

ИСТОЧНИК СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ С РЕНТГЕНОВСКИМ ЛАЗЕРОМ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ “СИЛА”: КОНЦЕПЦИЯ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

© 2022 г. М. В. Ковальчук^{1,2}, А. Е. Благов^{1,2,*}, О. С. Нарайкин¹, Н. В. Марченков^{1,2},
Р. А. Сенин¹, А. В. Таргонский^{1,2}

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

² Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

*E-mail: Blagov_AE@nrcki.ru

Поступила в редакцию 30.03.2022 г.

После доработки 30.03.2022 г.

Принята к публикации 01.04.2022 г.

Представлены результаты разработки концептуального проекта ускорительно-накопительного комплекса источника синхротронного излучения четвертого поколения с лазером на свободных электронах “СИЛА” (источник “СИЛА”), создаваемого в Федеральном государственном бюджетном учреждении “Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт” г. Протвино. Представлено общее описание создаваемой установки, включая ее основные параметры, характеристики генерируемого излучения и технические решения, применяемые для их достижения. Особое внимание уделено ускорительно-накопительному комплексу: линейному ускорителю, работающему на полной энергии 6 ГэВ, и магнитооптической системе кольцевого накопителя. Обсуждаются приоритетные научные направления и задачи, на решение которых направлен проект создания источника “СИЛА”.

DOI: 10.31857/S0023476122050071

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области науки и технологий стран – мировых лидеров определяется уровнем и наличием установок класса “мегасайенс”, среди которых особая роль в развитии прикладных наук отведена источникам синхротронного излучения (СИ) и рентгеновским лазерам на свободных электронах (ЛСЭ). Специализация и решаемые на мегаустановках задачи определяют основные параметры и требования к техническим характеристикам каждого конкретного источника СИ или ЛСЭ. Например, энергия электронов кольцевых ускорителей может составлять от 0.4 до 8 ГэВ, длина орбиты – от нескольких десятков метров до нескольких километров [1], эмиттанс – от единиц нм рад до десятков пм рад (рис. 1).

В мире насчитывается несколько десятков источников СИ, которые можно разделить на четыре поколения. Первое поколение – ускорители заряженных частиц, созданные для изучения физики высоких энергий, оснащенные дополнительно выводными каналами для экспериментов с СИ (паразитическим для данного класса ускорителей) [2]. Второе поколение – специализиро-

ванные ускорительные комплексы, созданные для генерации СИ из поворотных магнитов [3, 4]. Третье поколение – синхротроны со специальными генераторами СИ – ондуляторами и вигглерами, установленными в прямолинейных секциях кольцевого ускорителя [5–7]. Для третьего поколения характерны высокая спектральная яркость и непрерывная инжекция электронов. Наконец, четвертое поколение – ускорители с существенно оптимизированной магнитной структурой [8, 9], позволяющей приблизиться к дифракционному пределу размера источника фотонов. Каждое поколение отличается от предыдущего повышением яркости СИ более чем на порядок [10].

Характеристики рентгеновского излучения передовых современных источников СИ – яркость, когерентность и временное разрешение [12] – уже сегодня позволяют проводить эксперименты по исследованию структуры широчайшего спектра объектов на качественно новом уровне по сравнению с источниками предыдущих поколений. Так, для визуализации атомной структуры, традиционно требующей образцов достаточно больших размеров, возможности источников четвертого поколения – в первую очередь яркость

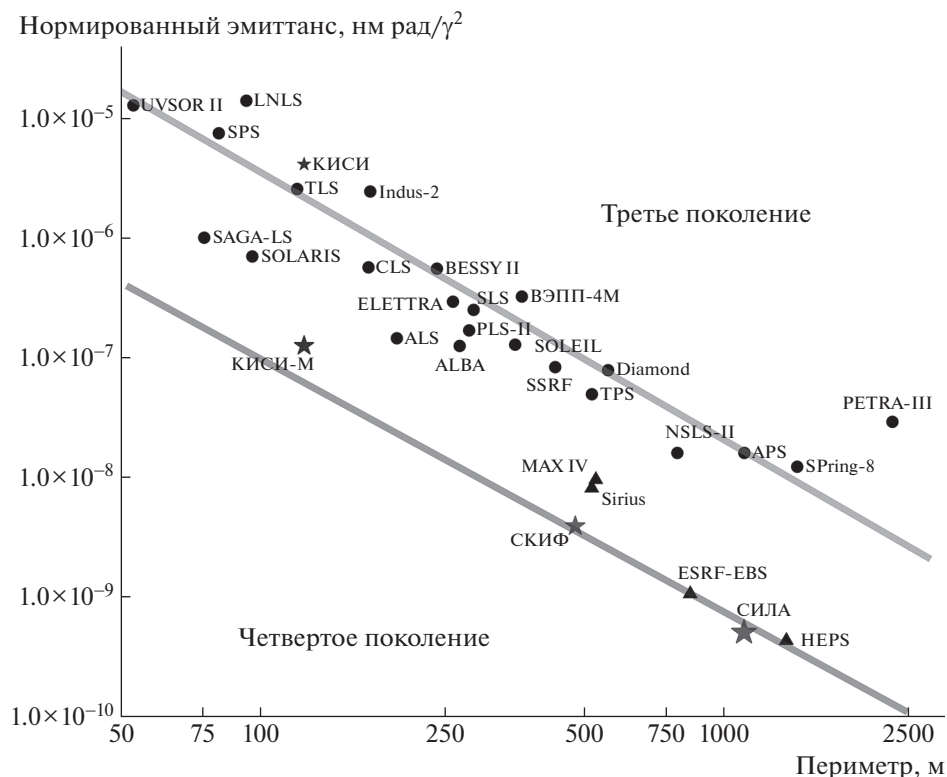


Рис. 1. Сравнение величин, нормированных натуральных горизонтальных эмиттансов ряда СИ [11] — чем ниже на диаграмме расположен источник, тем выше его яркость и степень поперечной когерентности.

