

УДК 621.386:53.089.6

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ С СИНХРОТРОННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ВЭПП-4М

© 2020 г. Г. Баранов<sup>а</sup>, В. Борин<sup>а, б</sup>, А. Журавлев<sup>а</sup>, К. Золотарев<sup>а</sup>, С. Карнаев<sup>а</sup>, К. Купер<sup>а</sup>, Е. Левичев<sup>а</sup>, О. Мешков<sup>а, б</sup>, С. Мишнев<sup>а</sup>, И. Николаев<sup>а</sup>, А. Николенко<sup>а</sup>, П. Пиминов<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

<sup>б</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090 Россия

\*e-mail: piminov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 25.05.2019 г.

После доработки 10.06.2019 г.

Принята к публикации 14.06.2019 г.

Представлены результаты проводимых на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М экспериментов с синхротронным излучением в широком энергетическом диапазоне от 10 эВ до 200 кэВ. Для увеличения интенсивности излучения энергия электронов в ускорительном кольце ВЭПП-4М была повышена от 4 до 4.5 ГэВ. Для проведения экспериментов в высокоэнергетическом диапазоне синхротронного излучения на кольцо был установлен новый многополюсный гибридный вигглер, создающий поле 1.9 Тл. Обсуждается метод калибровки энергии электронов в ускорителе с помощью лазерного поляриметра.

**Ключевые слова:** синхротронное излучение, источники синхротронного излучения, пучки заряженных частиц, метрология.

DOI: 10.31857/S102809602002003X

### ВВЕДЕНИЕ

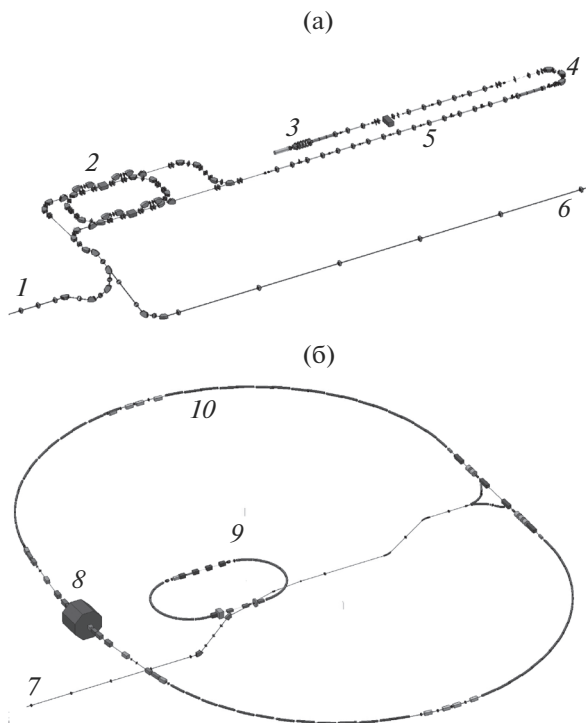
Многофункциональный ускорительный комплекс ВЭПП-4 [1] предназначен для проведения экспериментов в области физики высоких энергий на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР [2], с синхротронным излучением [3], в области ядерной физики на накопителе ВЭПП-3 с установкой Дейтон [4], а также для развития технологий изготовления детекторов элементарных частиц на установке “Выведенный пучок” [5].

Комплекс ВЭПП-4 входит в состав Уникальной научной установки “Комплекс электрон-позитронных коллайдеров ВЭПП-4–ВЭПП-2000” (рис. 1), состоящей из инжекционного комплекса, длинного транспортного канала К-500, электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000 и комплекса ВЭПП-4. Инжекционный комплекс предназначен для производства пучков электронов и позитронов высокой интенсивности [6] и доставки их до коллайдера ВЭПП-2000 и комплекса ВЭПП-4. Инжекционный комплекс (рис. 1а) состоит из электронной пушки, линейного ускорителя электронов, конверсионной системы, линейного ускорителя позитронов и накопителя-охлаждителя. Частота выпуска электронов и позитронов из инжекционного комплекса составляет 1 Гц. ВЭПП-4 (рис. 1б) состоит из многофункционального накопителя электронов и позитронов ВЭПП-3, импульсного канала транс-

портировки из ВЭПП-3–ВЭПП-4 и электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М.

