

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.163.01  
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от **04.06.2026 г. № 44/6**

О присуждении **Колокольчикову Сергею Дмитриевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование динамики поляризованного пучка в ускорительном комплексе NICA-Nuclotron в приложении к изучению электрического дипольного момента лёгких ядер» по специальности 1.3.2 — «Приборы и методы экспериментальной физики» принята к защите 11.03.2026 г., протокол № 42/4 диссертационным советом 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 823/нк от 20 апреля 2023 года.

Соискатель Колокольчиков Сергей Дмитриевич, 1997 года рождения. В 2021 году соискатель освоил программу магистратуры Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 03.04.01 — «Прикладные математика и физика», (диплом 107724 5399980, выданный 10.07.2021г.). В 2021 году поступил в аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц». С 01.12.2022 г. переведён на научную специальность 1.3.15 - «Физика атомных ядер и элементарных частиц,

физика высоких энергий». 06.02.2025 г. переведен на научную специальность 1.3.2 - «Приборы и методы экспериментальной физики» (диплом об окончании аспирантуры №2699122-11-28-848), окончил аспирантуру ИЯИ РАН 30.09.2025 г. В настоящее время работает в должности стажера-исследователя отдела ускорительного комплекса ИЯИ РАН.

Диссертация выполнена в отделе ускорительного комплекса Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук.

Научный руководитель – Сеничев Юрий Валерьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел ускорительного комплекса, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

**Мочалов Василий Вадимович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А.Логанова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"», отделение экспериментальной физики, лаборатория поляризационных экспериментов, ведущий научный сотрудник;

**Кулевой Тимур Вячеславович**, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, заместитель руководителя Комплекса по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам,

-дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» - в своем положительном заключении, подписанном доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой теории систем управления электрофизической аппаратурой Овсянниковым Дмитрием Александровичем; и утвержденном проректором по научной работе СПбГУ Микушевым Сергеем Владимировичем,

указала, что работа отвечает 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 ее автор Колокольчиков Сергей Дмитриевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Соискатель имеет 15 работ по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, из них 11 опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны либо при решающем участии соискателя, либо им самостоятельно.

Список основных работ, по результатам диссертационного исследования:

1. Kolokolchikov S. D., Senichev Yu. V., Aksentyev A. E., Melnikov A. A. Features of dual-purpose structure for heavy ion and light particles // Nuclear Science and Techniques. – 2025. – Vol. 36, № 11. – P. 210.
2. Колокольчиков С. Д., Сеничев Ю. В. Магнито-оптическая структура коллайдера NICA с высокой критической энергией // Ядерная физика и инжиниринг. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 27–36.
3. Колокольчиков С. Д., Сеничев Ю. В. Особенности прохождения и повышения критической энергии синхротрона // Ядерная физика и инжиниринг. – 2023. – Т. 14, № 6. – С. 587–592.
4. Kolokolchikov S. D., Senichev Yu. V., Kalinin V. A. Transition Energy Crossing in Harmonic RF at Proton Synchrotron U-70 // Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – Vol. 87, № 9. – P. 1355–1362.
5. Kolokolchikov S. D., Aksentev A. E., Mel'nikov A. A., Senichev Yu. V. Transition Energy Crossing in NICA Collider of Polarized Proton Beam in Harmonic and Barrier RF // Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – Vol. 87, № 10. – P. 1449–1454.

6. Kolokolchikov S. D., Senichev Yu. V., Aksentev A. E., Melnikov A. A., Ladygin V. P., Syresin E. M. Longitudinal Dynamic in NICA Barrier Bucket RF System at Transition Energy Including Impedances in BLonD // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. – 2024. – Vol. 21, № 3. – P. 419–424.
7. Kolokolchikov S. D., Senichev Yu. V., Melnikov A. A., Syresin E. M. Acceleration and crossing of transition energy investigation using an RF structure of the barrier bucket type in the NICA accelerator complex // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. – Vol. 2420, № 1. – P. 012001.
8. Kolokolchikov S. D., Aksentiev A. E., Melnikov A. A., Senichev Yu. V., Syresin E. M., Ladygin V. P. Transition Energy Crossing of Polarized Proton Beam at NICA // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2024. – Vol. 87, № 3. – P. 212–215.
9. Senichev Yu. V., Aksentyev A. E., Kolokolchikov S. D., Melnikov A. A., Ladygin V. P., Syresin E. M., Nikolaev N. N. Quasi-frozen spin concept of magneto-optical structure of NICA adapted to study the electric dipole moment of the deuteron and to search for the axion // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. – Vol. 2420, № 1. – P. 012052.
10. Senichev Yu. V., Aksentyev A. E., Kolokolchikov S. D., Melnikov A. A., Ladygin V. P., Syresin E. M. Consideration of an Adapted Nuclotron Structure for Searching for the Electric Dipole Moment of Light Nuclei // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2023. – Vol. 86, № 11. – P. 2434–2438.
11. Колокольчиков С. Д., Аксентьев А. Е., Мельников А. А., Сеничев Ю. В., Ладыгин В. П., Сыресин Е. М. Проектирование каналов bypass в ускорительном комплексе NICA для экспериментов с поляризованными пучками по поиску ЭДМ // *Ядерная физика и инжиниринг*. – 2024. – Т. 15, № 5. – С. 457–463.
12. Kolokolchikov S. D., Aksentyev A. E., Melnikov A. A., Senichev Yu. V., Syresin E. M., Ladygin V. P. ByPass optics design in NICA storage ring for experiment with polarized beams for EDM search // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2024. – Vol. 2687, № 2. – P. 022026.
13. Senichev Yu. V., Aksentyev A. E., Kolokolchikov S. D., Melnikov A. A., Nikolaev N. N., Ladygin V. P., Syresin E. M. NICA Facilities for the Search for EDM Light Nuclei // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2024. – Vol. 87, № 4. – P. 436–441.