и когерентность — позволяют перейти к 3D-визуализации атомной структуры неупорядоченных объектов практически любых размеров (микронных, субмикронных и нанометровых). Рентгеновские ЛСЭ открывают совершенно новую область временных масштабов и позволяют изучать динамику различных систем со сверхвысоким (фемтосекундным) разрешением по времени [13]. Понимание на атомном уровне таких процессов, как формирование структуры материалов [14–16], химические и биохимические реакции, белковая динамика в клетках и вирусах, открывает принципиально новые горизонты практически во всех областях науки: от химии и материаловедения до биологии, фармакологии и медицины. Полученные новые знания позволяют разрабатывать перспективные методы диагностики и лечения болезней, создавать новейшие типы лекарств, развивать промышленные технологии, связанные, например, с катализом, химическим синтезом, переработкой полезных ископаемых, а также синтезировать материалы с уникальными свойствами для наноэлектроники, нейроморфных и природоподобных систем, аккумуляторов и новой энергетики (например, для хранения водорода), сверхтвердые и самовосстанавливающиеся покрытия.

В 2019 г. в Российской Федерации утверждена Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы (**Программа**), в рамках которой предусмотрено создание национальной сети научных центров синхротронных исследований: источника синхротронного излучения четвертого поколения с лазером на свободных электронах — “СИЛА” в Московской области, источника четвертого поколения “СКИФ” в Новосибирской области, источника синхротронного излучения “КИСИ-Курчатов” в Москве (модернизация единственного действующего в Российской Федерации специализированного источника СИ до третьего поколения), источника синхротронного излучения “РИФ” в Дальневосточном регионе на о. Русский.

Создание сетевой мегасайенс-инфраструктуры синхротронных исследований станет логичным развитием и продолжением советских школ реализации крупных научных проектов, берущих свое начало из атомного проекта [17]. Так, многие базовые принципы — основы работы источников СИ — заложены советскими учеными в середине XX века: открытие СИ [18], принцип автофазировки [19], ондуляторное излучение [20], принцип самоусиления спонтанной эмиссии [21] и др.

Флагманский проект Программы – источник СИ четвертого поколения с лазером на свободных электронах “СИЛА” (источник “СИЛА”) – представляет собой многопользовательскую междисциплинарную установку класса “мегасайенс” для исследований по целому ряду направлений физики, химии, кристаллографии, материаловедения, биологии и медицины. В экспериментальном зале источника “СИЛА” будет размещено несколько десятков исследовательских станций и лабораторий.

Разработка источника СИ четвертого поколения проводится в НИЦ “Курчатовский институт” с 2011 г. совместно с ведущими научными центрами мира ESRF (Франция), DESY (Германия) и SPring-8 (Япония). Согласно разработанной концепции источник “СИЛА” будет обладать характеристиками, соответствующими крупнейшим синхротронам мира: периметр основного накопителя более 1100 м, энергия электронов – 6 ГэВ, широкий диапазон энергий СИ – от десятков электронвольт до сотен килоэлектронвольт, высокая яркость и пространственная когерентность. Уникальность и основная сложность проекта заключаются в объединении высокоэнергичного кольцевого источника СИ четвертого поколения и рентгеновского ЛСЭ в единый ускорительно-накопительный комплекс с общей исследовательской инфраструктурой [22, 23].

В настоящей работе представлено описание ускорительно-накопительного (синхротронного) комплекса источника “СИЛА”, включающего в себя линейный ускоритель и кольцевой накопитель.

УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ИСТОЧНИКА “СИЛА”

Синхротронный комплекс источника “СИЛА” разработан для обеспечения генерации пучков СИ высокой яркости и когерентности в широком диапазоне энергий рентгеновской области электромагнитного спектра. Для ондуляторного излучения будут доступны энергии фотонов от 5 до 200 кэВ при яркости 10^{21} – 10^{22} ф с⁻¹ мм⁻² мрад⁻¹, для излучения из дипольного магнита-излучателя – от 0.1 до 150 кэВ при яркости до 3×10^{17} ф с⁻¹ мм⁻² мрад⁻¹ и до 500 кэВ в режиме вигглерного излучения при яркости 10^{18} – 10^{19} ф с⁻¹ мм⁻² мрад⁻¹. Проектная пиковая яркость излучения ЛСЭ – 10^{33} ф с⁻¹ мм⁻² мрад⁻¹ при длительности импульса до 200 фс или менее (в режиме “self-seeding”) [24].

Основные параметры синхротронного комплекса источника “СИЛА” приведены в табл. 1.

