

Федеральное агентство научных организаций  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УТВЕРЖДАЮ  
директор член-корр. РАН

Л.В.Кравчук  
22 января 2018

УДК 539.1, 539.12, 539.14, 539.17, 539.125

№ государственной регистрации АААА-А16-116022510111-7

Инв.№

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Физика конденсированных сред, материаловедение, в том числе радиационное  
материаловедение, нейтронная физика, физика и техника источников нейтронов  
(промежуточный за 2017 год)

Научный руководитель темы  
заместитель директора по научной работе д.ф.-м.н.

Фещенко А.В.  
22 января 2018

Москва 2018

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы

д.ф.-м.н. Фещенко А.В. (введение, заключение)  
22 января 2018

Исполнитель:

д.ф.-м.н. Коптелов Э.А.  
22 января 2018

## РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 49 с., 19 рис.

Ключевые слова: НАНОСТРУКТУРА, НЕЙТРОННЫЕ СЕЧЕНИЯ, ЗАМЕДЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТРАНСМУТАЦИЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ, ВРЕМЯПРОЛЁТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР, НЕЙТРОННЫЙ ДИФФРАКТОМЕТР, БЫСТРЫЕ НЕЙТРОНЫ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2017 год.

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Продолжено развитие Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, приборного парка и средств математического моделирования для исследований по физике деления, нейтрон-ядерных взаимодействий и конденсированных сред

Проведено расчетно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней spallation-типа. Математическое моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и улучшения параметров установок, планирования новых экспериментов и приложений.

Математическое моделирование процесса взаимодействия адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями

Проведены важные исследования по физике деления и нейтрон – ядерных взаимодействий, по использованию методов рассеяния нейтронов, рентгеновского и гамма излучения для исследования структуры и динамики конденсированных сред. Исследована структура ряда перспективных материалов.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Реферат	3
Введение	5
Нейтронная физика, технология интенсивных источников нейтронов, исследование конденсированных сред, радиационное материаловедение	6
1 Развитие Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, приборного парка и средств математического моделирования для исследований по физике деления, нейтрон-ядерных взаимодействий и конденсированных сред	6
1.1 Импульсный нейтронный источник ИН-06 ИЯИ РАН. Расчетно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней spallation-типа. Математическое моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и улучшения параметров установок, планирования новых экспериментов и приложений.	8
1.1.1 Публикации	9
1.2. Математическое моделирование процесса взаимодействия адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями	10
1.2.1 Публикации	12
1.3 Исследования по физике деления и нейтрон – ядерных взаимодействий	14
1.3.1 Публикации	15
2. Использование методов рассеяния нейтронов, рентгеновского и гамма излучения для исследования структуры и динамики конденсированных сред	16
2.1. Исследования структур перспективных материалов	17
2.1.1 Публикации	22
2.2 Радиационное материаловедение	23
3 Развитие экспериментальной техники для исследования материалов тепловыми и эпитепловыми нейтронами	24
Заключение	44
Публикации	45

## ВВЕДЕНИЕ

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

получение прецизионных данных по рассеянию и реакциям с участием протонов, нейтронов, гамма-квантов, лёгких и делящихся ядер, спектрам нейтронов деления и других данных, необходимых для ядерной энергетики и других приложений;

развитие на этой основе троичного ядерно-физического комплекса: создание мощных источников синхротронного, нейтронного и иных ядерных излучений;

разработка новых прецизионных методов детектирования элементарных частиц;

исследования и разработки устройств детектирования излучений и высокотемпературных, радиационно-стойких систем для ядерно-физических комплексов и перспективных технологий;

использование методов рассеяния нейтронов и синхротронного излучения для исследования структуры и динамики конденсированных сред;

НЕЙТРОННАЯ ФИЗИКА, ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ,  
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД, РАДИАЦИОННОЕ  
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Эдуард Алексеевич Коптелов

Головной исполнитель: Лаборатория нейтронных исследований

Соисполнители: Отдел ускорительного комплекса, Отдел экспериментальной физики,  
Лаборатория фотоядерных реакций, Лаборатория атомного ядра.

Исполнители:

Алексеев Андрей Алексеевич	н.с.
Аксенов Сергей Николаевич	м.н.с.
Гаврилюк Александр Григорьевич	с.н.с., к.ф.-м.н.
Латышева Людмила Николаевна	н.с.
Лебедь Юлия Борисовна	н.с., к.б.н.
Литвин Василий Сергеевич	м.н.с. к.ф.-м.н.
Клементьев Евгений Станиславович	с.н.с., к.ф.-м.н.
Кузнецов Валерий Леонидович	с.н.с., к.ф.-м.н.
Кузнецова Евгения Васильевна	с.н.с., к.ф.-м.н.
Садыков Равиль Асхатович	зав.сект., к.ф.-м.н.
Сидоркин Станислав Федорович	зав.сект., к.ф.м.н.
Семенов Алексей Алексеевич	с.н.с., к.ф.-м.н.
Соболевский Николай Михайлович	зав.сект, д.ф.-м.н.
Трунов Дмитрий Николаевич	м.н.с.

1. РАЗВИТИЕ НЕЙТРОННОГО КОМПЛЕКСА ИЯИ РАН, ПРИБОРНОГО ПАРКА И  
СРЕДСТВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО  
ФИЗИКЕ ДЕЛЕНИЯ, НЕЙТРОН-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И  
КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Научные руководители проектов: Эдуард Алексеевич Коптелов, Равиль Асхатович Садыков, Станислав Фёдорович Сидоркин; Ответственные исполнители: Василий Сергеевич Литвин, Станислав Фёдорович Сидоркин, Андрей Алексеевич Алексеев, Николай Михайлович Соболевский, Людмила Николаевна Латышева, Александр Степанович Ботвина.

## 1.1 ИМПУЛЬСНЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК ИН-06 ИЯИ РАН. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИЙ НЕЙТРОННЫХ МИШЕНЕЙ SPALLATION-ТИПА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ИНИЦИИРОВАННЫХ ПУЧКОМ ПРОТОНОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ В УСТАНОВКАХ НЕЙТРОННОГО КОМПЛЕКСА ИЯИ, С ЦЕЛЬЮ УТОЧНЕНИЯ И УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВОК, ПЛАНИРОВАНИЯ НОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ПРИЛОЖЕНИЙ.

