- Методика глубокой рентгеновской литографии в “жестком” спектре (10–20 кэВ) в толстых (до 1 мм и более) резистивных слоях для изготовления микроструктур, в том числе рентгеношаблонов.
- Субмикронная рентгенолитография в “мягком” спектре (3–7 кэВ, при энергии электронов 1.2 ГэВ) для формирования в тонких слоях резистов микроструктур с размером топологии 0.5 мкм.
- Исследование воздействия синхротронного излучения на свойства материалов.

Станция оборудована комплектом прецизионной микромеханики для точного перемещения образцов во время проведения экспозиции.

Для выполнения ряда задач с использованием мягкого рентгеновского излучения на накопителе ВЭПП-3 отработан специальный режим работ с энергией пучка 1.2 ГэВ.

После настройки процесса экспозиции образцов основные работы выполняется в автоматическом режиме без участия операторов.

Для проведения сопутствующих работ, связанных с LIGA-технологией в центре оборудовано специализированное технологическое помещение для обработки подложек и резистов “Чистая комната” (ранее ISO 5, ныне ISO 6-7), оснащенное системой рециркуляции и очистки воздуха, лабиринтно-вытяжными шкафами (4 шт.) и лабораторным оборудованием для обработки и исследования резистов:

- Полировальная установка POLI-300.
- Центрифуга для нанесения резиста SCS P — 6708D, Cookson Electronics.
- Вакуумный сушильный шкаф.
- УЗ ванна для проявления резистов.
- Оптический профилометр.
- Оптический микроскоп KEYENCE VHX-5000.
- сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N.
- Спектрофотометр Shimadzu UV-3600 Plus

Станция “Субмикросекундная диагностика”

Станция установлена на канале СИ ВЭПП-3 № 0-б и предназначена для исследования быстро-

протекающих процессов, таких как детонация, ударные волны, горение и др. На ней можно проводить эксперименты с использованием до 50 г взрывчатого вещества (ВВ) [14, 15].

На станции используется полихроматическое излучение из вигглера с полем 2 Тл.

Особенностью станции является использование взрывной камеры ВК-005 с тонкими входными/выходными бериллиевыми окнами для прохода пучка СИ и системой подавления ударной волны.

Важными элементом станции является коллиматор Кратки, формирующий безфоновый пучок микронных размеров для экспериментов с использованием методик малоуглового рентгеновского рассеяния или осесимметричной рентгеновской томографии.

Определяющее звено станции – система регистрации на основе быстрого однокоординатного детектора DIMEX [16]. Система регистрации обеспечивает регистрацию излучения от одного банча электронов длительностью 1 нс. Как правило эксперименты по исследованию детонации проводятся с двумя банчами электронов в ВЭПП-3 с временным интервалом между ними в 125 нс. В этом режиме детектор регистрирует 100 кадров с общим временем 12.5 мкс, что вполне достаточно для съема всей информации о детонационном процессе.

На станции реализованы методы измерения распределения плотности (осесимметричная томография) и рентгеновского малоуглового рассеяния с временным разрешением 1 нс.

На станции проведено исследование двух сходящихся ударных волн в практически важных для ВНИИТФ материалах, что позволило получить информацию об их взаимодействии. Ранее во ВНИИТФ был проведен аналогичный эксперимент с использованием манганиновых датчиков, но результаты этого эксперимента не удалось проинтерпретировать из-за их недостоверности.

Исследованы процессы на внешней границе металлов при воздействии на них ударных волн (эффект Рэля–Тэйлора – “пыление”). Обнаружено возникновение наночастиц в потоках “пыли”. Эксперименты с СИ позволили провести калибровку методик ВНИИТФ, использующих лазерный доплер эффект и пьезо-датчики. Данная калибровка позволит корректно проводить эксперименты во ВНИИТФ [17, 18].

Станция укомплектована взрывной камерой ВК-005 и PDV лазерным измерителем скорости.

