Приложение 3.

Форма продления
Проекта 06-6-1119-2-2024/2026

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

_____ / _____ /

“____“ _____ 202_ г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОДЛЕНИЯ ПРОЕКТА ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ

1. Общие сведения о проекте

1.1. Шифр темы (для продлеваемых проектов)

06-6-1119-2014

1.2. Шифр проекта (для продлеваемых проектов)

06-6-1119-2-2024/2026

1.3. Лаборатория – ЛИТ

1.4. Научное направление

06 -Информационные технологии

1.5. Наименование проекта

Методы вычислительной физики для исследования сложных систем

1.6. Руководители проекта

Земляная Е.В., Чулуунбаатар О.

1.7. Заместители руководителя проекта

Калиновский Ю.Л., Хведелидзе А.

1.8. Научный руководитель проекта

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Проект нацелен на разработку и применение математических и вычислительных методов для моделирования сложных физических систем, изучаемых в рамках ПТП ОИЯИ и описываемых системами динамических нелинейных, пространственно неодномерных интегральных, интегро-дифференциальных или дифференциальных уравнений, зависящих от параметров моделей. Эволюция решений таких систем может характеризоваться наличием критических режимов, бифуркаций и фазовых переходов. Математическое моделирование является неотъемлемой частью современных научных исследований и требует адекватной математической постановки задач в рамках изучаемых моделей, адаптации известных или развития новых численных подходов для эффективного учета особенностей исследуемых физических процессов, разработки алгоритмов и комплексов программ для высокопроизводительного моделирования на современных вычислительных системах, включая ресурсы МИВК. В 2027–2031 гг. исследования в рамках проекта будут продолжены в следующих основных направлениях:

I. Разработка методов, алгоритмов и комплексов программ для проведения численных исследований взаимодействий различных типов в сложных системах ядерной, атомной, молекулярной физики и квантовой механики.
II. Моделирование многофакторных процессов в материалах и конденсированных средах под внешними воздействиями.
III. Развитие численных методов и решение задач моделирования при проектировании экспериментальных установок и оптимизации режимов их работы.
IV. Моделирование сложных процессов в плотной ядерной материи, включая модели астрофизики и процессы в экспериментальных установках.
V. Моделирование квантовых систем с применением методов квантовой теории информации и гибридных квантово-классических методов программирования.

В результате исследований, проведенных с использованием разработанных методов и комплексов программ, будет получена новая фундаментальная информация об изучаемых физических системах, важная для дальнейшего развития математических моделей, теоретических и экспериментальных исследований.

2.2. Научное обоснование (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

Цель

Разработка и программная реализация вычислительных подходов для исследования методами математического моделирования физических явлений, находящихся в фокусе исследований Института в соответствии с Семилетним планом развития ОИЯИ на 2024–2030 гг.; получение на этой основе новых знаний, необходимых для понимания изучаемых физических процессов, дальнейших теоретических исследований и планирования экспериментальных проектов, актуальных с точки зрения перспективы практических приложений.

Актуальность и новизна

Актуальность исследований в рамках проекта обусловлена его тесной связью с широким спектром научных направлений в рамках Тематического плана ОИЯИ и нацеленностью на создание новых математических методов, алгоритмов и программ, необходимых для успешного решения актуальных задач, возникающих в ходе реализации научных программ в ОИЯИ. В ходе продолжения реализации проекта будут разработаны новые методы, необходимые для успешного проведения основополагающих перспективных и

опережающих исследований сложных физических явлений, описываемых нелинейными многомерными многопараметрическими системами уравнений.

Результатом проекта будут:

(1) оригинальные разработки в области развития методов вычислительной математики, высокопроизводительных вычислений и математического моделирования;
(2) полученные на этой основе результаты численного исследования, актуальные в рамках изучаемых физических проблем.

Основные направления исследований

Исследования в рамках проекта предполагают развитие новых и совершенствование существующих, в том числе созданных участниками проекта, методов на каждом из перечисленных ниже направлений. Исследования охватывают следующий круг задач.

I. Разработка методов, алгоритмов и комплексов программ для проведения численных исследований взаимодействий различных типов в сложных системах ядерной физики и квантовой механики, в том числе:

- исследование физических характеристик подбарьерных реакций слияния/деления тяжелых ядер на основе развития метода сильной связи каналов, коллективных моделей атомных ядер и применения метода конечных элементов для высокоточной дискретизации соответствующих систем уравнений;
- исследование процессов рассеяния тяжелых ионов и частиц на ядрах и взаимодействия тяжелых ионов в диапазоне средних энергий на основе моделей микроскопического оптического потенциала и в рамках транспортно-статистического подхода;
- моделирование химических связей и реакций с участием тяжелых и сверхтяжелых элементов с целью интерпретации результатов термохроматографических экспериментов, проводимых в ЛЯР;
- развитие методов и проведение исследования динамики спиновых ансамблей и холодных атомов в ловушках в рамках квантово-механических моделей.

II. Исследование многофакторных процессов в моделях сложных систем с внешними воздействиями, в том числе:

- моделирование физико-химических и структурных изменений в материалах под действием облучения заряженными частицами, нанокластерами или лазерного облучения; развитие методов расчета характеристик энергетических потерь тяжелыми ионами в облучаемом материале в широком диапазоне зарядового номера налетающих частиц и их относительных скоростей;
- моделирование сверхпроводящих процессов в джозефсоновских структурах различного типа; моделирование динамики спиновых систем в наноматериалах для исследования перспектив создания элементов памяти и передачи информации;
- исследование структуры и свойств полидисперсных фосфолипидных везикулярных систем различного типа, включая нанолекарства, на основе молекулярно-динамических подходов и в рамках метода разделенных формфакторов;
- развитие методов и проведение моделирования сложных процессов в конденсированных средах с диссипацией и внешними воздействиями, описываемых нелинейными уравнениями теории поля.

III. Решение задач, возникающих при разработке и оптимизации режимов работы экспериментальных установок, в том числе:

- развитие методов численного решения систем уравнений, возникающих при моделировании физических полей;

- разработка и программная реализация алгоритмов, направленных на повышение эффективности и оптимизацию численного моделирования сложных магнитных систем ускорителей;
- проведение моделирования магнитных систем для экспериментальных установок, включая численное моделирование физических процессов при формировании магнитного поля циклотрона MSC230 (ЛЯП).