Ведутся расчетно-аналитические работы по поиску оптимальной конфигурации комбинированной мишени с высоким выходом нейтронов на основе нептуния  $^{237}\text{Np}$  и плутония  $^{239}\text{Pu}$  с целью компенсации увеличения объема мишени на основе только нептуния  $^{237}\text{Np}$ . Рассматриваются основные физико-технические особенности этих мишеней (работа в стадии подготовки первых публикаций).

Продолжаются расчетно-аналитические работы и консультации с потенциальными зарубежными инвесторами по созданию ADS стенда.

С целью повышения плотности потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителей проведены подготовительные работы с подрядчиком по изготовлению недостающих комплектующих для нового мишенного модуля с бериллиевыми отражателями. Изготовлены бериллиевые пластины для мишени данного модуля.

Совместно с ОУК, ОЭК и специалистами из ИТЭФ проведен анализ по возможности размещения установки протонной радиографии, обсуждены различные варианты. По предложению ЛНИ, в качестве предпочтительного выбран вариант на одном из нейтроннопроводов установки «РАДЭКС».

Подготовлены и отправлены запросы по дополнительному программному обеспечению работ по накоплению радиоактивных элементов.

Продолжается расчетное моделирование поведения расплавов жидких солей на основе  $\text{LiF-NaF-KF}$  в экспериментальных каналах такого стенда (трансмутация в жидких солях), которые могли бы быть установлены вместо  $\text{PbBi}$  вставок в рассматриваемой конфигурации мишени.

### 1.1.1 ПУБЛИКАЦИИ

1. Аксенов В.Л., Балагуров А.М., Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д., Высокопоточный источник нейтронов на основе каскадного бустера, Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2017 г., вып.2, стр. 4.

2. V.L .Aksenov, V.D. Ananiev, G.G. Komyshev, A.D. Rogov, E.P. Shabalin, **On the limit of neutron fluxes in the fission-based pulsed neutron sources**, Physics of Particles and Nuclei Letters, Volume 14, Issue 5, pages 788-797, 2017.

3. Результаты работ доложены на расширенном научном семинаре «Жидко-солевые реакторы: перспективы применения, научные и технологические вопросы создания», 07 декабря 2017 ВНИИНМ им. ак. Бочвара С.Ф.Сидоркиным «Использование ускорительно-мишенного комплекса ИЯИ РАН для экспериментов с топливными композициями ЖСР»

Материалы также изложены в других конференционных материалах.

## 1.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АДРОНОВ И ЯДЕР СО СЛОЖНЫМИ МАКРОСКОПИЧЕСКИМИ МИШЕНЯМИ

Научный руководитель – г.н.с. проф. Н.М.Соболевский,

Исполнители: н.с. Л.Н.Латышева, с.н.с. А.С. Ботвина

Проведено теоретическое описание и компьютерное моделирование адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий в широком диапазоне энергий с целью предсказания свойств ядерной материи в экстремальных условиях, интерпретации и анализа экспериментальных данных (с.н.с. А.С. Ботвина).

Дальнейшее развитие статистических и динамических моделей, описывающих образование частиц и дезинтеграцию возбужденных ядер по каналам внутриядерного каскада, коалесценции, испарения, деления, Ферми-развала и мультифрагментации выполнено в работах [1,2,4]. Особое внимание уделено новому направлению исследований - включению странных частиц и гиперонов в эти процессы.

В работах [3,5,7,8,9] исследуются образование и свойства (гипер-)ядерной материи в экстремальных условиях.

Аналізу и интерпретации новых экспериментальных данных по образованию частиц, барионов и фрагментов в ядерных реакциях при высоких энергиях, и предложению новых экспериментов, посвящены работы [2,4,5,6,9].

В ИЯИ РАН создан и развивается оригинальный отечественный транспортный код SHIELD (<http://www.inr.ru/shield/>). Он включает известные российские модели ядерных реакций, разработанные в ОИЯИ (Дубна) и ИЯИ РАН, которые постоянно совершенствуются. Транспортный код SHIELD предназначен для решения того же круга задач, что упомянутые выше коды, и имеет свои особенности и преимущества. Код SHIELD в течение долгого времени с успехом применяется в контексте различных актуальных приложений и в фундаментальных исследованиях. Продолжалась разработка и совершенствование программного обеспечения для моделирования взаимодействия частиц и ядер различного спектрального состава со сложными макроскопическими мишенями.

За отчетный период выполнен ряд работ по актуальной для Института тематике. Выполненное ранее, совместно с ЛАЯ и ЛФЯР, расчётно-теоретическое исследование источника нейтронов на пучке линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8 позволило получить в отчетном 2017 году Патент RU 2 634 330 С1 «ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК» [10].

Использование кода SHIELD при изучении фотоядерных реакций вблизи порога с помощью мощных фемтосекундных лазеров отражено в совместной с ЛФЯР ИЯИ и МГУ статье [11].

Медицинская версия кода SHIELD-HIT (Heavy Ion Therapy) широко применяется в исследованиях по адронной терапии. С 2002 по 2017 год опубликовано 24 статьи в реферируемых журналах. В отчетном 2017 году подписан Договор о совместном владении (Agreement of Co-Ownership) на версию SHIELD-HIT12A между ИЯИ РАН и Университетом г. Орхус (Дания). Программа SHIELD-HIT12A защищена Свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015662445, [http://www.inr.ru/shield/cert\\_shield-hit12.pdf](http://www.inr.ru/shield/cert_shield-hit12.pdf). Проект SHIELD-HIT12A имеет свой интернет-сайт <http://www.shieldhit.org>. В 2017 году выданы три некоммерческие лицензии на использование кода.

Последние годы активно обсуждается проект международной космической станции на окололунной орбите. В 2017 году в Москве проходило очередное рабочее совещание с участием представителей РосКосмоса, НАСА, ЕКА и ряда российских институтов. Транспортный код SHIELD используется для прогнозирования радиационной обстановки на борту станции в интересах данного проекта [12,13,14].