*Станция in situ
поликристаллической рентгеновской дифракции
“Прецизионная дифрактометрия-2”*

Станция смонтирована на шестом канале вывода СИ накопителя электронов ВЭПП-3 (ЦКП “СЦСТИ”, Новосибирск, Россия). Комплекс станции включает однокристалльный монохроматор с возможностью изменения длины волны излучения ($\lambda = 0.10084, 0.16467$ и 0.17153 нм), систему коллимации и рентгеновский дифрактометр с однокоординатным позиционно-чувствительным детектором ОД-3М [19]. Дифрактометр оснащен высокотемпературной камерой-реактором ХРК-900 (Anton Paar, Австрия) и системой подачи газов (до 3 различных газовых смесей со скоростью до 200 мл/мин) на базе контроллеров расходов газов SmartTrak 50 (Sierra Instruments, США) для проведения исследований в реакционных средах до 900°C . Для контроля газовой среды на станции предусмотрено использование квадрупольного масс-спектрометра UGA100 (SRS, США). Также на станции возможно использование высокотемпературной вакуумной камеры НТК2000 (Anton Paar, Австрия) для проведения исследований покрытий на термостойкость в условиях вакуума ($\sim 10^{-4}$ мбар) до 2300°C и жаростойкость на воздухе (1 атм) до 1500°C . Решаемые на станции задачи в основном включают регистрацию методом рентгеновской дифракции термически или реакционно индуцированных процессов с временным разрешением от 1 с до 5 ч [20–22].

*Экспериментальная станция
“Люминесценция с временным разрешением”*

Станция “Люминесценция с временным разрешением” установлена на канале СИ № 6-6 ВЭПП-3. Предназначена для исследования рентгеновской флуоресценции, люминесценция с пикосекундным временным разрешением и изучения быстропротекающих процессов в стробоскопическом режиме.

Диапазон энергии возбуждения 3–62 кэВ.

Для исследований, проводимых на станции, были разработаны следующие методики:

- спектроскопия рентгеновской флуоресценции;
- люминесценция с пикосекундным временным разрешением.

В последние годы получены интересные результаты:

1. Проведено экспериментальное исследование люминесценции образцов ПММА с молекулярной массой в диапазоне $0.2 \cdot 10^6$ – $6 \cdot 10^6$ при возбуждении СИ пучка в диапазоне 3–60 кэВ.

Установлено, что с увеличением молекулярной массы ПММА максимум полосы люминесценции ПММА смещается в длинноволновую сторону (красное смещение), а время затухания люминесценции уменьшается. Также наблюдается увеличение ширины полосы люминесценции с увеличением молекулярной массы. Эти эффекты объясняются упорядочением структуры полимера и увеличением плотности, что приводит к уменьшению межатомных расстояний и, следовательно, к смещению электронных уровней и изменению их ширины [23].

2. С целью установления роли различных катионных подрешеток хризоберилла BeAl_2O_4 в процессах автолокализации электронных возбуждений (ЭВ) получены спектры рентгеновской флуоресценции (СРФ), возбуждаемой в области L-края поглощения алюминия и K-края поглощения бериллия. В обоих случаях наблюдаются признаки проявления релаксации катионных возбуждений в виде длинноволнового плеча резонансного пика возбуждающих фотонов спектров рентгеновской флуоресценции. Потери энергии на релаксацию ЭВ, оцененные по величине длинноволнового плеча, больше в случае релаксации катионных экситонов, возбуждаемых в подрешетке бериллия. Таким образом, можно заключить, что для кристаллов хризоберилла наблюдается участие обеих катионных подрешеток в процессах релаксации ЭВ. На основании сравнения потерь энергии на автолокализацию экситонов в спектрах фотолуминесценции (СФЛ) и спектрах рентгеновской флуоресценции СРФ можно предположить, что полоса собственной люминесценции 3.9 эВ кристаллов BeAl_2O_4 обусловлена излучательным распадом анионных автолокализованных экситонов (АЛЭ) в бериллийкислородных тетраэдрах, а полоса свечения 5.2 эВ – распадом АЛЭ в алюминий-кислородных полиэдрах [24].