IV. Моделирование физических явлений на основе уравнения состояния плотной ядерной материи, в том числе:

- моделирование сложных процессов в горячей и плотной материи при соударениях тяжелых ионов в диапазоне энергий NICA, включая фазовые переходы с образованием кварк-глюонной плазмы;
- развитие методов и моделирование сложных процессов в астрофизических системах.

V. Разработка новых методов вычислительной физики, основанных на гибридном квантово-классическом программировании, компьютерной математики, и их применение для исследования информационных характеристик квантовых состояний в физике элементарных частиц и ядер, квантовой химии и биофизике.

Методы и подходы, методики

Несмотря на разнообразие заявленных задач, процесс разработки методов и проведения математического моделирования проводится в целом по единой схеме, охватывающей следующие этапы:

- *формулировка математической постановки задачи*, корректно отражающей основные особенности изучаемой проблемы и цели исследования;
- *разработка вычислительного подхода к решению* на основе комплексного применения методов вычислительной математики, символьно-численных и численно-аналитических алгоритмов, нейросетевых и молекулярно-динамических методов, методов квантовых вычислений и компьютерной алгебры, алгоритмов параллельных вычислений, технологий на основе искусственного интеллекта;
- *программная реализация разработанной вычислительной схемы* с использованием средств программирования высокого и сверхвысокого уровня, технологий для организации параллельных и гибридных вычислений на современных высокопроизводительных вычислительных комплексах, с привлечением имеющихся библиотек компьютерных программ и проблемно-ориентированных пакетов программ, с применением специализированного инструментария для создания комфортной информационно-вычислительной среды для программирования и проведения расчетов;
- *проверка корректности разработанных методов и программ* и верификация моделей на основе тестовых расчетов с варьируемыми вычислительными параметрами, сопоставления численных результатов с имеющимися теоретическими оценками и экспериментальными данными;
- *проведение математического моделирования* и получение в ходе анализа численных результатов новой информации о моделируемых физических системах, которые могут служить основой для уточнения и дальнейшего развития теоретических подходов и планирования экспериментов.

Ниже дана краткая характеристика основных задач проекта и приведены некоторые уже полученные результаты как основа дальнейших исследований в рамках проекта.

Первое направление проекта объединяет круг задач, связанных с численным **исследованием характеристик сложных процессов, описываемых моделями атомной, молекулярной, ядерной физики, физики полупроводников и квантовой механики**, необходимых для понимания механизмов ядерных взаимодействий и структуры

участвующих в реакциях ядер, проверки существующих теоретических гипотез, интерпретации получаемых экспериментальных данных, включая проводимые и планируемые эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов и по реакциям с участием легких экзотических ядер. Формулируемые постановки задач в большинстве основаны на принципах квантовой механики и требуют вычисления с высокой точностью решений многомерных уравнений шредингеровского типа и соответствующих краевых задач на собственные значения, решения нелинейных интегральных уравнений для расчета ядерных потенциалов, решения нелинейных динамических уравнений в рамках транспортно-статистического подхода, решения алгебраических систем высокого порядка.

Будут продолжены исследования физических характеристик подбарьерных реакций слияния тяжелых ядер[1], для чего в рамках метода связи каналов будет усовершенствован комплекс программ численного решения задач рассеяния и задач на метастабильные состояния соответствующей системы уравнений Шредингера с большим количеством связанных каналов. Для расчёта спектральных характеристик атомных ядер в современных коллективных моделях, будут адаптированы вычислительные схемы, алгоритмы и программы решения многомерных (до 6-мерных) эллиптических краевых задач на основе метода конечных элементов[2].

Будут продолжены исследования физических характеристик ядро-ядерных взаимодействий, включая реакции с участием легких и тяжелых ядер с нейтронным гало, с целью получения на основе совместного анализа численных и экспериментальных результатов новой информации о структуре таких ядер. В 2004–2005гг. в сотрудничестве с ЛТФ на основе анализа данных протон-ядерного рассеяния в рамках микроскопической модели оптического потенциала в широком диапазоне энергий[3] сделаны оценки влияния ядерной среды на амплитуду рассеяния в зависимости от энергии налетающего протона и атомной массы ядра-мишени. Проведено исследование реакции рассеяния $^{7}Li+^{10}B$ и реакции $^{7}Li+^{10}B\rightarrow{}^{6}Li+^{11}B$ при лабораторной энергии пучка 58 МэВ. Результаты микроскопического анализа данных, полученных на циклотроне У-400 в ЛЯР, указывают на наличие протон-нейтронного гало в структуре возбужденного состояния $^{6}Li_{0+}$ (3.56 МэВ)[4]. Планируется существенная модернизация реализованного в расчетах микроскопического подхода с целью расширения спектра энергий и типов реакций. На этой основе будут исследованы характеристики ядерных взаимодействий в широком диапазоне энергий и атомных номеров сталкивающихся ядер.

С целью повышения точности и сокращения времени счета будут модернизированы методы и программы, реализующие транспортно-статистическую модель для расчета физических характеристик взаимодействий тяжелых ионов при средних энергиях. К настоящему времени проведено уточнение ряда вычислительных и физических параметров модели на основе сопоставления с имеющимися экспериментальными данными и теоретическими оценками, а также модифицирована процедура моделирования реакций фрагментации в модели BNV-SMM, позволившая сократить время счета и улучшить согласие с экспериментальными данными реакций фрагментации по сравнению с другими известными подходами[5]. Предполагается дальнейшее развитие данного подхода и проведение на его основе расчетов для расширенного спектра изучаемых физических характеристик.

Моделирование динамики спиновых ансамблей и холодных атомов в ловушках в рамках проекта основано на численном решении сформулированных нелинейных интегро-дифференциальных уравнений и применении метода самосогласованных автомодельных приближений, оптимизированного для решения нелинейных уравнений, не содержащих

[1] P.W. Wen, O. Chuluunbaatar, P. Descouvemont, et al., Phys. Lett. B 863, 139383 (2025).
[2] O.O. Kovalev, B. Batgerel, A.A. Gusev, et al., Lect. Notes Comput. Sci. 16235, 210–222 (2026).
[3] I. Abdul-Magead, V.K. Lukyanov, E.V. Zemlyanaya, K.V. Lukyanov, Intern. J. Modern Phys. E 33, 2441012 (2024).
[4] E.V. Zemlyanaya, K.V. Lukyanov, V.K. Lukyanov, et al., Bulletin Rus. Acad. Sci.: Phys. 89, 1236–1240 (2025).
[5] T.I. Mikhailova, B. Erdemchimeg, Yu.M. Sereda, Bulletin Rus. Acad. Sci.: Phys. 89, 1216–1222 (2025).