Концепцией создания источника “СИЛА” предусмотрено использование линейного ускорителя электронов (ЛУЭ) на энергию 6 ГэВ, одновременно в качестве инжектора на полную

Таблица 1. Основные характеристики синхротронного комплекса источника “СИЛА”

Наименование параметра установки	Значение
Энергия, ГэВ	6
Ток пучка, мА	200
Горизонтальный эмиттанс, пм рад	70
Периметр/длина источника, м	1103
Число периодов ускорителя	40
Потери энергии на оборот, МэВ	2.0
Дисперсия энергии электронов	0.85×10^{-3}
Напряжение ВЧ, МВ	5.0
Длина сгустка, мм	~3
Частота ВЧ, МГц	352.2
Кратность ВЧ	$1296 (3^4 \times 2^4)$
Длина прямолинейного промежутка, м	5.3
Энергия электронов линейного ускорителя, ГэВ	6
Длина волны излучения рентгеновского ЛСЭ	<0.1 нм

энергию (top-up linac) для накопительного кольца синхротрона и драйвера для ЛСЭ.

Достоинствами данной конфигурации являются высокая (95% и более) эффективность инжекции в накопительное кольцо и возможность инжекции пучка с заметно меньшим эмиттансом по сравнению с бустерным кольцевым накопителем. Использование одного общего ускорителя для накопительного кольца и рентгеновского лазера обеспечивает существенное сокращение стоимости и сроков выполнения проекта, позволит интегрировать два современных источника фотонов с различными временными и яркостными характеристиками. Как известно, ЛСЭ обеспечивают рекордные параметры по пиковой яркости при сверхкороткой длительности рентгеновского импульса, в то время как для СИ характерна высокая средняя по времени яркость. Близкими аналогами применяемого подхода являются источник MAX-IV (3 ГэВ), проект модернизации синхротрона SPring-8 II (6 ГэВ), а также лептонный коллайдер Super-KEKB.

Конфигурация установки представлена на рис. 2. Сгусток электронов формируется в форинжекторе, включающем в себя электронную пушку и секции, состоящие из нерегулярных ускоряющих ячеек. На выходе из форинжектора электроны с энергией ~10 МэВ попадают в основную (регулярную) часть линейного ускорителя, где ускоряются до максимальной энергии – 6 ГэВ. Далее электронный сгусток инжектируется в накопительное кольцо или (в промежутках между инжекциями в кольцевой накопитель) подается на

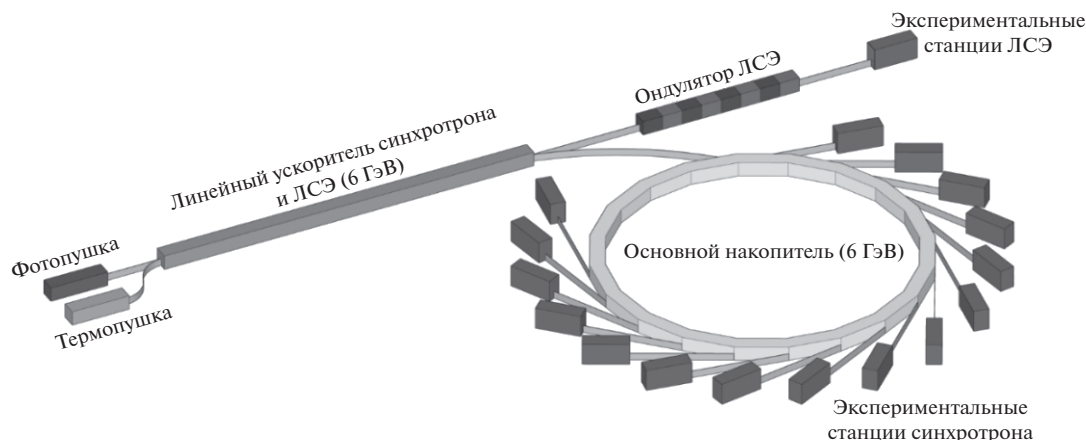


Рис. 2. Схема конфигурации с последовательным использованием ЛУЭ в качестве инжектора в накопительное кольцо синхротрона и драйвера для ЛСЭ.

одну из групп ондуляторов ЛСЭ. Требования к сгустку электронов для накопительного кольца и ондуляторов рентгеновского лазера существенно различаются, в связи с чем применяются два различных типа источников электронов (электронных пушек) для инжекции в накопительное кольцо и в ондуляторы ЛСЭ.

В состав форинжектора для накопительного кольца входят трехэлектродная термоэмиссионная пушка, клистронный предгруппирователь и адиабатический группирователь, включающий в себя несколько нерегулярных ускоряющих ячеек с нарастающей фазовой скоростью волны и амплитудой ускоряющего поля для продольной группировки пучка.

Второй форинжектор (для ЛСЭ) представляет собой классическую 3.5-ячеечную фотопушку с ускоряющей структурой на стоячей волне. Энергия на выходе должна составить ~ 10 МэВ [25–27]. Рассматриваются различные варианты фотокатода – металлический, полупроводниковый, алмазоподобный.

Ускоряющая структура регулярной части ЛУЭ состоит из 110 секций (длина каждой секции – 2.1 м), работающих на стоячей волне. Питание регулярных секций будет осуществляться независимо для каждой секции с одной задающей системой. Темп ускорения ограничен (400–420 кВ/см) максимальной мощностью клистронов российского производства, не превышающей 25 МВт, что обеспечивает прирост энергии ~ 50 МэВ на одну регулярную ускоряющую секцию. Предложенная структура обеспечивает эффективную инжекцию – позволяет минимизировать энергетический разброс пучка на выходе ЛУЭ и получить приемлемую величину поперечного эмиттанса, не превышающую нескольких нм рад [28]. Результаты разработок электродинамических макетов ускоряющих структур и численного моделирования динамики пучка представлены в [29].