14. Kolokolchikov S. D., Aksentyev A. E., Melnikov A. A., Senichev Yu. V. Spin Coherence and Betatron Chromaticity of Deuteron Beam in “Quasi-Frozen” Spin Regime // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2023. – Vol. 86, № 12. – P. 2684–2688.
15. Kolokolchikov S. D., Aksentyev A. E., Melnikov A. A., Senichev Yu. V. Spin coherence and betatron chromaticity of deuteron beam in NICA storage ring // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2024. – Vol. 2687, № 2. – P. 022027.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что диссертация обладает внутренним единством, содержит важные физические и методические результаты, имеющие большое научное значение и практическую ценность. Диссертация полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым Положением о порядке присуждения ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией оппонентов и сотрудников ведущей организации и наличием работ высокого научного уровня по близкой тематике.

В отзывах оппонентов и ведущей организации были высказаны следующие критические замечания и пожелания:

1. Реализация дуальной структуры требует введения схемы отдельного питания квадруполей. В диссертации недостаточно подробно рассмотрена эксплуатационная логика переключения режимов: неясно, предусмотрено ли разделение сеансов работы в различных модах тяжелоионной и поляризованной.

2. Полезно добавить в работу оценки по влиянию предлагаемой реализации резонансной и комбинированной магнитооптической структуры в коллайдере NICA на светимость пучка.

3. Использование прямых электродов в фильтрах Вина, предложенных для реализации режима квази-замороженного спина, действительно позволяет достигать высоких напряженностей электрического поля ( $E \sim 10$  МВ/м) без пробоя, в отличие от искривленных дефлекторов. Однако в работе отсутствуют

конкретные оценки предельных значений  $E_{\max}$ , закладываемых в проект с учетом современных технологий вакуумной изоляции.

4. Предложенные в Главе 4 варианты модернизации синхротрона Nuclotron (8- и 16-периодные структуры) предполагают существенное изменение расстановки магнитных элементов и введение прямых участков для фильтров Вина. Не затронут вопрос совместимости новой оптики с существующими системами инжекции из бустера и экстракции на мишени VM@N. Требуется уточнение возможна ли адаптация систем ввода-вывода пучка.

5. Было бы полезно дать оценки влияния “не идеальности” оптики синхротрона на время декогеренции и соответственно на возможность измерения ЭДМ протонов и дейтронов.

6. В тексте диссертации иногда встречается смешение понятий «критическая энергия» (как энергия частиц  $E_{tr}$ ) и «критический гамма-фактор» ( $\gamma_{tr}$ ). 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.

7. На некоторых графиках (например, рис. 1.4, 1.5), иллюстрирующих сравнение времени охлаждения и внутрипучкового 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.

8. 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.

9. В автореферате плохо описаны основные результаты исследования, по существу, только сформулированы. Нужно было в автореферате сократить Введение и подробнее изложить материал, особенно по Главе 4.

10. В тексте диссертации упоминается исследование аксионоподобных частиц, однако, каким образом это делается и как связано с диссертацией непонятно.

11. Во второй главе диссертации показано, что качественно расчеты и исследования, проведенные на синхротроне У70 совпадают, однако, нет количественных оценок, непонятно из текста, с какой точностью совпадают расчеты и экспериментальные результаты.

12. В Главе 2 при моделировании продольной микроволновой неустойчивости использовались упрощенные модели импеданса (индуктивный импеданс  $Z/n=\text{const}$ ). Учитывая, что реальный импеданс кольца NICA имеет сложную частотную зависимость, было бы полезно обсудить, как учет точной модели импеданса может количественно изменить порог неустойчивости при скачке критической энергии, даже если качественная картина останется прежней.

13. Предложенный в Главе 3 метод повышения критической энергии посредством создания резонансной магнитооптической структуры основан на сильной суперпериодической модуляции градиентов квадруполей. Такая организация оптики, при всей своей эффективности для управления критической энергией, неизбежно приводит к росту натуральных хроматических функций и усилению зависимости бетатронных частот от разброса импульса частиц. В диссертации приведены схемы компенсации линейной хроматичности секступолями, однако, недостаточно подробно проанализировано влияние остаточной нелинейной хроматичности и высших порядков хроматических aberrаций, характерных для резонансных структур, на динамику реального пучка с конечным энергетическим спектром.