малых параметров. На основе разработанных подходов[6] предполагается получение новых результатов по моделированию динамики систем, актуальных с точки зрения перспективы технологических приложений.

Еще одной задачей проекта является построение стохастической модели химических реакций с участием тяжелых и сверхтяжелых элементов. В рамках этого направления реализовано расширение функционала программного пакета TANGELO для симуляции квантовых вычислений с целью учета релятивистских поправок к кулоновским взаимодействиям при расчетах химических соединений с участием сверхтяжелых элементов[7]. Планируется получение методами математического моделирования уточненной и новой информации о характеристиках ядер, участвующих в планируемых экспериментах по синтезу сверхтяжелых элементов, об электронной структуре и химических связях в сверхтяжелых атомах, о влиянии релятивистских эффектов на эти характеристики.

Численное исследование многофакторных процессов в конденсированных средах под внешними воздействиями, как правило, требует учета таких особенностей как существенная зависимость моделируемых процессов от параметров моделей, фазовые переходы, множественность решений, возможные бифуркации и критические режимы.

Одной из важных задач проекта в данном направлении является исследование сложных процессов в материалах под действием облучения заряженными частицами высоких энергий. Актуальность подобных исследований обусловлена перспективами разработки методов целенаправленной модификации свойств материалов, а также необходимостью изучения стойкости материалов к различным видам облучения. За первые два года реализации проекта на основе нестационарного уравнения теплопроводности в системе координат, связанной с движущимся фронтом испарения, а также в рамках двухтемпературной модели термического пика исследована динамика лазерной абляции материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов[8].

Планируется дальнейшее развитие и использование вычислительных схем на основе комбинированного подхода, сочетающего преимущества моделей на основе уравнений сплошных сред с моделями, описываемыми системами уравнений движения частиц. Ожидается получение новых результатов по динамике дефектных структур в образцах под действием облучения.

Исследование сверхпроводящих процессов в джозефсоновских и спиновых наноструктурах в зависимости от конфигурации изучаемых систем и характера внешних воздействий относится к традиционному направлению исследований в НОВФ ЛИТ, которое проводится в сотрудничестве с коллегами из ЛТФ. Активный интерес исследователей к данной тематике связан с перспективами создания на этой основе элементов памяти и передачи информации. Соответствующие математические модели описываются начальными или начально-краевыми задачами для систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с большим количеством параметров. Численное исследование подразумевает разработку и сравнительное тестирование вычислительных схем с целью выбора подходящих численных подходов, а также реализацию параллелизма для проведения высокопроизводительного компьютерного моделирования с целью изучения влияния различных факторов на динамику сверхпроводящих процессов. Результаты в этом направлении вошли в кандидатскую диссертацию участника проекта, сотрудника ЛИТ Башашина М.В., успешно защищенную в 2025 г. Для повышения эффективности работ по созданию компьютерных программ и проведению вычислений развивается экосистема для моделирования

[6] V.I. Yukalov, E.P. Yukalova, Ann. Phys. 467, 169716 (2024).
[7] V.Yu. Yushankhai, L.A. Siurakshina, Phys. Part. Nucl. 56, 1004–1008 (2025).
[8] I.V. Amirkhanov, I. Sarkhadov, Z.K. Tukhliev, et al., J. Surf. Investig.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 18, 348–353 (2024).

джозефсоновских структур на базе платформы *Jupyter Book,* пополненная в 2024 году программными модулями для исследования динамики сверхпроводникого квантового интерферометра с двумя и более джозефсоновскими переходами (СКВИД постоянного тока). Параллельная реализация с использованием библиотеки Numba обеспечила существенное ускорение расчетов[9] в разработанной вычислительной схеме для построения вольт-амперной характеристики СКВИД под действием магнитного поля. Проведено компьютерное моделирование контролируемого переворота намагниченности в цепочке ϕ_0 переходов[10].

Моделирование сложных процессов в конденсированных средах, описываемых нелинейными уравнениями теории поля, требует применения методов продолжения по параметрам с идентификацией бифуркаций и выходом на новые ветви решений, повышения точности дискретной аппроксимации в вычислительных схемах для обеспечения надежности получаемых численных результатов, реализации параллелизма для ускорения массовых расчетов в широком диапазоне параметров моделей. Будут разработаны методы и проведено исследование нелинейных процессов формирования локализованных структур в конденсированных средах с диссипацией и внешними воздействиями, описываемых различными типами уравнений теории поля. В том числе, для учета влияния кулоновских сил на процесс автолокализации сольватированного электрона в 2024г. в рамках проекта проведена модификация метода и комплекса программ, реализующего численное решение соответствующей системы нелинейных уравнений, что позволило улучшить согласие численных результатов с имеющимися экспериментальными данными. Другим важным направлением является исследование осциллонов в модели φ^4 – долгоживущих осциллирующих по времени пространственно-локализованных структур, имеющих ряд актуальных приложений в космологии и физике высоких энергий. В сотрудничестве с Кейптаунским университетом в 2024–2025 гг. проведено численное исследование влияния параметров частоты и радиуса на структуру и свойства стоячих волн в шаре конечного радиуса, аппроксимирующих трехмерные осциллоны в модели φ^4. Найдены сосуществующие типы стоячих волн, исследована их взаимосвязь, а также зависимость энергии и интервалов устойчивости волн от радиуса и частоты[11].