### 1.2.1 ПУБЛИКАЦИИ

1. N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, R.Ogul. Influence of the hyper-terms in mass formulae on yield of hypernuclei in nuclear reactions. Proc. of the 32th International Conference of Turkish Physical Society, Bodrum, 5-10 Sept, 2016. AIP Conf. Proc. v. 1815, 060003 (2017). doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4976399>
2. A.S.Botvina, K.K.Gudima, J.Steinheimer, M.Bleicher, J.Pochodzalla. Formation of hypernuclei in heavy-ion collisions around the threshold energies. Phys. Rev. C, v. 95, p. 014902 (10 pages), 2017. DOI: 10.1103/PhysRevC.95.014902
3. A.Botvina, M.Bleicher, J.Pochodzalla, J.Steinheimer. Formation of hypernuclear in relativistic ion collisions. Proc. of the 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015). Journal of the Physical Society of Japan: JPS Conf. Proc., v.17, 092002 (2017). <https://doi.org/10.7566/JPSCP.17.092002>
4. A.S.Botvina, J.Steinheimer, and M.Bleicher. Formation of exotic baryon clusters in ultra-relativistic heavy-ion collisions. Phys. Rev. C, v.96, p.014913 (6 pages), 2017. DOI: 10.1103/PhysRevC.96.014913
5. S.P.Avdeyev, A.S.Botvina, W.Karcz, V.V.Kirakosyan, V.P. Ladygin. Study of the source velocity with the light relativistic ions at CBM. CBM Progress Report 2016, page 187. GSI, Darmstadt, Germany (2017).[http://repository.gsi.de/record/201318/files/cbm\\_pr2016.pdf?version=1](http://repository.gsi.de/record/201318/files/cbm_pr2016.pdf?version=1)
6. A.S.Botvina. Statistical production and binding energy of hypernuclei. Preprint INR RAS 1435/2017 (16 pages), Moscow, 2017.
7. A.S.Botvina. Mechanisms of hypernuclei formation in relativistic ion collisions. A talk at DPG-Fruehjahrstagung 2017 conference, 27-31 March 2017, Muenster, Germany.<http://www.dpg-verhandlungen.de/year/2017/conference/muenster/part/hk/session/47>
8. A.Botvina. Processes of hypernuclei formation in relativistic ion collisions. Talk at 17th International conference "Strangeness in Quark Matter" - SQM2017, Utrecht, Netherlands. July 10-15, 2017. <https://indico.cern.ch/event/576735/sessions/241443/#20170713>
9. A.Botvina. Production of hyper-nuclei and exotica using UrDMD and a coalescence model. Invited Talk at 2-nd International EMMI workshop "Anti-matter, hyper-matter and exotica production at the LHC". Turin, Italy, November 6-10, 2017. <https://indico.gsi.de/event/6301/timetable/#all.detailed>
10. А.В.Андреев, Ю.М.Бурмистров, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, Л.Н.Латышева, М.В.Мордовской, В.Н.Пономарёв, Г.В.Солодухов, Н.М.Соболевский. ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК. Патент RU 2 634 330 С1, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, дата регистрации 26.10.2017.

11. И.Н.Цымбалов, Р.В.Волков, Н.В.Еремин, К.А.Иванов, В.Г.Недорезов, А.Н.Мушкаренко, А.Пасхалов, А.Л.Полонский, А.Б.Савельев, Н.М.Соболевский, А.А.Туринге, С.А.Шуляпов. Исследование реакции  $D(\gamma,n)H$  вблизи порога с использованием мощного фемтосекундного лазерного излучения. Ядерная Физика 80 (2017) 189–194. Английская версия: I.N.Tsybalov, R.V.Volkov, N.V.Eremin, K.A.Ivanov, V.G.Nedorezov, A.A.Paskhalov, A.L.Polonskij, A.B.Savel'ev, N.M.Sobolevskij, A.A.Turinge, S.A.Shulyapov. Investigation of the reaction  $D(\gamma,n)H$  near the threshold by means of powerful femtosecond laser radiation. Physics of Atomic Nuclei 80 (2017) 397–401.

12. N. Sobolevsky. Absorbed dose rate in water phantom inside Al-screen under irradiation by GCR protons and nuclei using the SHIELD transport code. Radiation Environment and Risk Analysis At and Near the Lunar Surface: Cis-lunar Vehicle Requirements. Technical Interchange Meeting (TIM) #4, 13–14 June, 2017, Moscow.

13. J.Norbury, N.Sobolevsky, C.Werneth, T.Slaba, B.Reddell,. Space Radiation Transport Calculations. Progress since TIM #3. Radiation Environment and Risk Analysis At and Near the Lunar Surface: Cis-lunar Vehicle Requirements. Technical Interchange Meeting (TIM) #4, 13–14 June, 2017, Moscow.

14. John W. Norbury, Nikolai Sobolevsky, Charles M. Werneth. SHIELD and HZETRN Comparisons of Pion Production Cross Sections. Accepted in Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B.

### 1.3 ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ ДЕЛЕНИЯ И НЕЙТРОН – ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

1. С использованием компьютерного моделирования определена функция отклика спектрометра СВЗ в энергетическом диапазоне от 1эВ до 1000 эВ.

2. Построена компьютерная модель нейтронного спектрометра, с возможностью изменения параметров функции отклика, с помощью которой выполнено моделирование аппаратурных спектров радиационного захвата нейтронов. Проведено сравнение спектров полученных на спектрометре СВЗ и спектров взятых из баз оценённых данных.

3. Проведено исследование устойчивости решения некорректной задачи по определению истинных спектров нейтронных реакций. Выявлена недостаточность имеющихся данных для получения решений, удовлетворяющих критериям достоверности. (рук. группы ЛНИ н.с. А.А.Алексеев).

4. Дополнительно исследовались процессы при высоких энергиях, в том числе выполнено теоретическое описание и компьютерное моделирование адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий в широком диапазоне энергий с целью предсказания свойств ядерной материи в экстремальных условиях, интерпретации и анализа экспериментальных данных (с.н.с. А.С. Ботвина).