Эксперименты с синхротронным излучением (СИ) на ВЭПП-3 проводятся в двух режимах: низкоэнергетическом (энергия электронного пучка 1.2 ГэВ для экспериментов по рентгеновской литографии) и основном (энергия электронного пучка 2 ГэВ). В настоящее время на ВЭПП-3 используют семь каналов вывода СИ (из поворотного магнита и трехполюсного вигглера), на которых оборудовано девять станций. Один канал предназначен для стабилизации положения орбиты электронов в ускорителе.

Для исследований на ВЭПП-4М с использованием СИ также доступны два режима работы коллайдера. Первый режим (энергия электронов в ускорителе 1.9 ГэВ) позволяет проводить эксперименты в мягком рентгеновском диапазоне от 100 эВ до 10 кэВ. Второй режим (энергия электронов 4.5 ГэВ) обеспечивает возможность работы с СИ в жестком рентгеновском диапазоне от 30 до 200 кэВ. В настоящее время на ВЭПП-4М действуют два канала вывода излучения, еще два канала готовятся к запуску в эксплуатацию. На рис. 2 представлены спектры излучения из поворотных магнитов и вигглеров для накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М.

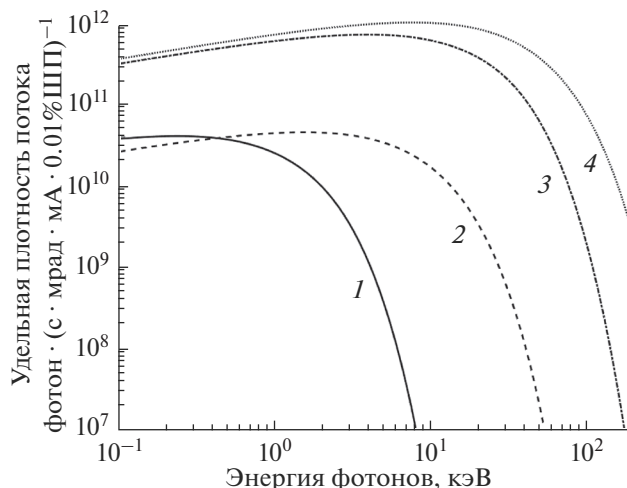


**Рис. 1.** Схема инжекционного комплекса (а) и комплекса ВЭПП-4 (б) электрон-позитронных коллайдеров ВЭПП-4–ВЭПП-2000: 1 – транспортный канал К-500 для ВЭПП-2000; 2 – накопитель-охладитель; 3 – электронная пушка; 4 – конверсионная система; 5 – линейный ускоритель позитронов; 6, 7 – транспортный канал К-500 для ВЭПП-3; 8 – детектор КЕДР; 9 – накопитель ВЭПП-3; 10 – коллайдер ВЭПП-4М.

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ С СИНХРОТРОННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В МЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Все работы с мягким рентгеновским и вакуумным ультрафиолетовым излучением ведутся на метрологической станции “Космос”, использующей излучение из поворотного магнита накопителя ВЭПП-4М. Эксперименты проводятся на энергии инжекции ВЭПП-4М (1.9 ГэВ).

На станции был установлен модернизированный монохроматор, использование которого позволило устанавливать в качестве спектральных элементов не только многослойные зеркала, но и кристаллы и дифракционные решетки. Многослойные рентгеновские зеркала покрывают спектральный диапазон 80–3000 эВ с характерным спектральным разрешением (в зависимости от участка рабочего спектра)  $\Delta E/E \approx 0.6\text{--}4\%$ . Дифракционные решетки дают возможность проводить работы в спектральном диапазоне 10–100 эВ. Использование кристаллов Si(111) позволяет покрывать диапазон 2200–6000 эВ со спектральным разрешением  $\Delta E/E = 10^{-4}$ . При таком спектральном разрешении монохроматора можно измерять в указанном диапазоне XAFS-спектры элемен-



**Рис. 2.** Удельная плотность потока фотонов (ток 1 мА, горизонтальный угол 1 мрад, спектральный диапазон  $\Delta E/E = 0.1\%$ ) для накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М: 1 – спектр СИ из поворотного магнита (поле 0.38 Тл) на ВЭПП-4М (1.8 ГэВ); 2 – спектр СИ из трехполюсного вивглера на ВЭПП-3 (2.0 ГэВ); 3 – спектр СИ из семиполюсного вивглера на ВЭПП-4М (4.0 ГэВ); 4 – спектр СИ из девятиполюсного вивглера на ВЭПП-4М (4.5 ГэВ). ШП – ширина полосы.