Экспериментальная станция “EXAFS-спектроскопия”

Станция располагается на восьмом канале вывода излучения из шифтера ВЭПП-3 и предназначена для получения спектров рентгеновского поглощения (XANES и EXAFS) различных, как правило, рентгеноаморфных образцов, в жидкофазном, твердом и высокодисперсном состояниях. Полученные данные позволяют определять электронное строение, а также структуру – параметры локального окружения (координационные числа, межатомные расстояния) относительно исследуемых атомов, в том числе и для образцов, для которых неприемлемы рентгенографические структурные методы.

Основные технические характеристики станции “EXAFS-спектроскопия”:

Исследуемые химические элементы – элементы начиная с Ti; Энергетический диапазон работы 4–33 кэВ; Погрешность измерения коэффициента поглощения рентгеновского излучения: 0.2%; Концентрации изучаемого элемента: 0.01–100 мас. %; Область измеряемых межатомных расстояний: 1.5–8 Å ($\pm 1\%$); Погрешность определения координационных чисел: $\pm 10\%$; Погрешность определения фактора Дебая: $\pm 40\%$.

В настоящее время установка используется для исследования методами XANES и EXAFS спектроскопии высокодисперсных объектов, функциональных наноматериалов и катализаторов, для которых стандартные рентгеноструктурные методы неинформативны. В зависимости от применяемой методики анализируются: объем, поверхность либо приповерхностные слои. Реализованы 3 методики записи XANES и EXAFS спектров: “на пропускание”, полного фототока, по выходу рентгеновской флуоресценции. Разработаны уникальные методики подготовки образцов для съемки реакционно-активных соединений и катализаторов в инертных условиях.

Станции СИ ВЭПП-4М

На накопителе ВЭПП-4М в настоящее время действует 6 станций. Три из них используют излучение из многополюсного вигглера. Остальные установлены на каналах вывода излучения из поворотных магнитов ВЭПП-4М. Станции СИ ВЭПП-4М описаны в следующих разделах.

Технологическая станция СИ, ВЭПП-4

На канале № 1 вывода СИ из накопителя ВЭПП-4М создана специализированная “Технологическая станция”, предназначенная для практического обучения студентов ВУЗов основам синхротронных методов исследования и тестирования элементов аппаратуры для синхротронных экспериментов. В создании станции и реализации методик принимают непосредственное участие студенты, Новосибирских ВУЗов различных специальностей в рамках выполнения курсовых и дипломных работ. Студенты участвуют в конструировании и сборки, разрабатывают методики проведения экспериментов и программное обеспечение для автоматизации аппаратуры станции. Модульная концепция построения станции позволяет вводить станцию в эксплуатацию поэтапно, модернизировать ее, и реализовать различные исследовательские методы.

Модульная концепция подразумевает возможность изменения конфигурации экспериментов и развития станции.

На станции проводятся учебно-демонстрационные работы для ознакомления с основами исследований на синхротронном излучении:

- техника безопасности при проведении исследований на СИ,
- измерение пространственного распределения мощности СИ,
- изучение работы и настройка монохроматора в диапазоне 6–24 кэВ,
- формирование заданных параметров излучения для последующих исследований,
- исследование взаимодействия СИ с веществом (поглощение, рентгенофлуоресцентный анализ).

Планируемое развитие станции основано на постановке на канал дифрактометра Mardtb с 2D гибридно-пиксельным детектором Pilatus 1M (Dectris, Швейцария). Это позволит эффективным образом реализовать на станции комплекс дифракционных методов, а именно порошковую дифракцию и рентгеноструктурный анализ монокристаллов, включая и макромолекулярную кристаллографию.

Станция “Экстремальное состояние вещества”

Станция установлена на канале СИ ВЭПП-4 № 8-б. Станция предназначена для исследования поведения вещества при давлениях до 300 кбар и температурах до 10000°C реализуемых при детонации и ударно-волновом нагружении [25].

На станции реализованы методы измерения распределения плотности (осесимметричная томография) и рентгеновского малоуглового рассеяния с временным разрешением 70 пс [26–28].