### 1.3.1 ПУБЛИКАЦИИ

1. J.Steinheimer, A.Botvina and M.Bleicher. Sub-threshold charm production in nuclear collisions. *Phys. Rev. C*, v. 95, p. 014911 (6 pages) , 2017. DOI: 10.1103/PhysRevC.95.014911

2. R.Ogul, N.Buyukcizmeci, A.Ergun, A.S.Botvina. Production of neutron-rich exotic nuclei in projectile fragmentation at Fermi energies. *Nucl. Sci. Tech.* v. 28, p.18, 2017. doi:10.1007/s41365-016-0175-6

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ, РЕНТГЕНОВСКОГО И  
ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ  
КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Руководители работ: и.о. зав. СКС в.н.с. Р.А. Садыков, с.н.с. А.Г. Гаврилюк

Исполнители: В.С. Литвин, С.Н. Аксенов, Ю.Б. Лебедь, Д.Н. Трунов, В.Н.Марин

## 2.1. ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУР ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

(1) В NiO было обнаружено, что температурные зависимости сопротивления при всех фиксированных давлениях ниже перехода изолятор-металл ( $P < 240$  ГПа) существенно отклоняются от активационного закона Аррениуса, они также не подчиняются и закону Мотта для прыжковой проводимости. Нужно учитывать зависимость энергии активации  $E_a$  не только от давления, но и от температуры. При этом оказалось, что энергия активации  $E_a(T)$  стремится к нулю при  $T \rightarrow 0$  для всех давлений ниже перехода изолятор-металл. Окончательное практическое обнуление  $E_a(T)$  вблизи перехода происходит при  $T \sim 77$  К.

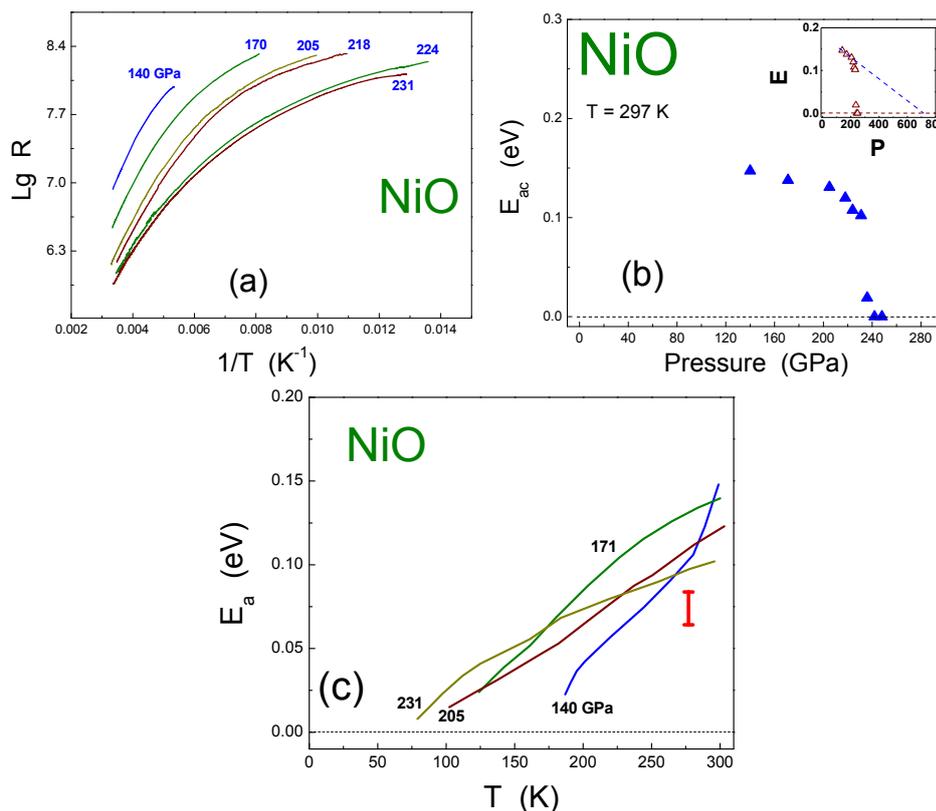


Рисунок 1. Эволюция (а) температурной зависимости электросопротивления  $R$  в кристалле NiO с ростом давления. Барическая зависимость (б) величины энергии активации  $E_a$  в кристалле NiO, рассчитанной вблизи комнатной температуры. Зависимости (с) величины энергии активации  $E_a$  в кристалле NiO от температуры для некоторых величин давлений в диапазоне  $140 < P < 231$  ГПа, рассчитанные из экспериментальных температурных кривых сопротивления в приближении закона Аррениуса и переменной величины энергии активации. Барамы указана статистическая погрешность при определении величины  $E_a$ .

Методом синхротронной мёссбауэровской спектроскопии в камерах высокого давления с алмазными наковальнями в диапазоне температур 4.2 – 295 К изучены магнитные свойства нового мультиферроика из семейства лангаситов -  $Ba_3TaFe_3Si_2O_{14}$ . При давлениях около 20 ГПа для  $Ba_3TaFe_3Si_2O_{14}$  экспериментально установлено сильное возрастание

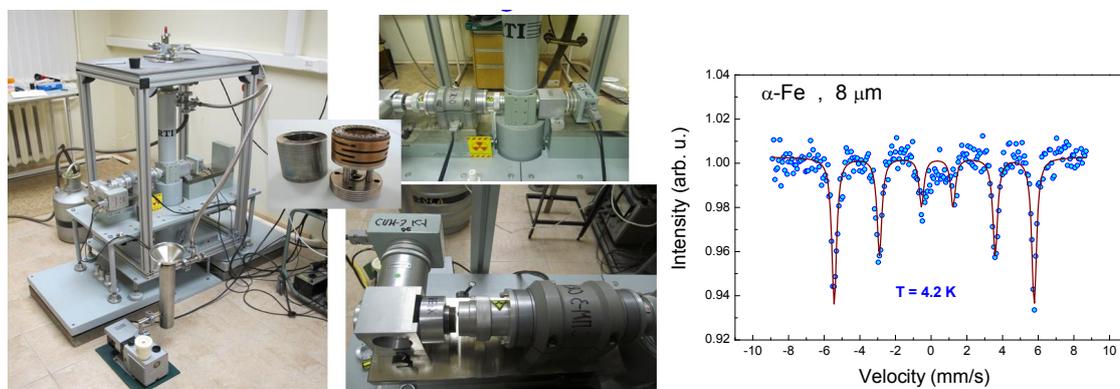
величины температуры Нееля, связанное со структурным фазовым переходом. При этом достигнута максимальная величина температуры Нееля - 130К, что почти в 5 раз превосходит соответствующую величину при атмосферном давлении (около 27 К). Значительное увеличение температуры Нееля предположительно может происходить вследствие перераспределения ионов  $Fe^{3+}$  между 3f и 2d тетраэдрическими позициями в структуре лангасита. В этом случае происходит уменьшение межатомные расстояния Fe-O и изменения углов связей Fe-O-Fe, что создаёт благоприятные условия для сильных сверхобменных взаимодействий между ионами железа и приводит к значительному магнитному упорядочению в ab-слоях кристаллической структуры. Было установлено, что происходит расслоение образца на две магнитных фазы с различными значениями температуры Нееля 50 и 130 К, что может объясняться разницей между сильным двухмерным магнитным упорядочением в плоскости ab и 3-хмерным упорядочением межплоскостных взаимодействий [1].