тов, K- и L3-края которых лежат в области, недоступной для станций жесткого рентгеновского излучения. Речь идет об элементах с атомными номерами от 16 до 24 и от 40 до 59 соответственно.

На станции был проведен ряд измерений в целях калибровки спектров отражения различных кристаллов. Откалиброванные кристаллы будут использованы для диагностики лазерной плазмы на пикосекундной установке, работающей во ВНИИТЭФ (г. Снежинск). Измерения проводили для кристаллов кварца, слюды и бифталата калия в спектральном диапазоне 1–6 кэВ методом кривой качания. Измеряли пиковый коэффициент отражения и спектральное разрешение этих кристаллов. По результатам разработана и подготовлена к аттестации методика выполнения измерений.

Кроме того, на станции был проведен ряд экспериментов по калибровке различного рода детекторов. Так, была измерена абсолютная спектральная чувствительность коаксиальных алмазных детекторов в диапазоне 100–3000 эВ. Детекторы такого типа могут быть использованы для наблюдения за высокотемпературной плазмой в новейших установках термоядерного синтеза типа ИТЭР или УФЛ-2М. Также была разработана методика абсолютной калибровки детекторов в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне, и был прокалиброван измеритель ультрафиолетового излучения Солнца ВУСС-Э (диапазон калибровки 5–11 эВ) для спутника Электро-Л № 3. Как и в случае калибровки кристаллов, разработана и подготовлена к аттестации методика выполнения измерений. Калибровку детекторов проводят методом эталонного детектора с ис-

пользованием в качестве эталона фотодиода ФДУК-100УВ (производство ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Москва), прокалиброванного в национальном метрологическом центре Германии РТВ. Совместно с ИНХ СО РАН на станции ведутся работы по вводу в строй рентгеновского спектрометра “Стеарат” для реализации методов эмиссионной спектроскопии в мягкой рентгеновской области.

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ С СИНХРОТРОННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ЖЕСТКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ

В 2017 г. для повышения интенсивности СИ в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне был установлен девятиполюсный вигглер (поле 1.9 Тл) (рис. 3) [7, 8], который заменил старый семиполюсный вигглер (поле 1.2 Тл). В дополнение была проведена модернизация ускоряющей системы ВЭПП-4М, позволившая поднять энергию электронов в коллайдере до 4.5 ГэВ. Также для увеличения интенсивности СИ был реализован многосгустковый режим (до восьми сгустков) с полным током около 30 мА.

Начиная с 2014 г. на ускорительном комплексе ВЭПП-4М проводятся эксперименты, направленные на разработку новых методов лучевой терапии злокачественных опухолей в организации человека [9]. Совместно с сотрудниками Института цитологии и генетики СО РАН был разработан и создан стенд для радиационного воздействия на онкологические ткани лабораторных животных. В качестве основного метода лучевой терапии применяют технику микропучкового облучения, которая является одним из передовых средств для борьбы с нейроонкологическими заболеваниями [10]. Использование массивов интенсивных микропучков рентгеновского излучения дает возможность снизить радиационные повреждения здоровых органов, окружающие злокачественные образования. Повышение интенсивности СИ в высокоэнергетическом диапазоне позволило достичь более равномерного распределения поглощенной дозы в тканях лабораторных животных (отклонение менее 5%), что значительно повысило эффективность микропучкового облучения.

Повышение энергии электронов до 4.5 ГэВ и монтаж гибридного девятиполюсного вигглера увеличили интенсивность СИ в энергетическом диапазоне 40–70 кэВ более чем в 100 раз. Особенно это стало актуально при экспериментальных исследованиях деформации кристаллической решетки при быстром импульсном нагреве [11]. Модернизация ускорителя ВЭПП-4М позволила зафиксировать распространение ударной тепловой волны в монокристалле вольфрама с временным разрешением на уровне 50 мкс. Эксперименты по исследованию механизмов деформации кристаллической решетки вольфрама, возникающей в результате импульсного нагрева, дают воз-

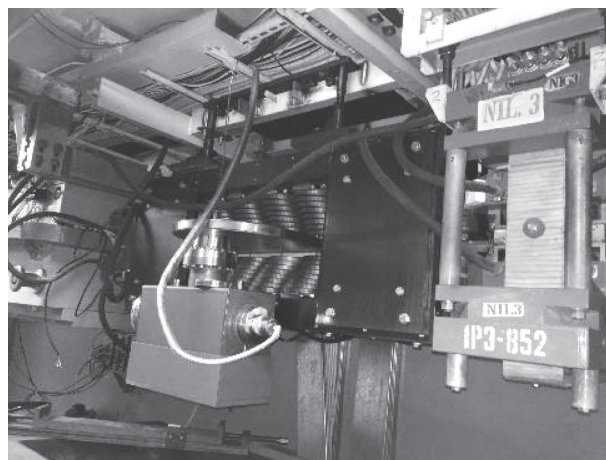


Рис. 3. Гибридный девятиполюсный вигглер, установленный на ВЭПП-4М.