Магнитные структуры типа “гибридный ахромат” с несколькими поворотными магнитами (НМВА – Hybrid Multi Bend Achromat) в настоящее время относятся к наиболее эффективным и современным решениям, которые применяются при проектировании накопительных колец и синхротронов [9]. Магнитная НВМА-структура позволяет минимизировать эмиттанс циркулирующих электронных пучков и тем самым улучшить “пользовательские” характеристики источника СИ, например яркость и пространственную когерентность. При разработке магнитооптической схемы источника “СИЛА” за основу была взята структура типа Н7ВА (Hybrid 7 Bend Achromat), предложенная и реализованная для источника СИ ESRF-EBS (Гренобль, Франция) [30], где гибридность достигнута применением диполей с градиентом индукции магнитного поля вдоль орбиты синхротрона и диполей с совмещенной квадрупольной функцией. Такое решение позволило получить пучки электронов в синхротроне ESRF-EBS с горизонтальным эмиттансом 132 пм рад. Расчеты показали, что, используя в качестве базовой магнитной структуры, аналогичной Н7ВА, ESRF-EBS ввиду отсутствия ограничения на величину периметра накопителя “СИЛА”, можно, уменьшив угол поворота пучка на одном регулярном суперпериоде за счет увеличения числа суперпериодов, добиться снижения равновесного значения горизонтального эмиттанса пучка ϵ_x до величины 70 пм рад [31]. Так как горизонтальный эмиттанс ϵ_x пропорционален энергии циркулирующих электронов во второй степени и обратно пропорционален числу суперпериодов в третьей степени, значение эмиттанса 70 пм рад при заданной энергии электронов в накопителе 6 ГэВ достигается при числе суперпериодов, равном 40, и периметре накопителя, близком к 1.1 км.

Главное отличие регулярного суперпериода накопителя “СИЛА” от классического Н7ВА со-

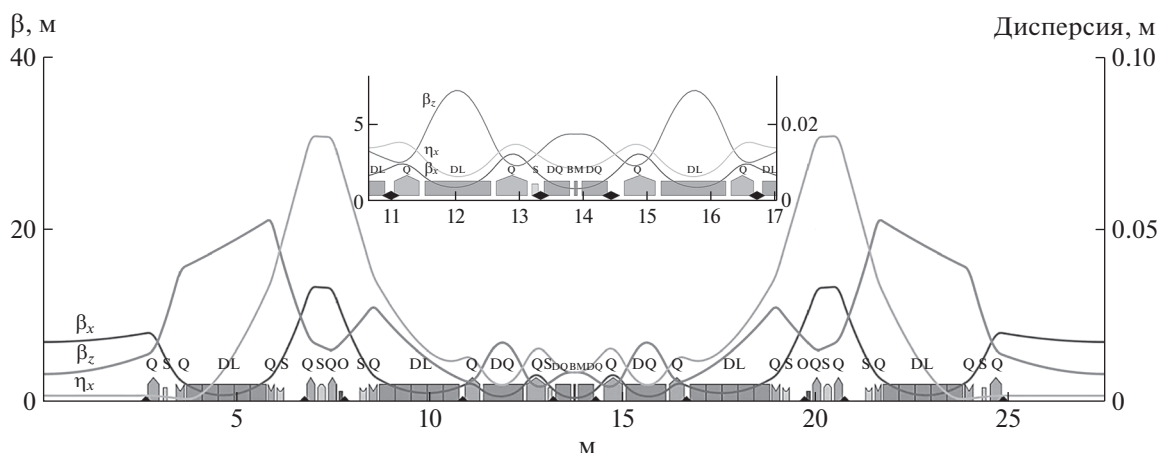


Рис. 3. Структура регулярного суперпериода источника “СИЛА”, разработанная на основе структуры типа Н7ВА [31], и его центральная часть с коротким поворотным магнитом в увеличенном масштабе (врезка). Дипольные магниты – DL, квадрупольные магниты – Q, диполь-квадрупольные магниты – DQ, секступольные магниты – S, октупольные магниты – O.

стоит в изменении его центральной части, а именно, в замене одного протяженного центрального дипольного магнита с квадрупольной функцией на два более коротких, между которыми дополнительно размещается короткий дипольный магнит-излучатель с полем 0.86 Тл, позволяющий получить пучок СИ с расходимостью 1 мрад. Такая модификация магнитной структуры позволяет удвоить число каналов вывода фотонов по отношению к классической Н7ВА. Рассчитанные оптические функции и магнитная структура регулярного суперпериода представлены на рис. 3 и 4. Оптические функции настроены таким образом, чтобы иметь необходимые значения эмиттанса в местах установки вставных устройств и обеспечивать большое значение динамической апертуры всего накопителя. Из 40 прямолинейных промежутков накопительного кольца источника “СИЛА” длиной ~5.3 м 34 предназначены для установки вставных устройств. Оставшиеся шесть прямолинейных промежутков являются “техническими”: два – для инъекции электронов из линейного ускорителя электронов, три – для размещения ВЧ-резонаторов и один – для размещения диагностического оборудования.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАНЦИИ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА

В соответствии с разработанной конфигурацией ускорительно-накопительного комплекса “СИЛА” и проведенными расчетами установка будет обладать малым размером источника (порядка $\sigma_x \sigma_y \sim 6 \times 20$ мкм), высокой яркостью, высокой степенью когерентности и широким спектром – в диапазоне от умеренного до жесткого и

сверхжесткого рентгеновского излучения. На рис. 5 представлены расчетные спектры излучения источника “СИЛА” для различных типов ондуляторов.