Выполнено синхротронное рентгенодифракционное исследование структурных характеристик  $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$  лангасита при гидростатических давлениях до 60 ГПа в камерах с алмазными наковальнями. При давлениях 10 и 54 ГПа от образца  $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$  были сняты и проанализированы Мессбауэровские спектры и спектры оптического поглощения соответственно. В результате комплексного исследования методами рентгеновской дифракции, Мессбауэровской спектроскопии и спектроскопии оптического поглощения для  $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$  было установлено три фазовых перехода при давлениях  $\sim 3$ ,  $\sim 20$ , и  $\sim 41$  ГПа. Первый фазовый переход связан с небольшими смещениями наиболее лёгких атомов кислорода, что приводит к увеличению локальной симметрии кислородного окружения вокруг атомов железа, при этом происходит уменьшение объема элементарной ячейки на 1.5%. Второй фазовый переход при  $\sim 20$  GPa приводит к существенному изменению a и c - параметров элементарной ячейки и скачкообразному уменьшению объема на 7%. Значительное уменьшение параметра c при этом структурном переходе приводит к сильному возрастанию величины параметра спинового обмена между ионами  $Fe^{3+}$  из соседних слоёв параллельных ab, что в свою очередь приводит к увеличению температуры Нееля, наблюдаемому для этого кристалла при 20 ГПа. При 38-44 ГПа по рентгеноструктурным данным наблюдаются слабая аномалия изменения объема от давления, однако по результатам спектроскопических исследований наблюдаются существенные изменения величины оптической щели и параметра квадрупольного расщепления [2].

В металлическом дихалькогениде TaSe<sub>2</sub> проведено тщательное исследование взаимодействия и конкуренции состояния волны зарядовой плотности (CDW - charge density wave) с состоянием сверхпроводимости. Было показано, что межслоевые взаимодействия играют критическую роль в подавлении CDW состояния и усилении сверхпроводимости сжатом состоянии TaSe<sub>2</sub> выше 20 ГПа [3].

Структуру олова Sn и Sn-H<sub>2</sub> системы исследовали методом рентгеновской дифракции под действием высокого давления (станция P02 синхротрона PETRA-III в DESY). Наш эксперимент до 230 ГПа вместе с результатами полученными ранее, указывают на начало фазового перехода от Sn-ОЦК к структуре Sn-ГПУ вблизи 160 ГПа. Обе фазы сосуществуют в диапазоне давлений 160-230 ГПа при комнатной температуре. Таким образом, переход имеет очень медленную кинетику и чрезвычайно большую область сосуществования ОЦК и ГПУ фаз [4, 5].

Была создана крио-рефрижераторная установка для проведения мёссбауэровских экспериментов, в том числе и при высоких давлениях. На рисунке 2 приведена фотография данной установки.



(b)

Рисунок 2. Мёссбауэровский спектрометр, в том числе с крио-рефрижераторной установкой для измерения мёссбауэровских спектров при низких температурах и при высоких давлениях.

На рисунке 2(b) приведен спектр от калибровочной фольги Fe-57 толщиной 8 мкм измеренный на крио-рефрижераторной установке при атмосферном давлении и при температуре 4.2 К. Ширина линии превышает естественную ширину в 2-а раза. Ведутся

Была создана установка для проведения рентгеновских экспериментов при высоких давлениях на базе лабораторной установки STOE IPDS II. На рисунке 3 приведена фотография данной установки. На вставке рисунка 3 также приведены камера высокого давления вместе с адаптером, который используется для расположения камеры в рентгеновском пучке. Н другой вставке рисунка 3, в качестве примера, приведена рентгеновская дифрактограмма от образца лангасита, измеренная на данной установке при комнатной температуре и при высоком давлении.

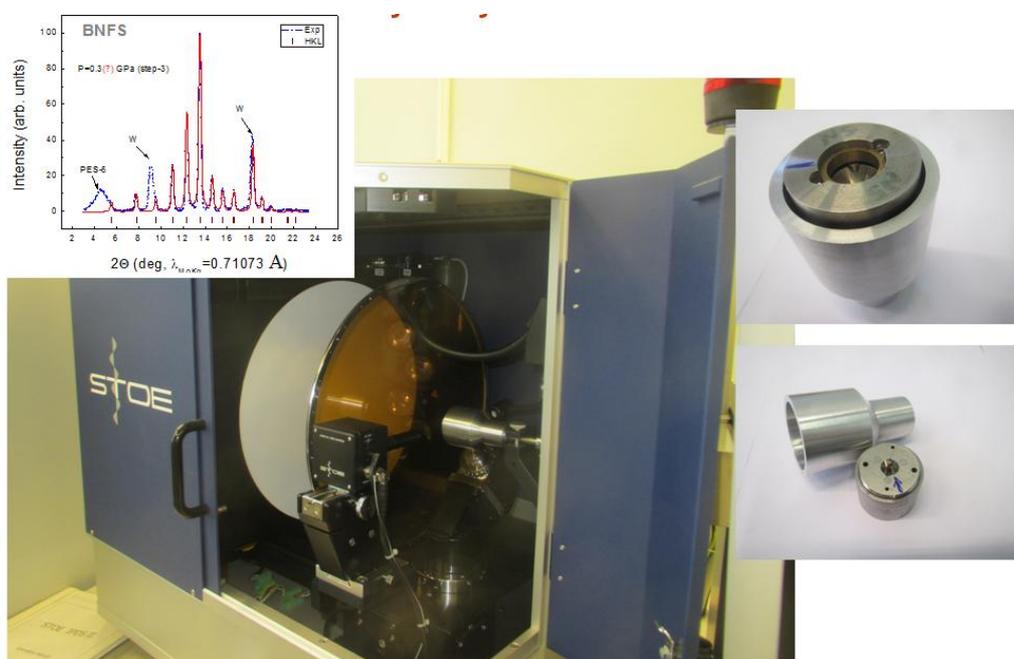


Рисунок 3. Установка для проведения рентгеновских экспериментов при высоких давлениях на базе лабораторной установки STOE IPDS II.