Исследование структуры и динамики эволюции фосфолипидных мембран в везикулярных и бицеллярных системах имеет важное значение для понимания фундаментальных биохимических процессов в живых организмах, а также для получения информации, практически значимой для разработки и повышения эффективности лекарственных препаратов. Исследования в этом направлении проводятся на основе молекулярно-динамических подходов с применением пакета GROMACS на гетерогенной вычислительной платформе HybriLIT. Предполагается реализация таких расчетов на графических ускорителях для моделирования как можно более длительного времени эволюции системы. Результаты уже проведенных совместно с коллегами из ЛНФ и ЛРБ в период реализации проекта исследований реорганизации липидных мембран, вызванной пептидом Aβ (25–35) в условиях, имитирующих доклиническую стадию болезни Альцгеймера, опубликованы в 2024 г[12]. Также, ведутся исследования везикулярных систем различного типа в зависимости от температуры и химического состава среды на основе метода разделенных формфакторов с использованием разных подходов для моделирования фосфолипидного бислоя. Разработан веб-интерфейс для онлайн-анализа экспериментальных данных малоуглового рассеяния на базе облачной инфраструктуры ОИЯИ с использованием инструментов пакета ROOT для реализации параллелизма[13]. В

[9] A. Rahmonova, I. Rahmonov, O. Streltsova, M. Zuev, Phys. Part. Nucl. 55, 528–531 (2024).
[10] A. Rahmonova, O. Streltsova, I. Rahmonov, M. Zuev, Phys. Part. Nucl. 56, 1592–1598 (2025).
[11] E. Zemlyanaya, A. Bogolubskaya, M. Bashashin, et al., Discrete Contin. Models Appl. Comput. Sci. 32, 106–111 (2024).
[12] S. Kurakin, D. Badreeva, E. Dushanov, et al., Biochim. Biophys. Acta Biomembr. 1866, 184237 (2024).
[13] K. Lukyanov, A. Soloviev, T. Solovjeva, E. Zemlyanaya, Phys. Part. Nucl. 56, 1509–1513 (2025).

сотрудничестве с ЛНФ и ИБМХ РАН проведено исследование структуры везикул фосфолипидной транспортной наносистемы и лекарств на ее основе по данным малоуглового рассеяния нейтронов, полученным на малоугловом спектрометре «Yellow Submarine» (Будапешт). Показано существенное влияние ряда факторов, включая наличие примесей и концентрацию раствора, на размеры везикул и их структуру[14].

При решении задач, возникающих при разработке и оптимизации режимов работы экспериментальных установок и при моделировании физических полей, необходимо обеспечить качественную дискретизацию математических уравнений, эффективное численное решение возникающих нелинейных уравнений. Достоверный расчет многочисленных характеристик магнитных полей, необходимых при подготовке новых конфигураций экспериментальных установок, предъявляет высокие требования к корректности математических формулировок задачи, робастности используемых численных подходов, высокой точности и производительности вычислений. Данное направление также является традиционным для сотрудников отдела НОВФ ЛИТ. В числе достижений участников проекта – проведенное компьютерное моделирование магнитных систем, включая дипольные и квадрупольные сверхпроводящие магниты коллайдера и бустера проекта NICA ОИЯИ[15].

Для получения достоверных численных результатов в таких расчетах необходимо уменьшать ячейки дискретных сеток, что приводит к очень большим размерностям решаемых систем уравнений и, как следствие, к значительному увеличению времени расчета. В этой связи требуется оптимизация вычислительных схем и разработка параллельных алгоритмов для эффективного использования высокопроизводительных вычислительных ресурсов, включая ресурсы МИВК. В рамках проекта ведется разработка, оптимизация для высокопроизводительных расчетов и тестирование методов численного решения задач магнитостатики в различных математических постановках. В числе результатов 2024–2025 гг. в рамках данного направления – предложенная комбинированная процедура[16] на основе метода конечных элементов, позволяющая снизить вычислительные затраты без потери точности при решении 3D задач магнитостатики со сложной геометрией и с использованием магнитного векторного потенциала, а также реализация возможностей компьютерного зрения и искусственного интеллекта для оптимизации движения пучка в рамках программы CORD (Closed ORbit Dynamics), реализующей расчеты по влиянию бетатронных колебаний и фазового движения частиц пучка на магнитное поле циклотрона MSC230[17]. Достигнутые за первые два года реализации проекта результаты открывают перспективы дальнейших исследований как в области развития новых вычислительных методов для моделирования физических полей в различных условиях, так и в области компьютерного моделирования и различных режимов работы крупных экспериментальных установок в ОИЯИ с целью их оптимизации.

Продвижение вперед в области **изучения фундаментальных свойств ядерной материи при экстремальных плотностях** требует создания надежных вычислительных методов, реализующих разрабатываемые теоретико-феноменологические подходы для моделирования сложных процессов и фазовых переходов в сверхплотном ядерном веществе, возникающих при соударениях тяжелых ионов в области энергий проекта NICA. Актуальной задачей в связи с планируемыми экспериментами на установке NICA является изучение свойств связанных состояний в плотной и горячей ядерной среде. Для проведения численного моделирования физических явлений на основе уравнения состояния плотной

[14] E. Zemlyanaya, M. Kiselev, V. Chausova, et al., Int. J. Mod. Phys. E, 2025, https://doi.org/10.1142/S021830132641003X
[15] H.G. Khodzhibagiyan, P.G. Akishin, A.V. Butenko, et al., Nat. Sci. Rev. 1, article number 6 (2024).
[16] A.M. Chervyakov, Phys. Part. Nucl. Lett. 21, 1074–1083 (2024).
[17] O.V. Karamyshev, I.D. Lyapin, T.V. Karamysheva, et al., Phys. Part. Nucl. Lett. 22, 690–698 (2025).

ядерной материи будут использованы сформулированные участниками проекта математические постановки задач для нелинейных дифференциальных уравнений, описывающие сложные процессы как в астрофизических системах, так и при столкновениях тяжелых ионов в экспериментальных условиях, учитывающие такие особенности моделируемых систем как возможность изменения фазового состояния ядерной материи, кратковременность изучаемых процессов, необходимость учета температурных эффектов. В частности, к настоящему времени участниками проекта развита потенциальная модель с нелокальным взаимодействием[18], в рамках которой сформулирована система уравнений для описания спектра векторных мезонов. Это обеспечивает возможность вычисления спектра масс, констант взаимодействия, нормировок и выбор подходящих форм-факторов. Используемый в данной нелокальной модели феноменологический выбор вершины векторного мезона будет достаточным для описания свойств тяжелых кваркониев J/ψ(Y): процессов рождения и диссоциации кваркониев при энергиях соударения тяжелых ионов на эксперименте NICA.