можность смоделировать процессы, происходящие в первой стенке термоядерного реактора, создающегося на базе проекта ИТЭР.

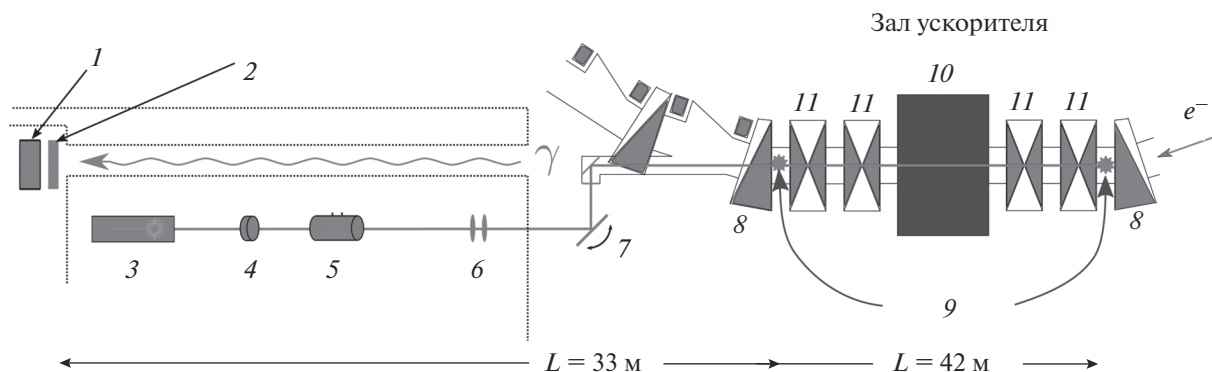
Благодаря высокой интенсивности СИ из девятиполюсного вигглера в “жестком” энергетическом диапазоне стало возможным поднять минимальный предел обнаружения редкоземельных элементов при проведении рентгенофлуоресцентного анализа горных пород от 1 до 0.2 млн<sup>-1</sup> [12]. Это важно при проведении разведывательных мероприятий при поиске новых месторождений и геохронологическом анализе донных осадков.

Высокопроникающая способность СИ в диапазоне от 30 до 200 кэВ позволяет проводить рентгенографические исследования внутренней структуры крупных образцов с использованием техники фазового контраста. Фазово-контрастная интроскопия основана на регистрации отклонения направления рентгеновской волны, возникающей на границе сред, имеющих различную электронную плотность. Техника получения фазово-контрастных рентгеновских изображений очень актуальна во многих областях науки, таких как медицина, геология, материаловедение, археология и других. Исследование, проводимое с помощью фазово-контрастных методов, — удобный, а иногда и единственный способ изучения уникальных объектов, не требующий их разрушения. В 2018 г. после модернизации ВЭПП-4М были проведены исследования структуры ряда археологических и палеонтологических объектов, выявившие детали с контрастом менее 0.1%.

### ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ

#### *Абсолютное измерение энергии пучка*

Для калибровки энергии пучка ВЭПП-4М применяется метод резонансной деполяризации [13]. Частота спиновой прецессии, связанная с энергией пучка через аномальный магнитный



**Рис. 4.** Лазерный поляриметр ВЭПП-4М: 1 – двухкоординатный детектор на основе GEM; 2 – свинцовый конвертор; 3 – лазер 257 нм; 4 – фазовая пластинка  $\lambda/4$ ; 5 – ячейка Погкельса; 6 – система фокусировки лазера (телескоп); 7 – подвижное зеркало; 8 – поворотный магнит накопителя; 9 – места встречи электронного и лазерного сгустков; 10 – детектор КЕДР; 11 – квадрупольные линзы накопителя.

момент электрона, определяется по резонансному разрушению поляризации при воздействии на пучок бегущей ТЕМ-волной. Точность метода ограничена шириной спиновой линии  $10^{-6}$ . Энергию пучка измеряют в основном для нужд физики элементарных частиц, но это может быть также востребовано для экспериментов с СИ, например, метрологических измерений при использовании накопителя в качестве эталонного источника.