Создание “парка” синхротронных станций предполагается провести в два этапа. Основная задача создания станций первой очереди – широко представить и реализовать уникальные эксперименты, требующие высокой яркости и пространственной когерентности, малых пространственных размеров синхротронного пучка, а также экстремальной фокусировки: когерентная визуализация и дифракция [32], рентгеновская

Таблица 2. Параметры, используемые для расчета спектров, изображенных на рис. 7

Ондулятор	U14.4	U27	U42
Энергия электронов (E_e^-), ГэВ	6		
Ток пучка (I), мА	200		
Дисперсия по энергии ($\Delta E/E$), 10^{-3}	0.85		
Эмиттанс (ϵ_x), нм рад	75		
Бета-функция (β), м	6.8×2.9		
Период (λ_u), мм	14.4	27	42
Магнитное поле (B_{max}), Тл	1	0.556	0.834
Коэффициент ондуляторности (K_{max})	1.345	1.402	3.274
Число периодов	138	59	46
Длина ондулятора (L), м	1.987	1.593	1.932
Минимальная энергия излучения ($E_{l min}$), кэВ	12.469	6.386	1.281

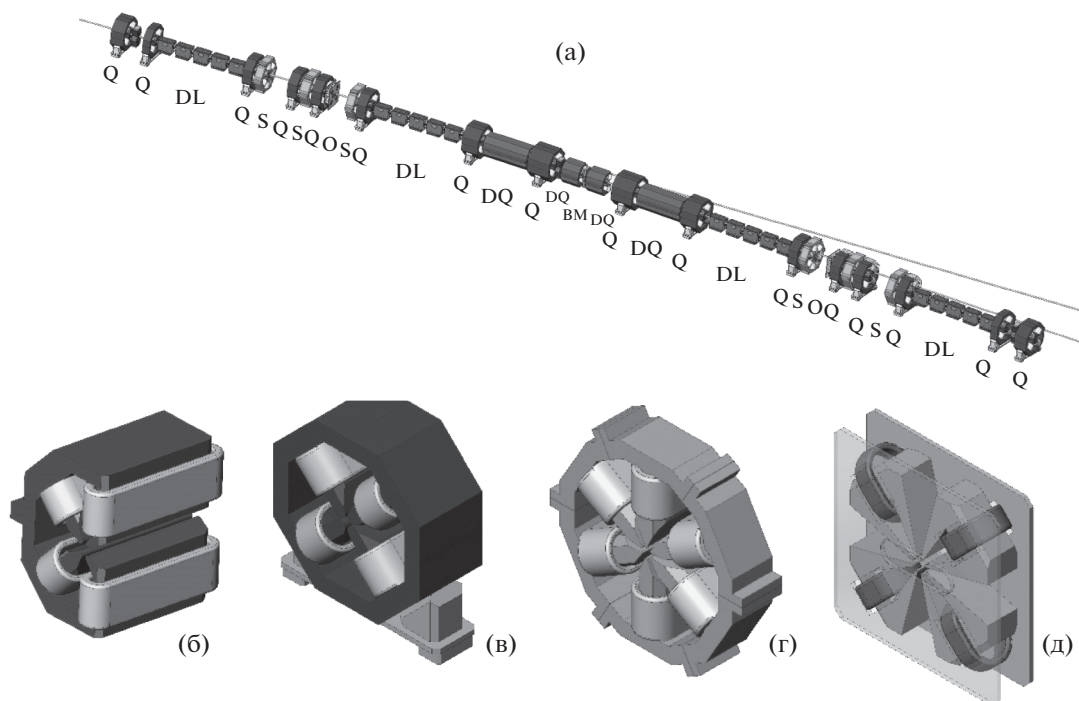


Рис. 4. Схематический вид периода магнитной структуры основного накопителя установки “СИЛА” (а) и эскизные чертежи отдельных магнитов: диполь-квадрупольного (б), квадрупольного (в), секstupольного (г), октупольного (д).