Численное моделирование в данном направлении требует привлечения как традиционного аппарата итерационных и сеточных методов решения нелинейных дифференциальных и интегральных уравнений, так и развития нейросетевых алгоритмов для решения дифференциальных уравнений и для вычисления многомерных интегралов, возникающих при описании процессов рассеяния и рождения частиц в плотной и горячей ядерной материи. Планируется разработка методов проверки результатов компьютерного моделирования на основе использования данных наблюдений по компактным звёздам и экспериментальных данных по соударениям тяжелых ионов, с применением байесовских методов оценки свободных параметров моделируемых процессов и моделей на основе уравнения состояния сверхплотной материи. Будут созданы методы и программы для моделирования процессов в сильновзаимодействующей горячей и плотной ядерной материи, возникающей в соударениях тяжелых ионов при энергиях NICA, включая процессы рассеяния и рождения частиц и образование кварк-глюонной плазмы. Численные результаты, полученные на основе разработанных методов и программ внесут существенный вклад в понимание фундаментальных процессов в моделируемых системах. Будет разработан и реализован метод верификации моделей на основе уравнения состояния сверхплотной ядерной материи по данным многоканальной астрономии. Разработанное и существующее программное обеспечение будет интегрировано в единую информационно-вычислительную систему для унифицированной работы с разными моделями, включая проведение интерактивных расчетов характеристик нейтронных звезд на основе уравнения состояния холодного и плотного вещества.

Важнейшим направлением проекта является **развитие методов моделирования квантовых систем с применением квантовой теории информации и гибридных алгоритмов квантово-классического программирования**. Современный прогресс квантовых технологий, обусловленный синтезом знаний фундаментальных закономерностей микромира и решением нетривиальных инженерно-технических задач, послужил сильнейшей мотивацией создания нового раздела науки — квантовой информатики. В свою очередь достижения последней связаны со становлением новых направлений вычислительной физики и компьютерной математики, в основу которой положены базовые принципы квантовой теории. Многофакторное описание квантовых систем в рамках квантовой информатики подразумевает, наряду со стандартным набором физических характеристик, использование статистически-информационных величин. Для решения задач квантового моделирования в рамках проекта используются методы компьютерной алгебры, символьно-численные алгоритмы в сочетании с развиваемым в ЛИТ формализмом описания квантовых систем в фазовом пространстве в терминах квази-вероятностных распределений. При решении эволюционных задач в квантовых системах

[18] A. Friesen, Yu. Kalinovsky, A. Khmelev, Eur. Phys. J. A 62. article number 6 (2026).

предполагается применение теории алгебр и групп Ли в синтезе с известными квантово-классическими алгоритмами квантовых вычислений.

Особое место в планируемых на 2027–2031 гг. исследованиях будут занимать исследования вычислительного ресурса составных квантовых систем, позволяющего разработать эффективные вычислительные схемы на основе квантовых алгоритмов и методов компьютерной алгебры. Разработанные методы и алгоритмы будут применяться для вычислений физических характеристик в различных квантово-полевых и конечномерных квантовых систем. На этой основе будут созданы новые методы квантового моделирования процессов хранения и передачи информации в открытых и закрытых квантовых системах с учетом их информационного ресурса.

На основе применения гибридных квантово-классических схем программирования планируется оптимизация существующих классических симуляторов и создание новых, позволяющих уменьшить требуемые вычислительные мощности за счет создания новых эффективных методов и программ с ориентацией на гетерогенную платформу HybriLIT. В том числе, в ходе реализации задач проекта по данному направлению в 2024–2025 гг. проводилось моделирование работы алгоритма квантовой аппроксимации для задачи оптимизации (QAOA) на симуляторе квантовых вычислений Cirq квантового полигона HybriLIT ОИЯИ применительно к задаче поиска состояния с наименьшей энергией для модели Изинга с продольным магнитным полем[19].

Ожидаемые результаты в первый год реализации проекта

1. Разработка конечно-элементных методов решения краевых задач для системы большого числа ОДУ для расчета надбарьерных и подбарьерных реакций слияния тяжелых и супертяжелых ядер; развитие конечно-элементных методов решения многомерных (до 6-мерных) эллиптических краевых задач, ориентированных на анализ коллективных моделей атомного ядра; методов расчёта характеристик ионизации атомов с внутренних оболочек быстрыми электронами в кинематике электронной импульсной с учетом искажения плоских волн электронов.
2. Проведение численного исследования наблюдаемых физических характеристик ядро-ядерных взаимодействий и взаимодействий частиц с ядрами в широком диапазоне энергий на основе микроскопических моделей оптического потенциала и транспортно-статистических моделей, включая процессы передачи нуклонов и фрагментации ядер при взаимодействиях тяжелых ионов.
3. Дальнейшее развитие и оптимизация метода автомодельных приближений, исследование на этой основе квантово-механических систем, включая спиновые ансамбли и холодные атомы в ловушках.
4. Развитие методов тензорных сетей и их применение для описания неравновесной динамики низкоразмерных многочастичных квантовых систем, проведение расчетов на этой основе, включая моделирование динамики системы ядерных спинов C_{13} в решётке алмаза.
5. Дальнейшее исследование осциллонов в рамках одно- и трехмерной модели φ^4 на основе совокупного применения вариационного подхода и аппроксимации осциллонов стоячими волнами в шаре конечного радиуса с целью получения новых знаний о динамике осциллонов в области высоких и низких частот, их устойчивости, бифуркациях, резонансных явлениях и новых ветвях решений.
6. Дальнейшее развитие потенциальной модели кваркония с нелокальным ядром взаимодействия, вычисление на этой основе спектра масс, констант взаимодействия, нормировок с подходящим выбором форм-факторов и волновых функций тяжелых кваркониев.

[19] Yu. Palii, D. Belyakov, A. Bogolubskaya, et al., Phys. Part. Nucl. 56, 1661–1669 (2025)

7. Разработка вычислительных методов и программ для расчёта коллективных пионных состояний в плотной ядерной материи на основе функций Мигдаля и Линдхарда. Развитие алгоритмов вычисления спектра пионных возбуждений, пионных щелей и критических параметров возникновения пионного конденсата в широком диапазоне плотностей при нулевой температуре. Анализ точныости вычислительных схем на основе функций Мигдаля и Линдхарда с приближениями, широко используемыми в моделях охлаждения нейтронных звёзд.

