

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский
государственный университет»

_____ Микушев С. В.

«24» апреля 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертационную работу Колокольчикова Сергея Дмитриевича «Исследование динамики поляризованного пучка в ускорительном комплексе NICA-Nuclotron в приложении к изучению электрического дипольного момента лёгких ядер», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Актуальность темы диссертации. В диссертационной работе Колокольчикова С. Д. представлены результаты, направленные на расширение физической программы исследований с поляризованными пучками, включающей вопросы по созданию установок для измерения электрического дипольного момента.

Для изучения структуры протонов и дейтронов требуются коллайдерные эксперименты с поляризованными пучками при высокой светимости. Однако ускорение лёгких ядер связано с необходимостью преодоления критической энергии, являющейся характеристикой конкретной магнитооптической структуры. В отличие от тяжёлых ионов, для которых эта проблема несущественна, при ускорении протонов длительное нахождение вблизи критической энергии вызывает потерю устойчивости движения, развитие продольных и поперечных неустойчивостей и, как следствие, снижение светимости эксперимента. В данном случае требуется разработка методов быстрого пересечения или повышение критической энергии.

Ещё одной фундаментальной задачей является объяснение барионной асимметрии Вселенной. Согласно современным представлениям, её существование связано с нарушением CP-симметрии. Экспериментально данный эффект может быть исследован в измерениях электрического дипольного момента элементарных частиц. Наличие ЭДМ, как фундаментального свойства материи, одновременно нарушает P- и T-инвариантности. Его обнаружение стало бы прямым указанием на физику за пределами Стандартной модели. Современные эксперименты уже достигли высоких ограничений на величину ЭДМ, однако ожидаемые значения требуют новых установок с возможностью длительного удержания поляризованных пучков и применения специальных режимов управления спином, таких как «замороженный» или «квази-замороженный» спин.

В Объединённом институте ядерных исследований создаётся уникальный ускорительный комплекс NICA, предназначенный для решения указанных задач. Он объединяет эксперименты с тяжёлыми ионами для изучения кварк-глюонной плазмы (детектор MPD), эксперименты с

поляризованными пучках протонов и дейтронов (детектор SPD), а также измерение ЭДМ. Такая универсальность предъявляет особые требования к структуре ускорителя.

Таким образом, работа Колокольчикова С. Д. затрагивает широкий круг актуальных фундаментальных вопросов современной физики и направлена на создание теоретических и прикладных основ для проведения передовых экспериментов в комплексе Nuclotron–NICA. Полученные в ней результаты обладают высокой степенью новизны и востребованности, а применяемые подходы могут быть реализованы и на других современных ускорительных установках.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 130 страниц, включая 64 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 98 наименований.

Во введении определены цели и задачи диссертационной работы, показана научная новизна, обосновывается актуальность проводимого исследования. Приведены выносимые на защиту положения и их научная и практическая значимость. Дана информация об апробации полученных результатов, сделанных по результатам работы публикациях, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе особое внимание уделено процессам внутривидового рассеяния и влиянию наличия критической энергии на динамику многозарядных тяжелых ионов и легких ядер. Для решения поставленных задач рассмотрена дуальная магнитооптическая структура, способная адаптироваться как к экспериментам с тяжелыми ионами, где основную роль играет внутривидовое рассеяние, так и к исследованиям с легкими частицами, где необходимо преодоление критической энергии. Показано, что для тяжелых ионов задача заключается в подавлении роста эмиттанса за счет электронного и стохастического охлаждения, в то время как для легких ядер требуется разработка специальных резонансных структур для обеспечения стабильности продольного движения.

Во второй главе проведен анализ динамики пучка при переходе через критическую энергию с учетом высших порядков разброса по импульсам и моделей продольных импедансов. Рассмотрен метод скачка критической энергии для различных ускоряющих потенциалов, обеспечивающий сохранение стабильности сгустка. Показано, что вблизи критической энергии значительные ограничения накладывает продольная микроволновая неустойчивость, снижающая светимость коллайдера. В качестве метода компенсации рассмотрено модулирование дисперсионной функции при приближении энергии пучка к критическому значению. Результаты численного моделирования сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на ускорителе У-70.

Третья глава посвящена исследованию метода вариации критической энергии в резонансной структуре. Рассмотрены схемы модуляции градиентов квадрупольных линз и кривизны орбиты, приводящие к изменению коэффициента уплотнения орбиты и, как следствие, смещению критической энергии ускорителя. Для магнитооптической структуры коллайдера NICA предложены варианты модернизации с созданием резонансных структур с повышенной критической энергией. Приведены схемы расстановки корректирующих элементов (секступолей), обеспечивающих требуемый режим работы.

В четвертой главе рассмотрена возможность проведения экспериментов по поиску электрического дипольного момента легких ядер. Проанализировано применение концепции квази-замороженного спина в накопительных кольцах. Предложены варианты модернизации ускорительных структур с сохранением их текущего назначения и расширением возможностей для прецизионных измерений. Рассмотрены схемы с использованием электростатических и комбинированных элементов (например, фильтра Вина или электростатического дефлектора с магнитным киккером), обеспечивающих компенсацию спиновых поворотов и реализацию режима квази-замороженного спина.

В заключении даны основные выводы диссертации и обозначены планы дальнейшей работы.