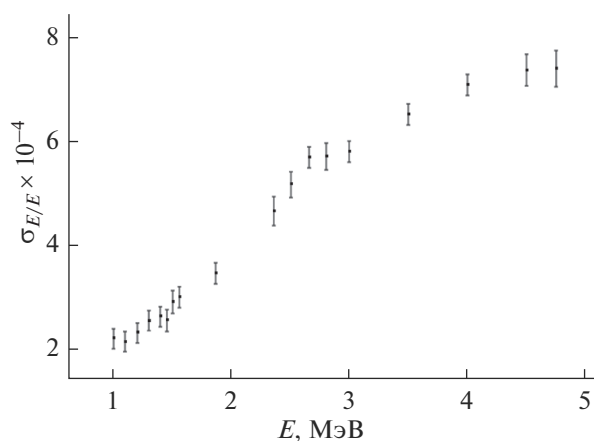
При энергии пучка ВЭПП-4М меньше 2 ГэВ его поляризацию измеряют по интенсивности внутрисгусткового рассеяния (эффект Тушека) [14]. Для этого используют восемь подвижных сцинтилляционных счетчиков, расположенных в разных промежутках накопителя ВЭПП-4М, позволяющих регистрировать “тушековские” пары частиц. При работе на энергии пучка свыше 3.5 ГэВ, например, в планируемых экспериментах по измерению массы  $\Upsilon$ -мезонов, для измерения поляризации используют эффект асимметрии обратного комптоновского рассеяния циркулярно поляризованного лазерного излучения на вертикально поляризованном электронном пучке [15, 16]. Для этого применяют импульсный твердотельный Nd:YLF-лазер с диодной накачкой при средней мощности 2 Вт, частоте повторения импульсов до 4 кГц и длительности импульса 5 нс. Поляризацией лазерного излучения управляют при помощи ячейки Погкельса. Система запуска позволяет переключать поляризацию лазера с левой циркуляцией на поляризацию с правой циркуляцией при каждой вспышке лазера. Место встречи лазерного и электронного пучков находится в прямолинейном экспериментальном промежутке ВЭПП-4М вблизи квадрупольных линз и до поворотных магнитов, где минимален угловой разброс импульсов в пучке. Рассеянные гамма-кванты регистрируют с помощью двухкоординатного детектора на основе GEM [16] на расстоянии око-

ло 30 м от места рассеяния (рис. 4). Система используется для калибровки энергетической шкалы ВЭПП-4М в эксперименте по измерению сечения рождения адронов  $R$  в диапазоне энергии  $2E = 4.6-7.0$  ГэВ. Скорость счета рассеянных гамма-квантов составляет около 4 кГц при токе пучка ВЭПП-4М 8 мА.

В настоящее время ведется работа по увеличению скорости счета, а также по автоматизации калибровки энергии с использованием лазерного поляриметра.

*Диагностика в оптическом диапазоне*

Для измерения продольного и поперечного размеров сечений пучков электронов и позитронов на коллайдере регистрируют оптическую часть спектра СИ. Выводы СИ в двух направлениях расположены в поворотных магнитах полуколец в техническом промежутке, каждое направление в отдельности предназначено для ре-



**Рис. 5.** Зависимость энергетического разброса в пучке от энергии накопителя ВЭПП-4М.

гистрации излучения только электронов либо позитронов. Видимая часть СИ отражается от охлаждаемого металлического зеркала, расположенного внутри вакуумной камеры коллайдера, и выводится наружу через кварцевое окно.