8. Развитие программного комплекса для моделирования охлаждения нейтронных звёзд в рамках различных моделей на основе уравнения состояния плотной ядерной материи, допускающих существование нескольких устойчивых конфигураций компактных звёзд одинаковой массы. Численное моделирование термической эволюции нейтронных звёзд для случаев, когда одной и той же гравитационной массе соответствуют различные внутренние структуры вещества. Анализ влияния фазовых переходов в плотной материи на термическую эволюцию компактных звёзд.

9. Развитие методов конечно-элементного анализа и их применение для моделирования и предсказания электромагнитных, механических и тепловых свойств нового сверхпроводника MgB_2 с учётом имеющихся экспериментальных данных, с целью оценки его возможного использования в магнитных системах ускорителей.

10. Исследование и классификация различных источников адаптивности в численном решении интегралов Римана с помощью искусственного интеллекта, развитие методов повышенной точности расчетов интегралов Римана.

11. Исследование взаимодействия различных типов ионов с низкими и промежуточными энергиями и мишеней из вольфрама на основе континуально-атомистической модели.

12. Оптимизация программы моделирования движения пучка в циклотронах, включая разработку кода для численного решения соответствующих уравнений движения методом Бориса–Вэй (Boris–Vay), сравнительный анализ точности методов Рунге–Кутты 4го порядка и Бориса–Вэй для характерного для циклотронов времени ускорения заряженных частиц.

13. Исследование зависимости ширины ступеньки Шапиро от амплитуды внешнего излучения в φ_0 переходе на поверхности топологического изолятора. Исследование возможностей управления состоянием намагниченности в СКВИДе на основе φ_0 перехода на поверхности топологического изолятора.

14. Численное исследование влияния апериодического упорядочения, геометрической фрустрации и топологии на локальные сверхпроводящие свойства квазикристаллических решёток, включая условия зарождения, подавления и пространственного перераспределения сверхпроводящего параметра порядка.

15. Проведение компьютерного моделирования магнитных систем с целью поиска в сотрудничестве с ЛФВЭ и ЛЯП путей их оптимизации в рамках экспериментов, проводимых в ОИЯИ.

16. Детальный обзор и классификация существующих подходов к декомпозиции конечномерных квантовых систем, построение представления групп Вейля–Гейзенберга и операторов смещения в базисе, адаптированном к структуре тензорного произведения.

17. Расчет количественных характеристик квантового эффекта Бернштейна.

18. Формулировка эффективной схемы приготовления начального состояния, троттеризация эволюционного оператора для уравнения Линдблада и реализация соответствующей квантовой схемы на квантовом симуляторе NVIDIA cuQuantum.

19. Исследование аналитических свойств многократных гипергеометрических рядов, возникающих в результате функциональной редукции фейнмановских интегралов. Вывод систем дифференциальных уравнений для интегралов, зависящих от минимального числа переменных.

20. Повышение устойчивости работы квантовых вентилей SU(2) по отношению к внешним шумам на основе их факторизации на элементарные компоненты.

21. Проведение начальных методических исследований по задачам вложения QUBO-графов в топологию квантовых отжигателей (D-Wave Zephyr). Разработка и тестирование программного прототипа алгоритмов вложения с использованием библиотек D-Wave Ocean SDK.

Ожидаемые результаты за весь период реализации проекта

1. Разработка новых вычислительных схем, алгоритмов и комплексов программ для решения начально-краевых и краевых задач для систем многомерных уравнений исследования коллективных моделей атомного ядра и ядерных реакций слияния.

2. Развитие методов и программ для исследования ядро-ядерных взаимодействий и взаимодействий частиц с ядрами при средних энергиях на основе микроскопических моделей оптического потенциала и транспортно-статистических моделей, получение на этой основе новой информации о закономерностях в механизмах таких реакций под влиянием энергии налетающих частиц и других факторов.

3. Развитие оптимальных методов и компьютерных программ для описания сложных статистических и квантовых систем с помощью новых характеристик упорядоченности, корреляций и комплексности. Исследование на этой основе функционирования вероятностных динамических сетей при возможности управления ими с помощью машинного обучения.

4. Исследование методами тензорных сетей неравновесной динамики низкоразмерных многочастичных квантовых систем, включая расчет по quench-протоколу спектральных функций одномерных моделей Хаббарда, Изинга в поперечном поле.

5. Разработка методов и исследование процессов формирования и свойств локализованных структур в нелинейных средах, описываемых различными типами нелинейных уравнений теории поля и имеющих актуальные приложения в рамках многофакторных моделей сложных физических систем. Исследование нелинейных PT-симметричных систем и систем с нарушением PT-симметрии, описывающих конечномерные модели теории конденсированного состояния.

6. Разработка новых алгоритмов для аналитических и численных расчетов диаграмм рождения $J/\psi(Y)$ в реакциях $gg \rightarrow gJ/\psi$, исследование спиральных амплитуд в таких реакциях, зависимостей сечений рождения тяжелых кваркониев от переданного импульса, обобщение на случай конечных температур и плотностей.

7. Разработка программного комплекса для численного моделирования микрофизических и термических процессов в нейтронных звёздах. Проведение на этой основе вычислительных экспериментов по моделированию охлаждения нейтронных звёзд в широком диапазоне параметров уравнения состояния и моделей сверхпроводимости нуклонной материи. Сопоставление результатов численного моделирования с данными наблюдений по температурной эволюции нейтронных звёзд. Адаптация разработанных методов и программ для расчетов на высокопроизводительных вычислительных системах.

9. Развитие методов повышения эффективности расчётов и уменьшения затрат вычислительных ресурсов при решении задач магнитостатики в смешанных математических постановках и систем уравнений, описывающих распределение физических полей в 2D и 3D областях различных конфигураций.

10. Оптимизация методов и программ для моделирования движения пучка в циклотронах, разработка программного модуля для моделирования обратного движения пучка частиц с учетом потерь на элементах структуры.

11. Разработка методов моделирования взаимодействия различных типов частиц с металлическими и композитными мишенями на основе континуально-атомистической модели с целью прогнозирования структурных изменений материалов под воздействием облучения.