Была создана камера высокого давления с алмазными наковальнями для проведения экспериментов в мегабарном диапазоне давлений. Были проведены эксперименты с использованием данной камеры по изучению уравнения состояния олова до давлений порядка 2.3 Мбары [5] и уравнения состояния теллурида олова SnTe до давления порядка 2 Мбары [6]. Фотография камеры и формы рабочих поверхностей алмазных наковален приведена на рисунке 4.

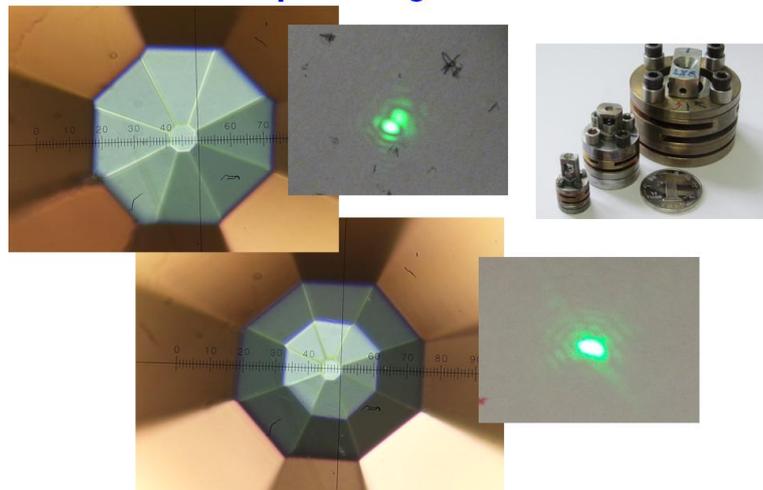


Рисунок 4. Фотография камер высокого давления для экспериментов при высоких давлениях, в том числе и в мегабарном диапазоне.

### 2.1.1 ПУБЛИКАЦИИ

1. I. S. Lyubutin, S. S. Starchikov, A. G. Gavriiliuk, I. A. Troyan, Yu. A. Nikiforova, A. G. Ivanova, A.I. Chumakov, R. Ruffer, "Magnetic phase separation and strong enhancement of the Neel temperature at high pressures in a new multiferroic  $Ba_3TaFe_3Si_2O_{14}$ ", *JETP Letters* 105(1), (2017).

2. Yu. A. Nikiforova, A. G. Gavriiliuk, I. S. Lyubutin, A. G. Ivanova, I. A. Troyan, S. S. Starchikov, S. N. Aksenov, V. V. Struzhkin, S. N. Sul'yanov and K. V. Glazyrin, "Structural transitions in iron-based  $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$  langasite at high pressures", *EPL* 116, 66003 (published online 16 February 2017).

3. Jianjun Ying, Xiao-jia Chen, Naizhou Wang, Xianhui Chen, Alexander Gavriiliuk, Ivan I. Naumov, Russell J. Hemley, Igor I. Mazin and Viktor V. Struzhkin, "Fermi surface reconstruction in  $2H-TaSe_2$  under high pressure mediated by interlayer interaction", *submitted to Nature Communications* (2017).

4. A. G. Gavriiliuk, I. A. Trojan, A. G. Ivanova, S. N. Aksenov, Yu. Nikiforova, "Structural properties and phase compositions of tin hydrides  $SnH_x$  at high pressures 150-250 GPa", *PETRA-III experiment DESY Report* (2017).

5. A. G. Gavriiliuk, I. A. Troyan, A. G. Ivanova, S. N. Aksenov, S. S. Starchikov, I. S. Lyubutin, W. Morgenroth, K. V. Glazyrin, M. Mezouar, "Structural transitions in elemental tin at ultra-high pressures up to 230 GPa", *JETP Letters* 106(11), 702 (2017).

6. А. Г. Иванова, И. А. Троян, Д. А. Чареев, А. Г. Гаврилюк, К. В. Фролов, С. С. Старчиков, А. О. Баскаков, М. Мезуар, И. С. Любутин, "Структурные фазовые переходы и уравнение состояния  $SnTe$  при высоких давлениях до двух мегабар", *Письма в ЖЭТФ*, т. 106, вып. 10, стр. 637-641 (2017).

## 2.2 РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научный руководитель: с.н.с. ЛНИ А.А. Семенов

Проведено моделирование диффузии гелия в вольфраме в широком спектре температур. Показано, что термическая диффузия следует закону Аррениуса только при достаточно низких температурах ( $< 500$  К).

По результатам работы была подготовлена статья:

Naohua Wen, A. A Semenov and C. H. Woo “Many-body effects in the mobility and diffusivity of interstitial solute in a crystalline solid: The case of helium in BCC tungsten”,

которая была опубликована в Journal of Nuclear Materials. – J. Nucl. Mater., 2017, vol. 493, pp. 21-29

Подготовлена статья по исследованию методами рентгеновской дифракции и малоуглового рассеяния наноструктуры облученного полимера РЕЕК.

Подготовлена статья по исследованию методами рентгеновской дифракции текстуры растянутого каучука с использованием двухкоординатного детектора. (Р.А. Садыков, СКС)

### 3 РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОВЫМИ И ЭПИТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Пуск мониторингового 2х-координатного газового детектора на установке Горизонт.

Исполнители: Р.А. Садыков, Аксёнов С.Н., Трунов Д.Н., Марин В.Н. Литвин В.С.

Произведен запуск монитора нейтронного пучка установки «Горизонт». Разработана автономная система регистрации сигналов на основе микроконтроллера ATmega328 для данного монитора. Изготовлен прототип, испытание планируется в ближайшем сеансе на нейтронном источнике ИН-06.