Основные положения диссертационной работы состоят в следующем:

1. Предложена реализация дуальной структуры для комплекса NICA-Nuclotron,

- оптимальная для тяжелых частиц с точки зрения внутриволнового рассеяния и легких частиц с поднятой критической энергией выше энергии эксперимента;
2. Реализован метод вариации критической энергии для магнитооптики коллайдера NICA с отсутствующими магнитами при подавлении дисперсионной функции двумя семействами квадруполей и двумя крайними ячейками поворотной арки;
 3. Представлены результаты численного моделирования продольной динамики с учетом влияния высших порядков разброса по импульсам и моделей продольных импедансов в окрестности критической энергии и сравнение с экспериментальными результатами, полученными на У-70;
 4. Проведен анализ использования гармонического ВЧ при процедуре скачка в коллайдере NICA. Для барьерного ВЧ представлены данные моделирования продольной динамики, а также предложено сокращение длины между барьерами из-за продольной микроволновой неустойчивости;
 5. Предложены модернизированные 8/16-периодичные структуры Nuclotron с квази-замороженным спином для исследования электрического дипольного момента легких ядер, с сохранением функции бустера;
 6. Применен метод фильтров Вина для сохранения направления поляризации на основе введения обводных каналов в структуре коллайдера NICA с квази-замороженным спином для выделения ЭДМ сигнала в поляризованном пучке дейтронов;

Достоверность полученных результатов обеспечивается сочетанием аналитических и численных методов, проверкой их корректного применения и сопоставлением с известными данными в литературе. Результаты, полученные в диссертационной работе, были доложены на нескольких всероссийских и международных конференциях, опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Выводы и положения диссертации полностью обоснованы. Полученные результаты имеют безусловную научную и практическую значимость.

Апробация результатов работы и публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 11 из которых изданы в научных журналах, рекомендованных ВАК, индексируемых Web of Science и/или Scopus.

Замечания:

1. В тексте диссертации иногда встречается смешение понятий «критическая энергия» (как энергия частиц E_{tr}) и «критический гамма-фактор» (γ_{tr}). Хотя контекст обычно позволяет понять смысл, желательно было бы придерживаться единого терминологического аппарата, четко разграничивая безразмерный релятивистский фактор и энергию, особенно в разделах, посвященных скачку энергии и сравнительному анализу структур.
2. На некоторых графиках (например, рис. 1.4, 1.5), иллюстрирующих сравнение времени охлаждения и внутриволнового рассеяния для различных структур, легенда могла бы быть более подробной. Стоит явно указать диапазоны энергий, где применение рассмотренных структур является эффективным, чтобы читатель мог быстрее оценить границы применимости предложенных моделей без обращения к тексту.
3. В работе подробно рассматривается влияние критической энергии на продольную динамику пучка. Вместе с тем, анализ влияния области перехода через критическую энергию на поперечную динамику и динамическую апертуру представлен в меньшей степени. Более детальное рассмотрение данного вопроса позволило бы дополнительно обосновать устойчивость пучка при реализации процедуры скачка критической энергии.

Заключение. Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы.

Диссертационная работа Колокольчикова С.Д. является законченным научным исследованием и соответствует специальности «1.3.2 - Приборы и методы экспериментальной физики». Автореферат верно отражает содержание диссертации.

Диссертация Колокольчикова С.Д. «Исследование динамики поляризованного пучка в ускорительном комплексе NICA-Nuclotron в приложении к изучению электрического дипольного момента лёгких ядер» удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Колокольчиков Сергей Дмитриевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составлен Овсянниковым Дмитрием Александровичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой теории систем управления электрофизической аппаратурой Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (e-mail: d.a.ovsyannikov@spbu.ru, тел. (812) 363-65-37).

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры теории систем управления электрофизической аппаратурой Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» 22 апреля 2026 года, протокол №44/4/12-02-2

Заведующий кафедрой теории систем
управления электрофизической аппаратурой,
доктор физико-математических наук,
профессор

Овсянников Д. А.

Подпись заверяю:
И.О. начальника отдела кадров №3

Константинова И.И.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»

Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9. Телефон (812) 328-97-01

E-mail: spbu@spbu.ru

Сайт: <https://spbu.ru/>

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Amoskov V.M., ... Ovsyannikov D.A., ... et al. Parameter Control of Permanent Magnet Blocks for Creating Precision Elements of Charge Particle Transportation Systems // Phys. Part. Nuclei Lett. – № 22, 676–680 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1547477125700360>
2. Arslanova D., ... Ovsyannikov D., ... et al. Feasibility Study of Permanent Magnet Dipoles for SILA Facility // CYBERNETICS AND PHYSICS, – Vol. 12, №. 4, 2023, 252–256, <https://doi.org/10.35470/2226-4116-2023-12-4-252-256>
3. Arslanova D., ... Ovsyannikov D., ... et al. Modelling PM Dipoles with Longitudinal Field Gradient for SILA Facility // CYBERNETICS AND PHYSICS, – Vol. 13, №. 2, 2024, 99–102 DOI: 10.35470/2226-4116-2024-13-2-99-102
4. Amoskov V.M., ... Ovsyannikov D.A., ... et al. Modelling and design of permanent magnet multipoles for beam transport and focusing. II. Configuring the quad // Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes – 18(4), 454-472. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2022.402
5. Ovsyannikov D. A., Kotina E. D. On Some Problems of Trajectory Beam Program Control. Part II. // The Bulletin of Irkutsk State University. Series Mathematics, 2024 – Vol. 47, PP. 3–11. (in Russian) <https://doi.org/10.26516/1997-7670.2024.47.3>