Оптическая система диагностики пучков дает следующую регулярную информацию о пучках частиц в накопителе: продольные и поперечные размеры сечений пучков электронов и позитронов, синхротронная частота колебаний электронов, время жизни пучка электронов, возникновение фазовых колебаний электронов. Кроме того, “электронное” направление используется для проведения экспериментов в области ускорительной физики [17]. Недавно система оптической диагностики была дополнена стрик-камерой PS-1/S1, с помощью которой был измерен энергетический разброс в пучке ВЭПП-4М в широком диапазоне значений энергии пучка (рис. 5) [18].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты с пучками синхротронного излучения регулярно проводятся на накопителе ВЭПП-4М в широком диапазоне длин волн. Увеличение энергии пучка электронов от 4 до 4.5 ГэВ, а также замена семиполюсного вигглера (поле 1.2 Тл) на девятиполюсный гибридный вигглер (поле 1.9 Тл) позволило увеличить поток жестких фотонов с энергией 100 кэВ в 50 раз.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levichev E.B.* // Phys. Particles Nucl. Lett. 2016. V. 13. № 7. P. 876.
2. *Anashin V.V., Aulchenko V.M., Baldin E.M. et al.* // Phys. Particles Nucl. 2013. V. 44. № 4. P. 657.
3. *Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V. et al.* // Phys. Proced. 2016. V. 84. № 19. P. 26.
4. *Nikolenko D.M., Arenho H., Arrington J. et al.* // Phys. Atomic Nucl. 2010. V. 73. № 8. P. 1322.
5. *Abramov G.N., Ahmetshin R.R., Barnyakov A.Yu. et al.* // JINST. 2014. V. 9. P. C08022.
6. *Maltseva Yu., Andrianov A., Astrelina K. et al.* VEPP-5 Injection Complex: New Possibilities for BINP Electron-Positron Colliders // Proceed. 9th Int. Particle Accelerator Conf. IPAC-18. Vancouver, Canada. 2018. P. 371. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-MOPMK011>
7. *Baranov G., Voblya P., Levichev E. et al.* // Phys. Proced. 2016. V. 84. P. 126.
8. *Baranov G., Vobly P., Levichev E. et al.* // IEEE Transac. Appl. Superconductivity. 2018. V. 28. № 3. P. 4101403. <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2791921>
9. *Kuper K.E., Zavjalov E.L., Razumov I.A. et al.* // Phys. Proced. 2016. V. 84. P. 252.
10. *Grotzer M.A., Schülte E., Bräuer-Krisch E., Laissue J.A.* // Phys. Med. 2015. V. 31. № 6. P. 564.
11. *Аракчеев А.С., Шмаков А.Н., Шарафутдинов М.Р. и др.* // Журн. структурн. химии. 2016. № 7. С. 1389.
12. *Легкодымов А., Купер К., Назьмов В., Колмогоров Ю.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 1. С. 116.
13. *Буклин А.Д., Дербенев Я.С.* Метод абсолютной калибровки энергии пучков. Измерение массы Ф-мезона. Высокие энергии и элементарные частицы // Тр. V междунар. симп. по физике высоких энергий и элементарных частиц. ОИЯИ, Дубна. 1975. С. 138.
14. *Blinov V.E., Bogomyagkov A.V., Cherepanov V.P. et al.* // Nucl. Part. Phys. Proc. 2016. V. 273–275. P. 210.
15. *Baier V.N., Khoze V.A.* // Sov. J. Nucl. Phys. 1969. V. 9. P. 238.
16. *Blinov V., Kiselev V.A., Levichev E. et al.* // JINST. 2017. V. 12. P. 08020. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/08/C08020>
17. *Анчугов О.В., Блинов В.Е., Богомяков А.В. и др.* // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. Вып. 4(10). С. 690.
18. *Borin V.M., Dorokhov V.L., Kiselev V.A.* The Longitudinal Broadband Impedance and Energy Spread Measurements at the VEPP-4M Electron-Positron Collider // Proceed. 8th Int. Particle Accelerator Conf. 2017. P. 3117.

## Experiments with Synchrotron Radiation at the VEPP-4M

**G. Baranov<sup>1</sup>, V. Borin<sup>1,2</sup>, A. Zhuravlev<sup>1</sup>, K. Zolotarev<sup>1</sup>, S. Karnaev<sup>1</sup>, K. Kuper<sup>1</sup>, E. Levichev<sup>1</sup>, O. Meshkov<sup>1,2</sup>, S. Mishnev<sup>1</sup>, I. Nikolaev<sup>1</sup>, A. Nikolenko<sup>1</sup>, P. Piminov<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS, Novosibirsk, 630090 Russia*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia*

*\*e-mail: piminov@inp.nsk.su*

The results of experiments carried out at the electron-positron collider VEPP-4M using synchrotron radiation in a wide range from 10 eV to 200 keV are presented. To increase the radiation intensity, the electron beam energy in the VEPP-4M storage ring has been raised from 4 to 4.5 GeV. To carry out experiments in a high-energy range of synchrotron radiation, a new multi-pole hybrid wiggler producing a field of 1.9 T has been installed on the accelerator ring. In addition, a method for calibrating the energy of electrons in an accelerator using a laser polarimeter is discussed.

**Keywords:** synchrotron radiation, synchrotron light sources, charged particle beams, metrology.