Измерено распределение плотности в зоне разлета практически важных для ВНИИТФ взрывчатых веществ больших размеров (до 200 г ТНТ) с временным разрешением 70 пс и статистической точностью 3%. Полученные данные были использованы для коррекции расчетов, выполняемых на суперкомпьютере ВНИИТФ.

Выполнено исследование динамики образования (нуклеации) продуктов детонации практически важных для ВНИИТФ взрывчатых веществ (впервые в мире), в том числе больших размеров (200 г ТНТ). Диапазон размеров измеряемых наночастиц зародышей 1–600 Å. Эти размеры зарядов соответствуют реально используемым боевым зарядам. Это принципиально, так как детонационные процессы зависят от размеров взрывчатки (масштабный эффект). Аналогичные эксперименты в мире не проводятся, но планируются

в Argonne National Laboratory (США). Полученные данные позволили модернизировать коды суперкомпьютера ВНИИТФ, добавив в них расчет процесса нуклеации продуктов детонации.

На станции проводится тестирование быстрых однокоординатных детекторов, разрабатываемых в ИЯФ СО РАН специально для исследования быстропротекающих процессов [29].

Станция укомплектована следующим уникальным оборудованием: взрывная камера ВК-200, пневматическое нагружающее устройство, скоростная фотокамера НАНОГЕЙТ.

Станция “Жесткая рентгенокопия”

Станция создана на базе канала вывода СИ № 8 из ускорителя электронов ВЭПП-4М. Источником СИ является 9-полюсный вигглер с магнитным полем 1.92 Тл, расположенным на расстоянии 33 м от места размещения объекта исследования. Станция предназначена для проведения исследований методами рентгеновской дифракции, флуоресцентного анализа и компьютерной томографии в жестком энергетическом диапазоне от 30 до 120 кэВ. Для выделения рабочей длины волны из энергетического спектра СИ используется двух-кристальный монохроматор, созданный на базе монокристалла кремния (111), работающий в параллельной брегговской геометрии.

Для проведения исследований фазового состава методами рентгеновской дифракции используется детектор Mar345s обладающий высокой квантовой эффективностью и динамическим диапазоном регистрации 17 Бит.

Оригинальная система, обеспечивающая аэродинамическую левитацию, позволяет производить, нагрев шарообразного образца до температуры плавления и исключает возможность взаимодействия с материалом ячейки. Нагрев осуществляется непрерывным лазерным излучением, что обеспечивает возможность рентгеноструктурных исследований образцов при температурах свыше 2000°C [30].

Рентгенофлуоресцентный анализ проводится с использованием энергодисперсионного германиевого детектора фирмы “Canberra” с рабочей площадью 100 мм² и толщиной кристалла 10.5 мм. Энергетический диапазон СИ использующийся на станции позволяет получать информацию о концентрации “тяжелых” элементов с точностью 1 ppm. При проведении рентгенофлуоресцентного анализа предусмотрена возможность картирование образца с шагом 100 мкм.

Также на станции предусмотрена возможность получения томографических данных о структуре образцов размером до 100 мм в диаметре с про-

странственным разрешением не хуже 100 мкм [31]. Для томографической съемки используется детектор DM-20-08K10-00-R фирмы “Teledyne Dalsa”, позволяющий получать 16 битные широкоформатные изображения.

Станция “Плазма”

Станция установлена на канале СИ № 8-с ВЭПП-4 и предназначена для исследования поведения материалов стенок термоядерного реактора ITER при ELM – неустойчивости (Edge-Localized Mode instability), сопровождающейся сбросом энергии 100 Дж за время порядка 100 нс.

Пластины дивертора ITER будут сделаны из вольфрама, который может разрушиться при импульсном нагреве. Причинами образования трещин являются деформации и механические напряжения, вызванные резким повышением температуры тонкого поверхностного слоя.

Станция “Плазма” разработана для динамических измерений деформаций и механических напряжений в вольфраме при импульсном нагреве во время ELM сброса, которое моделируется лазерным импульсным излучением длительностью 100 нс с энергией до 100 Дж и длиной волны 1 мкм. Регистрация рентгенограмм осуществляется быстрым однокоординатным детектором DIMEX [32].