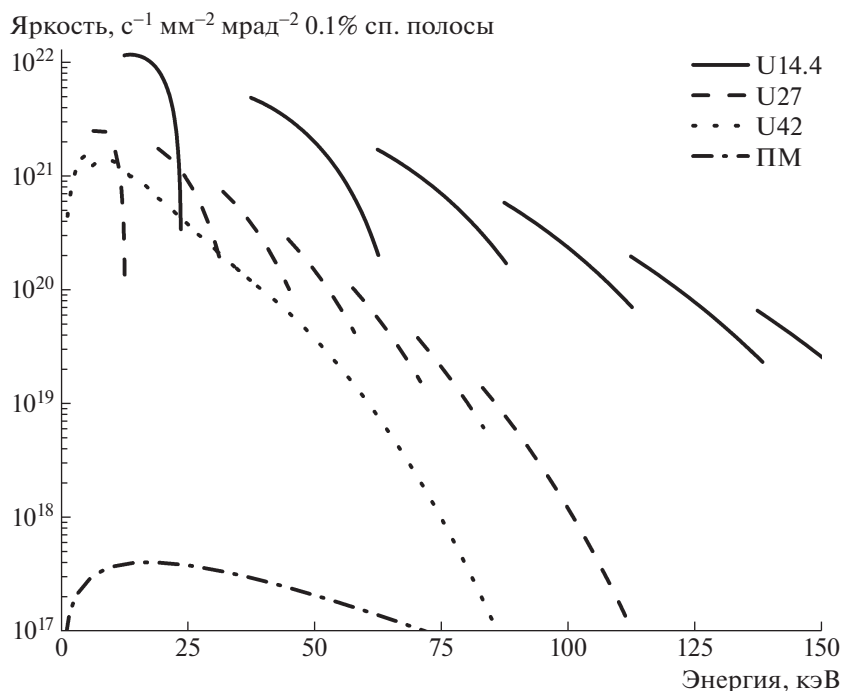


Рис. 5. Яркость излучения, генерируемого вставными устройствами (ондуляторами), параметры которых приведены в табл. 2, и поворотным магнитом-излучателем (ПМ) источника “СИЛА”.

голография [33], серийная кристаллография [34], экстремальные условия [35], фотон-корреляционная спектроскопия [36], нанодифракция [37],

фотонная, электронная и ионная спектроскопия [38], поляризационные измерения. Такие эксперименты необходимы для исследования малых и

Таблица 3. Предварительный перечень экспериментальных станций первой очереди для источника “СИЛА”

Наименование станции	Направление исследований	Рабочий диапазон энергий, кэВ
Станция визуализации	Визуализация, фазовый контраст, микроскопия	10–300
Станция структурной кристаллографии	Порошковая и монокристалльная дифракция	5–80
Станция исследования поверхностей и интерфейсов	Исследование структуры поверхности и интерфейсов, в том числе на поверхности жидкости	7–40
Станция малоуглового рассеяния	Мало- и широкоугловое рассеяние, рентгеновская фотон-корреляционная спектроскопия	5–25
Станция фотоэлектронной спектроскопии в жесткой рентгеновской области	Фотоэлектронная спектроскопия в жесткой области, фотоэлектронная спектроскопия в условиях, близких к естественным	2–20
Станция нанодифракции	Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия, в том числе с временным разрешением до долей микросекунд (наносекунд), стоячие рентгеновские волны	5–40
Станция когерентных приложений	Когерентная дифракционная визуализация, птихография, голография, нанофлуоресценция, рентгеновская полнополевая микроскопия	5–50
Станция магнитного рассеяния	Магнитное рассеяние, магнитный круговой дихроизм	0.5–2.5 и 2.5–30
Станция фотоэлектронной спектроскопии в мягкой области	Фотоэлектронная спектроскопия в мягкой рентгеновской области	0.2–2.0
Станция спектроскопии поглощения рентгеновского излучения	Рентгеновская спектроскопия в окрестности краев поглощения, в том числе с временным разрешением до милли- и микросекунд	5–50
Станция серийной кристаллографии	Макромолекулярная кристаллография; структурная биология; изучение динамики процессов, происходящих в молекулах белков; исследование кристаллов микроразмера методами серийной кристаллографии	5–20
Станция времяразрешающих методов и исследования быстропротекающих процессов	Рентгеновские методы с временным разрешением для экспериментов типа накачка–отклик	1.8–30

слабоупорядоченных систем, квантовых объектов, изучения тонкой динамики структуры и свойств материалов и устройств в режиме *in-operando* [39]. Особое внимание будет уделено разработке систем доставки нано- и микроскопических образцов: в виде жидкой струи, аэрозоля в газовой фазе или в нанокляпях геля.

Также на первом этапе необходимо обеспечить решение текущих задач российского научного сообщества пользователей СИ, основанных на применении традиционных методов структурной диагностики, – рентгеновской спектроскопии, дифракции и рассеяния. К важным направлениям относятся, например, исследования в области структурной кристаллографии, рентгеновской диагностики поверхности, томографии и визуализации, рентгеновской оптики и рентгеноакустики [40–45].

Во вторую очередь будут создаваться лабораторные комплексы на базе экспериментальных

станций, требующих особых условий для образцов, – для исследования опасных патогенов, радиоактивных и химически активных материалов и веществ. Для данных классов образцов предлагается использовать отдельные корпуса на выносных длинных каналах вывода излучения. Также на этом этапе будут создаваться технологические линии, спроектированные совместно с промышленными партнерами, – специализированные станции, медицинские кабинеты для диагностики и лечения пациентов и многопрофильные станции, создаваемые в рамках работы международных консорциумов.

С учетом сформулированных требований разработан предварительный перечень экспериментальных станций первой очереди для источника “СИЛА” (табл. 3). Данный минимальный набор станций, с одной стороны, удовлетворяет основным потребностям российского сообщества пользователей, а с другой – дает возможность ис-

пользования уникальных свойств излучения, генерируемого источником четвертого поколения. Каждая экспериментальная станция требует для своего размещения нескольких выделенных помещений – специализированных отсеков (“хатчей”, от английского *hutch*), окруженных биозащитой, в которых располагаются оптические элементы канала, системы прецизионного позиционирования образца в пучке, измерительная аппаратура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Российской Федерации создается не имеющий мировых аналогов источник СИ четвертого поколения с рентгеновским лазером на свободных электронах “СИЛА”, который, несомненно, станет центром концентрации российского и мирового научного потенциала, эффективным инструментом развития критически важных научных направлений – основой создания прорывных технологий.