Выполнены исследования временных характеристик импульсного источника нейтронов ИБР-2.

Исполнители: с.н.с. ЛНИ В.Л. Кузнецов, с.н.с. Е.В. Кузнецова

Результаты представлены в двух докладах на ISINN-25 (XXV International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei).

The characteristics of the neutron beam of 1-st channel of pulsed reactor IBR-2. Kuznetsov V. L., Kuznetsova E. V., Sedyshev P.V. и

Measurements of the coherent neutron amplitude of scattering in the diffraction. Kuznetsov V. L., Kuznetsova E. V., Sedyshev P.V., Dubna, May 26-30, 2017 «Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure and Related Topics»).

При обработке серий измерений наблюдались изменение положений вспышки и рефлексов относительно старта.

Вспышка быстрых нейтронов и  $\gamma$  – квантов прекрасно видна во времяпролетном спектре нейтронов дифракции. На рисунке 1 представлен фрагмент времяпролетного спектра со вспышкой быстрых нейтронов,  $\gamma$  – квантов и результаты его аппроксимации распределением Гаусса.

Первые 5 каналов по 500 мкс, остальные по 2 мкс.

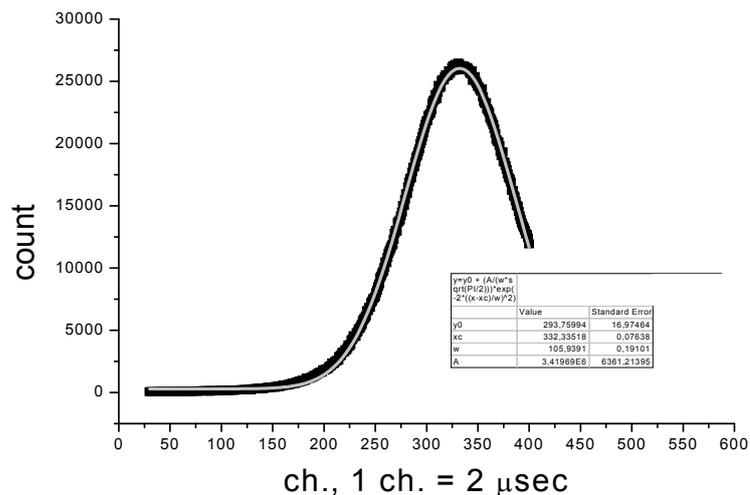


Рисунок 5. Параметры нейтронной вспышки, аппроксимированной в виде Гаусса. Временное положение центра тяжести вспышки относительно импульса старта 3124,7  $\mu\text{s}$ , а длительность 212  $\mu\text{s}$ . Черные маркеры – экспериментальный спектр, серая линия – Гаусс.

Аппроксимация фрагмента вспышки распределением Гаусса хорошо описывает положение её максимума и полуширину. При обработке результатов измерений было обнаружено изменение времени вспышки и рефлексов относительно старта. В течение специальных исследований, результаты которых представлены на рисунке 2, было установлено: время вспышки относительно старта меняется по закону

$$t_{\text{flash}} = t_0 + Dt \cdot \exp(-t_{\text{meas}}/t) \quad (1).$$

Здесь  $t_{\text{flash}}$  – время вспышки,  $t_0$  – асимптотическое значение времени вспышки,  $Dt$  – параметр,  $t_{\text{meas}}$  – время измерения от начала цикла,  $t$  – параметр спада.

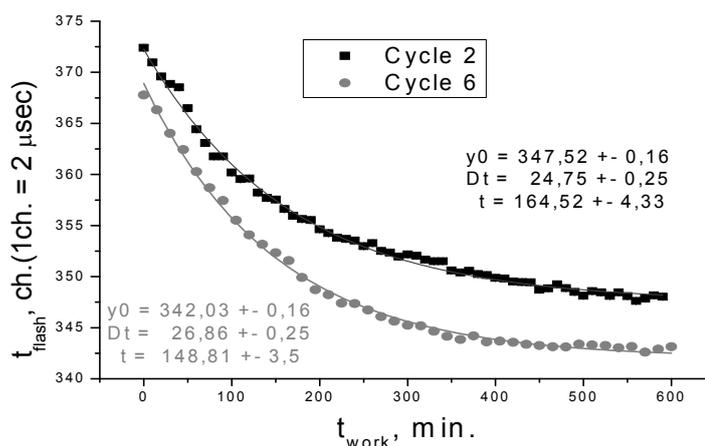


Рисунок 6. Зависимость времени вспышки от времени от начала работы реактора. Черные квадратики и линия соответствует циклу № 2, серые кружки и линия – циклу №6.

Итог исследования:

Было установлено изменение времени вспышки и рефлексов относительно старта, которое подчиняется зависимости

$$t_{\text{flash}} = t_0 + Dt \cdot \exp(-t_{\text{meas}}/t).$$

Исследованы зависимости времени вспышки от времени начала работы реактора для каждого конкретного цикла и конкретной серии эксперимента на 1-ом канале реактора ИБР-2.

Предложение по измерению времени жизни нейтрона времяпролетным методом.

Результаты представлены в докладе на ISINN-25(XXV International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei):

The method of measuring of the neutron lifetime on pulsed neutron sources. V.L. Kuznetsov, E.V. Kuznetsova, P.V. Sedyshev., Dubna, May 26-30, 2017 г.

Предлагаемый новый метод измерения времени жизни нейтрона основан на изменении спектра нейтронов за время их пролета достаточно большой пролетной базы, за счет их распада.