Первые результаты были получены на монокристаллическом вольфраме [33]. Наблюдаемая эволюция формы дифракционного пика согласуется с теоретическими предсказаниями, основанными на расчетах деформации, вызванной импульсным нагревом. Деконволюция распределения остаточных напряжений показала хорошее согласие с теоретической моделью распределения деформаций в тонком поверхностном слое образца при импульсном нагреве. Обнаружены три четко различимые стадии эволюции дифракционного пика, коррелирующие с эволюцией температурных и деформационных распределений. Остаточная пластическая деформация возрастала при последующих импульсах нагрева и приводила к разрушению образца, что сопровождалось раздвоением наблюдаемого дифракционного пика.

Кроме того, были проведены первые эксперименты по измерению дифракции на поликристаллическом вольфраме. Для этого эксперимента разрабатывается специальный детектор.

Станция “Космос”

Станция изначально была предназначена для проведения широкого круга метрологических работ по калибровке различного рода детекторов,

оптических элементов, а также целых модулей, работающих с излучением мягкого рентгеновского диапазона. Широкодиапазонный монохроматор, который был сконструирован для этих целей, использовал многослойные зеркала и позволял покрыть спектральный диапазон 30–3000 эВ и обеспечить спектральное разрешение, достаточное для проведения большинства метрологических измерений [34, 35]. Также монохроматор использовался для выполнения работ в ВУФ области. В этом случае на механизме монохроматора устанавливалось зеркало полного внешнего отражения и дифракционная решетка. Для подавления кратных порядков использовался MgF_2 , обеспечивающий эффективную работу в ВУФ диапазоне 11.5–23 А. С использованием этого монохроматора в промежутке 2015–2021 гг. была прокалибрована спектральная чувствительность трех полетных образцов прибора ВУСС-Э для трех космических миссий “Электро-Л” № 3, № 4 и № 5 [36]. При использовании в составе монохроматора кристаллов кремния Si(111) его спектральное разрешение возросло до $\Delta E/E = 10^{-4}$ во всем рабочем диапазоне 2000–9000 эВ [37], что позволило проводить измерения спектральных свойств (спектральное разрешение, пиковый коэффициент отражения) для рентгеновских кристаллов. Были проведены измерения для кристаллов RbAP, слюды и кремния. Также, для проведения спектроскопических измерений для станции “Космос” был изготовлен новый двухкристалльный монохроматор, на котором оба кристалла были установлены на одном гониометре. При изготовлении кристаллов угол между поверхностью кристалла и кристаллографической поверхностью Si(111) был выбран равным приблизительно 0.3° , при этом кристаллы на механизме монохроматора были установлены в антипараллельной схеме, в результате чего направление полного внешнего отражения и направление луча, диафрагмировавшего от кристаллографической плоскости, отличаются друг от друга на 0.6° , что позволяет избежать паразитной длинноволновой засветки детектора без использования фильтров. Такая геометрия существенно повышает светосилу двухкристалльного монохроматора. На двухкристалльном монохроматоре проведен ряд измерений XAFS спектров вблизи краев К-краев химических элементов P, S, Cl, Ti, Cu и L-краев Mo, Nb [38–40].

В работе использовалось оборудование ЦКП “СЦСТИ” на базе УНУ “Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000” в ИЯФ СО РАН.

Работы связанные с совершенствованием станции “LIGA-технология и рентгеновская литография” и оснащением “чистой комнаты” вы-