Обсуждаемые в работе технические решения по созданию ускорительно-накопительного комплекса и конфигурация магнитооптической системы разработаны с целью достижения рекордных для источников СИ с энергией 6 ГэВ параметров по яркости и энергетическому диапазону. Использование линейного ускорителя, работающего на полной энергии, позволит объединить в единой конфигурации, т.е. в единой научной инфраструктуре, ЛСЭ и многопользовательский источник СИ, что значительно расширит их исследовательские возможности.

Экспериментальный “парк” источника “СИЛА” будет включать в себя десятки научных станций мультидисциплинарного назначения: исследовательские, метрологические и медицинские станции, научные лаборатории, станции ЛСЭ, линии контроля технологических операций. За счет уникальных характеристик генерируемого излучения и большого числа экспериментальных станций источник “СИЛА” должен обеспечить исследовательские потребности научных и научно-производственных организаций всей России на десятки лет вперед. Для образовательных организаций откроются новые возможности по обучению, стажировке и подготовке специалистов широкого круга современных научных и инженерных специальностей. Также вузы получат возможность создавать и эксплуатировать выделенные для их нужд станции.

Участие Российской Федерации в международных проектах “мегасайенс”, реализуемых за рубежом, таких как XFEL (Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах, г. Гамбург, Германия) и ESRF (Европейский центр синхротронных исследований, г. Гренобль, Франция), позволило приобрести уникальные компетенции

и опыт, сформировать необходимый научно-технический и кадровый задел, получить доступ к определенным технологиям и техническим решениям, которые также послужили основой для разработки настоящего проекта.

Авторы выражают благодарность С.М. Полозову, В.С. Дюбкову, М.А. Лалаяну и другим сотрудникам каф. электрофизических установок НИЯУ МИФИ, выполняющим большую работу по технической реализации проекта – расчеты линейного ускорителя, расчет динамических параметров магнитной структуры и магнитостатические расчеты, расчет ВЧ-систем. Партнерство с НИЯУ МИФИ при реализации проекта “СИЛА” – важный элемент успеха всего проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SPring-8. Encyclopedia of Synchrotron Radiation Facilities. 2nd Edition. 2020, RIKEN, Japan, Spring-8 Center. <https://www.aps.anl.gov/spring-8-encyclopedia-of-synchrotron-radiation-facilities-2nd-edition>
2. Bilderback D., Kostroun V., Mills D. et al. // Synchrotron Radiation News. 2015. V. 28. P. 48. <https://doi.org/10.1080/08940886.2015.1059244>
3. Ковальчук М.В., Квардаков В.В., Корчуганов В.Н. // Природа. 2013. № 12 (1180). С. 25.
4. Filhol J.M., Hardy L., Weinrich U. Status report of the ESRF, Proc. of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, USA (Cat. № 99CH36366). V. 4. P. 2334. <https://doi.org/10.1109/PAC.1999.792682>
5. Кулипанов Г.Н. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177. № 4. С. 384. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200704f.0384>
6. Жуковский К.В. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2017. № 2. <https://doi.org/10.3103/S0027134917020126>
7. Винокуров Н.А., Левичев Е.Б. // Успехи физ. наук. 2015. Т. 185. № 9. С. 917. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0185.201509b.0917>
8. Raimondi P. Hybrid multiband achromat: From SuperB to EBS, Proc. of IPAC'17, Copenhagen, 2017, THPPA3, P. 3670. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-THXGBD3>
9. Einfeld D., Plesko M., Schaper J. // J. Synchrotron Rad. 2014. V. 21. № 5. P. 856. <https://doi.org/10.1107/S160057751401193X>
10. Kulipanov G., Skrinisky A., Vinokurov N. // J. Synchrotron Rad. 1998. V. 5. Pt. 3. P. 176. <https://doi.org/10.1107/S0909049597015306>
11. Bartolini R. // ICFA Beam Dynamics Newsletter. 2012. V. 57. Ch. 3.1. https://icfa-usa.jlab.org/archive/newsletter/icfa_bd_nl_57.pdf
12. Просеков П.А., Носик В.Л., Благов А.Е. // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 6. С. 843. <https://doi.org/10.31857/S002347612106028X>
13. Ковальчук М.В., Благов А.Е. // Кристаллография. 2022. Т. 67. № 5. С. 677. <https://doi.org/10.31857/S002347612205006X>