14. В Главе 4 предложена концепция использования фильтров Вина и обводных каналов для поиска ЭДМ, обеспечивающая длительное время спиновой когерентности. Однако в диссертации недостаточно детально проработана методика выделения истинного сигнала ЭДМ на фоне

систематических эффектов. Отсутствует количественная оценка вклада этих систематических ошибок в измеряемую поляризацию и план мероприятий по их минимизации в эксперименте.

15. Встречается неудачная стилистика, например: «Из-за соотношения заряда к массе макси-мальная энергия протонного пучка достигает 12.4 ГэВ.» - данное утверждение скорее бы соответствовало ограничениям на энергию ионов, так как там доля заряженных частиц может меняться.

В целом, диссертация написана четким и понятным языком, но не лишена небольшого количества опечаток, грамматических и стилистических ошибок. Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Соискатель Колокольчиков С.Д. ответил на заданные в ходе защиты вопросы и согласился с замечаниями.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Предложен метод дуальной структуры для ускорения тяжелых ионов и лёгких ядер;
2. Предложены методы подавления дисперсии в резонансной магнитооптической структуре;
3. Представлены результаты вычисления продольной динамики вблизи критической энергии.
4. Разработаны 8/16-периодические структуры с квази-замороженным спином для выделения ЭДМ сигнала дейтрона и протона;
5. Предложена структура коллайдера NICA с обводными каналами для измерения ЭДМ дейтрона.

Теоретическая и практическая значимость исследования обоснована тем, что:

1. Представленные исследования имеют определяющее значение как для экспериментальной программы на ускорителях NICA и Nuclotron, так и для использования на аналогичных существующих установках.
2. Особое внимание уделено процессам внутривпучкового рассеяния и наличию критической энергии, влияющие на динамику многозарядных тяжёлых ионов и лёгких ядер. С этой целью предложена дуальная

магнитооптическая структура, способная адаптироваться для целей обоих типов.

3. Проведён учёт влияния высших порядков разброса по импульсам и моделей продольных импедансов при пересечении критической энергии. Также рассмотрен метод скачка критической энергии для различных ускоряющих потенциалов с целью сохранения стабильности сгустка.

4. Рассмотрен метод вариации критической энергии путем модуляции дисперсионной функции в резонансной структуре. Для этого может вводиться как суперпериодическая модуляция градиентов квадрупольных линз, так и модуляция кривизны орбиты, тем самым изменяя коэффициент сжатия орбиты.

5. Изучен способ измерения электрического дипольного момента легких заряженных частиц в накопительном кольце. Исследовано применение концепции «квази-замороженного» спина. Рассмотрена возможность модернизации колец с сохранением текущего предназначения и расширением исследовательских возможностей установок.

Применительно к проблематике диссертации результативно использованы комплексы программ численного моделирования MADX, OPTIM, BLoND, BMAD, COSY Infinity. Изложены методы построения программ для численных расчётов. Используются аналитические модели описания физического эксперимента. Описаны особенности внедрения и реализации методики проведения эксперимента. Изучены особенности проведения эксперимента на ускорителях NICA и Nuclotron, даны обоснованные практические и методические рекомендации для оптимизации основополагающих процессов, таких как скачок критической энергии или модуляция градиентов квадрупольных линз для повышения критической энергии.

Представленные в диссертации научные результаты являются новыми, обоснованными и достоверными, что подтверждается качественным согласием результатов численного моделирования с экспериментальными данными. В частности, результаты по методу скачка критической энергии с учётом высших порядков разложения коэффициента уплотнения орбиты, согласуются с экспериментальными данными, полученными на синхротроне У-70. Упомянутые комплексы программ для численного моделирования были

многократно апробированы в ходе решения задач из области исследований. Полученные диссертантом результаты были представлены на основных международных конференциях по тематике исследования.

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично либо при его непосредственном участии. Результаты по подготовке и проведению эксперимента на ускорителе У-70 получены в соавторстве с сотрудниками ИЯИ РАН и ИФВЭ. Автор лично принимал участие в экспериментальном измерении прохождения пучка через критическую энергию, а также построении математической модели синхротрона У-70. Колокольчиков С.Д. также лично, либо при своем определяющем участии, подготавливал к публикации основные печатные работы по теме диссертационного исследования.

На заседании 4 июня 2026 года диссертационный совет принял решение присудить Колокольчикову Сергею Дмитриевичу ученую степень кандидата физико-математических наук за исследование динамики поляризованного пучка в ускорительном комплексе NICA-Nuclotron, а также возможности изучения электрического дипольного момента лёгких ядер.

При проведении тайного голосования, диссертационный совет в количестве **18** человек, из них **6** докторов наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики, участвовавших в заседании, из **26** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: **за - 18**, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель

диссертационного совета 24.1.163.01

доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

\_\_\_\_\_ Кравчук Л.В.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.163.01

кандидат физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_ Демидов С.В.

04.06.2026 г.

М.П.