12. Развитие методов и проведение численного исследования сложных процессов в сверхпроводниковых структурах, включая различные конфигурации систем джозефсоновских переходов и интертипных сверхпроводников.

13. Развитие методов и проведение в сотрудничестве с ЛФВЭ и ЛЯП компьютерного моделирования магнитных систем в экспериментальных установках ОИЯИ с целью их оптимизации.

14. Построение теории декомпозиции основных конструкций N-мерной квантовой механики составных систем (группы Вейля–Гейзенберга, операторы смещения, функции Вигнера) с использованием всевозможных факторизаций числа N и китайской теоремы об остатках. Создание и тестирование прототипа программного комплекса, реализующего соответствующие алгоритмы, и позволяющего рассчитывать эффекты запутанности квантовых состояний составных систем.

15. Анализ многочастичных квантовых корреляций в многокубитных системах, включая системы тождественных частиц, в рамках формализма фазового пространства конечномерных квантовых систем.

16. Моделирование квантовых битов на основе квантовых точек с управлением нерезонансным лазером.

17. Моделирование на симуляторе квантовых вычислений нерелятивистской открытой квантово-полевой системы с калибровочной группой SU(2) с динамическими фермионами в гамильтоновом формализме в марковском пределе, описываемом уравнением Линдблада.

18. Создание базы данных с аналитическими результатами для однопетлевых фейнмановских интегралов. Вычисление поправок $\varepsilon = (4-d)/2$ для однопетлевых фейнмановских интегралов, возникающих в процессах, исследуемых на LHC, с помощью метода функциональной редукции.

19. Разработка квантовых алгоритмов и схем для динамического описания топологических фазовых переходов и создание программных средств к изучению критического поведения открытых квантовых систем

20. Разработка методов повышения устойчивости квантовых вентилей по отношению к внешним шумам на основе использования дифференциально-геометрических структур унитарной группы.

21. Разработка и реализация программного фреймворка для имплементации (minor embedding) задач квадратичной бинарной оптимизации (QUBO), возникающих в задачах реконструкции треков, в архитектуру квантовых отжигателей (D-Wave, топология Zephyr).

22. Реализация и тестирование алгоритмов вложения с использованием библиотек D-Wave Ocean SDK (dwave-neal, qbsolv) и других оптимизаторов (CPLEX, Gurobi) для сравнительного анализа гибридных вычислительных схем.

23. Исследование и развитие методов отображения графов задач на физическую связность кубитов квантового оборудования с учётом геометрических и модульных свойств детекторных топологий.

Научный задел и факторы риска

Участники проекта обладают высокой квалификацией в области вычислительной физики и современных информационных технологий, имеют значительный опыт разработки методов и программ для исследования сложных физических систем, а также успешного проведения высокопроизводительного компьютерного моделирования. В состав исследовательского коллектива входят увлеченные молодые ученые и инженеры, а также опытные ученые, известные своими достижениями в области разработки методов вычислений и математического моделирования. В числе участников проекта 28 кандидатов и 14 докторов наук. Благодаря регулярно проводимым в ЛИТ совещаниям, ИТ-школам, практикам, семинарам, молодые специалисты имеют возможность повышать свой научный уровень и ИТ-квалификацию, необходимые для успешного решения задач проекта. За

первые два года реализации проекта (2024–2025 гг.) участниками проекта из ЛИТ в сотрудничестве с коллегами из других лабораторий и зарубежных научных центров подготовлено более 120 научных публикаций, опубликованы три монографии и два учебных пособия по тематике проекта, в библиотеку программ JINRLIB переданы два новых комплекса программ, реализующих методы высокопроизводительного моделирования физических характеристик в джозефсоновских структурах, руководителями проекта подготовлен обзор[20] в журнале Natural Science Review по развитию и использованию итерационных схем на основе Непрерывного аналога метода Ньютона – важного инструмента для решения ряда задач проекта. Цикл работ в рамках тематики проекта «Вычислительные методы и проблемно-ориентированные комплексы программ решения некоторых уравнений в частных производных физических процессов и систем» удостоен в 2025 году III Премии ОИЯИ за научно-методические и научно-технические работы 2024 года. Коллектив участников проекта пополнился за счет поступления на работу в ЛИТ аспирантов и молодых специалистов. Ряд магистерских проектов студентов Дубненского филиала ВМК МГУ напрямую связан с задачами в рамках тематики проекта. Таким образом, с учетом имеющегося у коллектива участников проекта научного задела и уже достигнутых в первые два года реализации проекта результатов есть все основания полагать, что задачи проекта будут успешно выполнены.

В качестве факторов риска отметим следующие.

- Поскольку исследования в рамках проекта тесно увязаны с исследованиями, проводимыми в других лабораториях ОИЯИ, существенное изменение исследовательских планов в подразделениях ОИЯИ может привести к неполному выполнению задач данного проекта.
- Негативное влияние на успешную реализацию задач проекта могут оказать ограничения в доступе к лицензированному программному обеспечению и к высокопроизводительным вычислительным ресурсам.
- Форс-мажорные обстоятельства, в том числе связанные с возможными осложнениями геополитической обстановки и ограничительными мерами в период эпидемий, также могут препятствовать успешному решению задач проекта в полном объеме.

2.3. Предполагаемый срок выполнения
2027–2031

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

ЛИТ Абгарян В., Адам Г., Адам С., Айриян А.С., Айрян Э.А., Акишин П.Г., Аникина А.И., Бадреева Д.Р., Барашенков И.В., Башашин М.Б., Боголюбская А.А., Бордаг Л., Буреш М., Буша Я. (мл.), Буша Я. (ст.), Верховцева К.Д., Волохова А.В., Воскресенская О.О., Годеридзе Д., Григорян О., Гусев А.А., Зуев М.И., Карамышева Т.В., Ковалев О.О., Корняк В.В., Кулябов Д.С., Лукьянов К.В., Мавлонбердиева С.Д., Махалдиани Н.В., Малых М.Д., Михайлова Т.И., Никонов Э.Г., Палий Ю., Папоян В.В., Подгайный Д.В., Полякова Р.В., Рахмонова А.Р., Рихвицкий В.С., Рогожин И.А., Сархадов И., Саха Б., Стрельцова О.И., Сюракшина Л.А., Тарасов О.В., Толочко Е.Н., Торосян А.Г., Тухлиев З.К., Хмелев А.В., Червяков А.М., Чулуунбаатар Г., Чулуунбаатар Х., Шарипов З.А., Юкалова Е.П., Юлдашев О.И., Юлдашева М.Б., Ямалеев Р.М.