14. Ковальчук М.В., Алексеева О.А., Благов А.Е. и др. // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 1. С. 10. <https://doi.org/10.1134/S0023476119010156>
15. Ковальчук М.В., Просеков П.А., Марченкова М.А. и др. // Кристаллография. 2014. Т. 59. № 5. С. 749. <https://doi.org/10.7868/S0023476114050105>
16. Voikova A.S., Dyakova Y.A., Pina K.V. et al. // Acta Cryst. D. 2017. V. 73. P. 591. <https://doi.org/10.1107/S2059798317007422>
17. Ковальчук М.В. // Природа. 2013. № 12 (1180). С. 3. <https://priroda.ras.ru/pdf/2013-12.pdf>
18. Иваненко Д.Д., Померанчук И.Я. // Докл. АН СССР. 1944. Т. 44. С. 343.
19. Векслер В.И. // Докл. АН СССР. 1944. Т. 43. № 8. С. 346.
20. Гинзбург В.Л. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1947. Т. 11. № 2. С. 165.
21. Кондратенко А.М., Салдин Е.Л. // ЖТФ. 1983. Т. 53. № 7. 1317.
22. Liuzzo S., Carmignani N., Carver L.R. et al. "USSR HMBA Storage Ring Lattice Options" Proc. of 12th International Particle Accelerator Conference, May 2021, Online, Brazil. TUPAB049. P. 1466. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB049>
23. Hoummi L., Carmignani N., Carver L.R. et al. "Optimization and Error Studies for the USSR HMBA Lattice" Proc. of 12th International Particle Accelerator Conference, May 2021, Online, Brazil. MOPAB224. P.730. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB224>
24. Feldhaus J., Saldin E.L., Schneider J.R. et al. // Opt. Commun. 1997. V. 140. P. 341. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(97\)00163-6](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(97)00163-6)
25. Polozov S., Rashchikov V., Krasilnikov M. An Improved Model for Photoemission of Space Charge Dominated Picosecond Electron Bunches: Theory and Experiment. Proc. of 12th International Particle Accelerator Conference, May 2021, Online, Brazil, WEPAB101, P. 2829. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB101>
26. Kliuchevskaia Yu.D., Polozov S.M. Optimization of the RF-Gun With Photocathode at Operating Frequency 2800 MHz for the New Injection Linac for USSR Project. Proc. of 27th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2021, TUPSB43, P. 319. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB43>
27. Polozov S.M., Rashchikov V.I. // Cybernetics and Physics. 2020. V. 9. № 2. P. 103.
28. Ashanin I.A., Kliuchevskaia Yu.D., Polozov S.M., Pronikov A.I. Beam Dynamics Simulation in a Linear Electron Accelerator - Injector for the 4th Generation Specialized Synchrotron Radiation Source USSR. Proc. of 27th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2021, MOPSA08, P. 149. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA08>
29. Ашанин И.А., Ключевская Ю.Д., Полозов С.М. и др. // Вестн. СПбГУ: Прикладная Математика. Информатика. Процессы управления. 2019. Т. 15. № 1. С. 126. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.110>
30. EBS Storage Ring Technical Report, ESRF, Grenoble, France, 2019. <https://www.esrf.eu/files/live/sites/www/files/about/up-grade/documentation/Design%20Report-reduced-jan19.pdf>
31. Ashanin I.A., Bashmakov Yu.A., Budkin V.A. et al. // Physics Atomic Nuclei. 2018. V. 81. № 11. P. 1646. <https://doi.org/10.1134/S1063778818110030>
32. Miao J., Ishikawa T., Robinson I. et al. // Science. 2015. V. 348. P. 530. <https://doi.org/10.1126/science.aaa1394>
33. Лидер В.В., Ковальчук М.В. // Кристаллография. 2013. Т. 58. № 6. С. 764. <https://doi.org/10.7868/S0023476113050068>
34. Spence J.C.H. // Crystals. 2020. V. 10. № 2. P. 135. <https://doi.org/10.3390/cryst10020135>
35. McMahon M.I. // J. Synchrotron Rad. 2014. V. 21. P. 1077. <https://doi.org/10.1107/S1600577514012855>
36. Shpyrko O.G. // J. Synchrotron Rad. 2014. V. 21. № 5. P. 1057. <https://doi.org/10.1107/S1600577514018232>
37. Shabalin A.G., Meijer J.-M., Vartanians I. et al. // PRL. 2016. V. 117. № 13. P. 138002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.138002>
38. Sanchez A., Amini K., Wang S.-J. et al. // Nat. Commun. 2021. V. 12. P. 1520. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21855-4>
39. Yau A., Cha W., Kanan M. et al. // Science. 2017. V. 356. P. 739. <https://doi.org/10.1126/science.aam6168>
40. Куликов А.Г., Благов А.Е., Марченков Н.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107. № 9–10. С. 679. <https://doi.org/10.7868/S0370274X18100119>
41. Элиович Я.А., Аккуратов В.И., Таргонский А.В. и др. // Кристаллография. 2018. Т. 63. № 5. С. 708. <https://doi.org/10.1134/S0023476118050090>
42. Blagov A.E., Kulikov A.G., Marchenkov N.V. et al. // Experimental Techniques 2017. V. 41. № 5. P. 517. <https://doi.org/10.1007/s40799-017-0194-1>
43. Проценко А.И., Благов А.Е., Писаревский Ю.В. и др. // Успехи фин. наук. 2021. Т. 191. С. 88. <https://doi.org/10.3367/UFN.2020.06.038779>
44. Благов А.Е., Просеков П.А., Таргонский А.В., Элиович Я.А. // Кристаллография 2015. Т. 60. № 2. С. 189. <https://doi.org/10.7868/S0023476115020058>
45. Благов А.Е., Ковальчук М.В., Кон В.Г. и др. // Кристаллография. 2010. Т. 55. № 1. С. 12.