полнены в рамках Соглашения с Минобрнауки России № 075-15-2021-1359.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дарьин Ф.А., Ракиун Я.В., Сороколетов Д.С. и др. // Ядерн. физ. и инж. 2017. Т. 8. № 1. С. 86.
2. Сороколетов Д.С., Ракиун Я.В., Дарьин Ф.А. // Автометрия. 2015. № 3. С. 94.
3. Сороколетов Д.С., Ракиун Я.В., Дарьин Ф.А., Гогин А.А. // Автометрия. 2022. Т. 58. № 1. С. 68.
4. Дарьин А.В., Ракиун Я.В. // Науч. вестн. Новосиб. гос. тех. ун-та. 2013. № 2(51). С. 112.
5. Дарьин А.В., Ракиун Я.В. // Науч. вестн. Новосиб. гос. тех. ун-та. 2013. № 2(51). С. 119.
6. Бадретдинова Л.Х., Костицын О.В., Смирнов Е.Б. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 1. С. 21; Badretdinova L.K., Kostitsyn O.V., Smirnov E.B. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 1. P. 15.
7. Malikov A., Orishich A., Vitoshkin I. et al. // J. Manufact. Process. 2021. V. 64. P. 620.
8. Drobchik A.N., Nikitin V.V., Fokin M.I. et al. // J. Synchrotron. Rad. 2022. V. 29. P. 515.
9. Evdokov O.V., Titov V.M., Tolochko B.P., Sharafutdinov M.R. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2009. V. 603. No. 1–2. P. 194.
10. Sharafutdinov M.R., Korchagin M.A., Shkodich N.F. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2007. V. 575. No. 1–2. P. 149.
11. Ancharova U.V., Mikhailenko M.A., Tolochko B.P. et al. // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Engin. 2015. V. 81. No. 1. Art. No. 012122.
12. Александров В.Е., Долголанцев А.В., Иоффе В.Б. и др. // ФГВ. 1983. № 4. С. 17; Aleksandrov V.V., Korchagin M.A., Tolochko B.P., Sheromov M.A. // Combust. Explos. Shock Waves. 1983. V. 19. No. 4. P. 430.
13. Loginova M., Sobachkin A., Sitnikov A. et al. // J. Synchrotron Rad. 2019. V. 26. P. 1671.
14. Аульченко В.М., Жуланов В.В., Кулипанов Г.Н. и др. // УФН. 2018. Т. 188. № 6. С. 577; Aulchenko V.M., Zhulanov V.V., Kulipanov G.N. et al. // Phys. Usp. 2018. V. 61. No. 6. P. 515.
15. Ten K.A., Aulchenko V.M., Lukjanchikov et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2009. V. 603. No. 1–2. P. 102.
16. Aulchenko V.M., Baru S.E., Evdokov O.V. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2010. V. 623. No. 1. P. 600.
17. Ten K.A., Prueel E.R., Kashkarov A.O. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1147. No. 1. Art. No. 012020.
18. Ten K.A., Пруэл Э.Р., Кашкаров А.О. и др. // ФГВ. 2018. Т. 54. № 5. С. 103; Ten K.A., Prueel E.R., Kashkarov A.O. // Combust. Explos. Shock Waves. 2018. V. 54. No. 5. P. 606.
19. Aulchenko V.M., Evdokov O.V., Kutovenko V.D. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2009. V. 603. No. 1–2. P. 76.
20. Rempel S.V., Eselevich D.A., Vinokurov Z.S. et al. // Ceram. Int. 2022. V. 48. No. 2. P. 2843.
21. Mishchenko D., Vinokurov Z., Gerasimov E. et al. // Crystals. 2022. V. 12. No. 3. P. 344.
22. Kaichev V.V., Vinokurov Z.S., Saraev A.A. // Catal. Sci. Technol. 2021. V. 11. No. 13. P. 4392.
23. Lyubas G.A., Tolochko B.P., Ancharov A.I. et al. // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. Art. No. 050007.
24. Иванов В.Ю., Зинин Э.И., Пустоваров В.А. // Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 10. С. 28; Ivanov V.Yu., Zinin E.I., Pustovarov V.A. // J. Surf. Invest. X-Ray. Synchrotron. Neutron. Tech. 2015. V. 9. No. 5. P. 1016.
25. Tolochko B.P., Kosov A.V., Evdokov O.V. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 427.
26. Rubtsov I.A., Ten K.A., Prueel E.R. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1147. No. 1. Art. No. 012038.
27. Смирнов Е.Б., Музыря А.К., Костицын О.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 1. С. 27; Smirnov E.B., Muzyrya A.K., Kostitsyn O.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 1. P. 20.
28. Пруэл Э.Р., Ten K.A., Толочко Б.П. и др. // ДАН. 2013. Т. 448. № 1. С. 38; Prueel E.R., Ten K.A., Tolochko B.P. // Dokl. Phys. 2013. V. 58. No. 1. P. 24.
29. Aulchenko V.M., Evdokov O.V., Shekhtman L.I. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2009. V. 603. No. 1–2. P. 73.
30. Ivanov I.A., Dub V.S., Karabutov A.A. et al. // Sci. Reports. 2021. V. 11. No. 1. Art. No. 23501.
31. Marusin V.V., Kuper K.E. // Precambrian Res. 2020. V. 340. Art. No. 105627.
32. Aulchenko V., Shekhtman L., Zhulanov V. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2017. V. 845. P. 169.
33. Arakcheev A.S., Aulchenko V.M., Balash I.I. et al. // J. Synchrotron Rad. 2019. V. 26. P. 1644.
34. Николенко А.Д., Авакян С.В., Афанасьев И.М. и др. // Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2012. № 5. С. 13; Nikolenko A.D., Avakyan S.V., Afanasiev I.M. et al. // J. Surf. Invest. X-Ray. Synchrotron. Neutron. Tech. 2012. V. 6. P. 388.
35. Ахсахалян А.А., Вайнер Ю.А., Гарахин С.А. и др. // Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 1. С. 14; Akhsakhalyan A.A., Weiner Yu.A., Garakhin S.A. et al. // J. Surf. Invest. X-Ray. Synchrotron. Neutron. Tech. 2019. V. 13. P. 1.
36. Нусинов А.А., Алексеева А.В., Заверткин П.С. и др. // Гелиогеофиз. исслед. 2020. № 26. С. 31.
37. Заверткин П.С., Ивлюшкин Д.В., Машковцев М.Р. и др. // Автометрия. 2019. Т. 55. № 2. С. 5.
38. Федоренко А.Д., Семушкина Г.И., Перегудова Н.Н. и др. // ЖСХ. 2021. Т. 62. № 6. С. 921; Fedorenko A.D., Semushkina, G.I., Peregudova N.N. // J. Struct. Chem. 2021. V. 62. P. 853.
39. Федоренко А.Д., Фоменко Я.С., Гонгола М.И. и др. // ЖСХ. 2021. Т. 62. № 10. С. 1636; Fedorenko A.D., Fomenko I.S., Gongola M.I. et al. // J. Struct. Chem. 2021. V. 62. P. 1531.
40. Korotaev E.V., Syrokvashin M.M., Filatova I.Y. et al. // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. No. 1. Art. No. 080004.