[20] E.V. Zemlyanaya, O. Chuluunbaatar, Natural Science Review 3, 200605 (2026)

ЛТФ Абдельгани М.А., Виницкий С.И., Воскресенский Д.Н., Гнатич М., Донков А.А., Куликов К.В., Лукьянов В.К., Мардыбан Е.В., Назмитдинов Р.Г., Попов Ю.В., Рахмонов И.Р., Фризен А.В., Шукринов Ю.М., Юкалов В.И., Юшанхай В.Ю.

ЛЯР Батчулуун Э.

ЛНФ Киселев М.А., Кучерка Н., Перепелкин Е.Е.

ЛЯП Карамышев О.В., Карамышева Г.А., Лавров Г.К., Ляпин И.Д., Попов Е.П.

ЛФВЭ Белов О.В., Бычков А.В., Никифоров Д.Н.

ЛРБ Бугай А.Н., Чижов А.В.

2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	**Распределение по годам**				
	2027	2028	2029	2030	2031
Хранение данных (ТБ) - EOS - Ленты					
Tier 1 (ядро-час)					
Tier 2 (ядро-час)					
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU	300000 10000	300000 10000	300000 10000	300000 10000	300000 10000
Облака (CPU ядер)					

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	**Страна**	**Город**	**Участники**	**Тип соглашения**
ННЛА	Армения	Ереван	Ананикян Н. Пилоян А.	совместные работы
ИФ	Азербайджан	Баку	Мирзаев М.Н.	совместные работы
ИМ НАНБ	Беларусь	Минск	Егоров А.Д., Малютин В.Б.	соглашение
SU	Болгария	София	Младенов Д. Христов И.Г. Христова Р.Д.	совместные работы
HCMUE	Вьетнам	Хошимин	Лыонг Л.Х.	совместные работы
GTU	Грузия	Тбилиси	Гиоргадзе Г.	совместные работы
TSU	Грузия	Тбилиси	Гиоргадзе Г. Элашвили А.	совместные работы
UG	Грузия	Тбилиси	Гогилидзе С.	совместные работы
CU	Египет	Гиза	Абдул-Магеад И.	совместные работы
CIAE	Китай	Пекин	Линь Ч.Ц. Вэнь П.В.	совместные работы
IMNU	Китай	Хух-Хото	Сахия Б.	совместные работы

IMDT MAS	Монголия	Улан-Батор	Батгэрэл Б.	совместные работы
MUST	Монголия	Улан-Батор	Улзийбаяр В.	совместные работы
Коллаборация BM@N	Россия	Дубна	Капишин М.Н.	совместные работы
Коллаборация MPD	Россия	Дубна	Рябов В.Г.	совместные работы
МГУ	Россия	Москва	Кузаков К.А.	совместные работы
РУДН	Россия	Москва	Севастьянов Л.А. Бронников К.А. Рыбаков Ю.П.	совместные работы
ИМПБ РАН	Россия	Пущино	Лахно В.Д.	совместные работы
СГУ	Россия	Саратов	Дербов В.Л.	совместные работы
ХГУ	Таджикистан	Худжанд	Хамдамов Ш.Д.	совместные работы
LTPC	Франция	Мец	Джулакян Б.Б.	совместные работы
UCT	ЮАР	Кейптаун	Алексеева Н. Дика А.	совместные работы, грант программы JINR-NRF

2.6. Организации-соисполнители *(те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)*

3. Кадровое обеспечение

3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

(общее количество участников)

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал Сумма FTE	Ассоциированный персонал Сумма FTE
1.	научные работники	44.8	
2.	инженеры	5.4	
3.	руководители	0.8	
Итого:		**51.0**	

3.2. Доступные кадровые ресурсы

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ (общее количество участников)

№№ п/п	Категория работников	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	ЛИТ	Зам. дир. лаб. – 2 Нач. отдела – 1 Зам. нач. отд. – 1 Нач. сект. – 5 гнс – 3 внс – 8 снс – 20 нс – 4 мнс – 4 стаж.-исслед. – 2 стипендиат – 1	40.8 (51 чел.)

2.	инженеры	ЛИТ	Вед. прогр. – 1 Инж.-прогр. – 4 Лаборант – 3	5.4 (8 чел.)
5.		ЛИТ	пом.дир.лаб. – 1	0.8 (1 чел.)
Итого:				**47.0**

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ (общее количество участников)

№№ п/п	**Категория работников**	**Организация-партнер**	**Сумма FTE**
1.	научные работники		
2.	инженеры		
3.	специалисты		
4.	рабочие		
Итого:			

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП) – **950** тыс. долл.

Детализация приводится в отдельной форме.

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков (общий объем).

Руководители проекта _____/_____/

_____/_____/

Дата представления проекта в ДНОД _____
Дата решения НТС Лаборатории _____, номер документа _____

Год начала проекта
(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту — **2024**

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления Проекта

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования			Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам				
				1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
		Международное сотрудничество (МНТС)	450	90	90	90	90	90
		Материалы						
		Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	180	36	36	36	36	36
		Пуско-наладочные работы						
		Услуги научно-исследовательских организаций						
		Приобретение программного обеспечения	320	64	64	64	64	64
		Проектирование/строительство						
		Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)*						
Необходимые ресурсы	**Нормо-час**	Ресурсы						
		– сумма FTE,						
		– ускорителя/установки,						
		– реактора,…..						
Источники финансирования	**Бюджетные средства**	Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)*						
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

Руководители проекта _____/_____/

_____/_____/

Экономист Лаборатории _____/_____/

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА

Методы вычислительной физики для исследования сложных систем

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА

ШИФР ПРОЕКТА 06-6-1119-2-2024/2026

ШИФР ТЕМЫ 05-6-1119-2014/…

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА Земляная Е.В., Чулуунбаатар О.

СОГЛАСОВАНО:

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ИНСТИТУТА	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
РУКОВОДИТЕЛИ ТЕМЫ	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА

- в рамке подписывается после ПКК

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

_____ ПОДПИСЬ _____ ФИО _____ ДАТА