Synchrotron radiation-based works at the Novosibirsk research center

**K. V. Zolotarev^{a, b, c, *}, A. I. Ancharov^{a, d}, Z. S. Vinokurov^{a, b, c}, B. G. Goldenberg^{a, b}, F. A. Darin^{a, b},
V. V. Kriventsov^{a, c}, G. N. Kulipanov^{a, b}, K. E. Cooper^{a, b}, A. A. Legkodymov^{a, b}, G. A. Lyubas^d,
A. D. Nikolenko^{a, b, c}, K. A. Ten^{a, e}, B. P. Tolochko^{a, d}, M. R. Sharafutdinov^{a, b, d}, A. N. Shmakov^{a, b, c},
E. B. Levichev^{a, b}, P. A. Piminov^{a, b}, A. N. Zhuravlev^{a, b}**

^a*Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

^b*Synchrotron Radiation Facility – Siberian Circular Photon Source “SKIF”, Borekov Institute of Catalysis
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Koltsovo, 630559 Russia*

^c*Federal Research Center Borekov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630090 Russia*

^d*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630090 Russia*

^e*Lavrentiev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630090 Russia*

**e-mail: K.V. Zolotarev@inp.nsk.su*

The Center for Collective Use “Siberian Center for Synchrotron and Terahertz Radiation” provides users from various organizations with the opportunity to use modern analytical techniques using synchrotron radiation beams for a wide range of research work. At present, the general direction of the development of new techniques is focused on the development of new original approaches to the use of synchrotron radiation.