Спектр плотности потока нейтронов на поверхности замедлителя можно представить в виде  $N \cdot f(\lambda) \cdot d\lambda$ , где  $\int f(\lambda) \cdot d\lambda = 1$ . Если предположить, что нейтроны не распадаются, тогда спектр плотности потока нейтронов на расстояниях  $L1$  и  $L2$  с учетом того, что  $\lambda = a \cdot t/L$ , будет иметь вид:

$$NL1 \cdot f(t1/L1) dt1 = NL2 \cdot f(t2/L2) dt2 \quad (5).$$

Так как  $t1/L1 = t2/L2$ , то при соотношении

$$dt2 = (L2/L1) \cdot dt1 \quad (6)$$

спектры должны быть подобны. Экспериментальный спектр потока нейтронов, измеренный на расстоянии  $L$ , имеет вид

$FL(t)dt = (NL \cdot f(t/L) \cdot \varepsilon(t/L) \cdot \exp(-\sigma(t/L) \cdot \rho \cdot L) \cdot \exp(-t/\tau_n) + B(t))dt$  (7), здесь  $NL$  – число зарегистрированных нейтронов,  $\varepsilon(t/L)$  – эффективность регистрации нейтронов,  $\exp(-\sigma(t/L) \cdot \rho \cdot L)$  – потери нейтронов за счет их взаимодействия с остаточным газом,  $\rho$  – плотность атомов остаточного газа,  $\exp(-t/\tau_n)$  – потери нейтронов за счет их распада,  $t$  – время пролета нейтронной базы расстояния  $L$ ,  $\sigma(t/L)$  – полное сечение взаимодействия нейтронов с остаточным газом,  $B(t)$  – фон.

Можно найти время жизни нейтрона, пользуясь выражением (11), если выполнить измерения спектра плотности потока нейтронов на нескольких пролетных базах в одном и том же эксперименте, и если при этом пренебречь фоном и потерей нейтронов за счет их взаимодействия с ядрами остаточного газа. Тогда получаем выражение

$$FL(t)dt = (NL \cdot f(t/L) \cdot \varepsilon(t/L) \cdot \exp(-t/\tau_n)) dt \quad (8).$$

В этом случае отношение времяпролетных спектров, измеренных на пролетных базах  $L_1$  и  $L_2$  детекторами с одинаковой эффективностью регистрации нейтронов, имеет простой вид

$$R(t_1)dt_1 = NL_1/NL_2 \cdot \exp(-(t_1 - L_2/L_1 \cdot t_1)/\tau_n)dt_1 \quad (9).$$

Поскольку  $(t_1 - t_2)/\tau_n \ll 1$ , экспоненту в формуле (9) можно разложить в ряд. Тогда отношение спектров имеет вид

$$R(t_1)dt_1 = NL_1/NL_2 \cdot [1 + (L_2/L_1 - 1) \cdot t_1/\tau_n]dt_1 \quad (10).$$

Отношение спектров может быть аппроксимировано линейной функцией  $y = a + b \cdot x$ , где  $a = NL_1/NL_2$ ,  $b = NL_1/NL_2 \cdot (L_2/L_1 - 1) \cdot t_1/\tau_n$ .

Время жизни нейтрона, которое определяется наклоном прямой  $b$ , будет равно

$$\tau_n = NL_1/NL_2 \cdot (L_2/L_1 - 1) \cdot t_1/b = a \cdot (L_2/L_1 - 1) \cdot t_1/b \quad (11).$$

Исследование измерения времени жизни нейтрона времяпролетным методом было проведено с помощью математического моделирования.

Для того чтобы смоделировать спектр плотности потока нейтронов, был измерен времяпролетный спектр с использованием ионизационной камеры деления со слоем  $^{235}\text{U}$ , установленной на 11-ти метровой пролетной базе 1-го канала реактора ИБР-2.

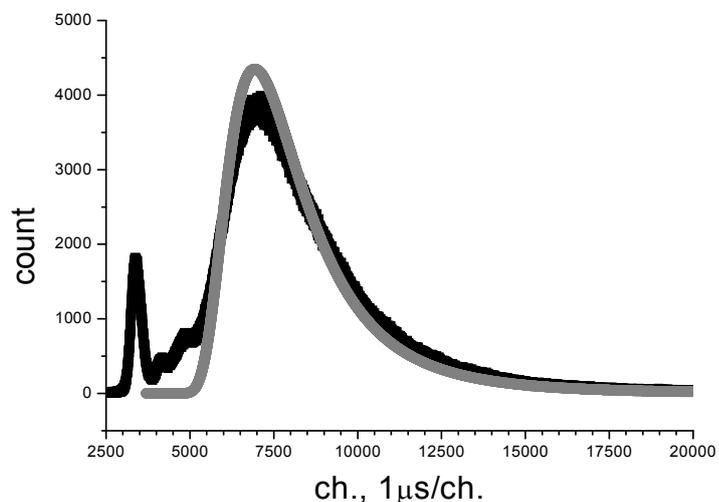


Рисунок 7. Экспериментальный времяпролетный спектр актов деления, измеренный с помощью ионизационной камеры деления со слоем  $^{235}\text{U}$ , установленной на 11-ти метровой пролетной базе – черные квадратики. Модель времяпролетного спектра тепловых нейтронов на 11-ти метровой пролетной базе – серые кружочки.

Результаты измерений представлены на рисунке 9 – черные квадратики. Левый пик – это вспышка реактора. Далее видны низко лежащие резонансы  $^{235}\text{U}$ : 1,135 эВ и 0,285 эВ и

большой пик тепловых нейтронов. Пик тепловых нейтронов хорошо описывается распределением [1]

$$f(\lambda) d\lambda = N \cdot (\lambda_0^3 / \lambda^5) \cdot \exp(-\lambda_0 / \lambda) \cdot d\lambda \quad (12),$$

здесь  $\lambda_0 = 2\text{Å}$  – наиболее вероятная длина волны нейтронов, параметр подгонки. Так как нейтроны с короткой длиной волны имеют большую скорость и, как видно из экспериментального времяпролетного спектра, их количество мало, то они не учитывались в процессе моделирования.

Были построены времяпролетные спектры для 10-ти метровой и 30-ти метровой пролетных баз. Здесь использовались выражения (8), (9) и (11) с  $\lambda_0 = 2\text{Å}$  и  $\tau_n = 1000$  с.

Экспериментальное значение времяпролетного спектра было смоделировано в виде распределения

$$F_{ex}(\lambda)d\lambda = F_{ex}(\lambda)d\lambda + \zeta \cdot (F_{ex}(\lambda)d\lambda) \cdot 0,5 \quad (13),$$

где  $\zeta$  – случайная величина, имеющая нормальное распределение с математическим ожиданием  $M(\zeta) = 0$  и дисперсией  $D(\zeta) = 1$ . Приближенное значение величины  $\zeta$  вычислялось, согласно [2], по формуле:

$$\zeta = \sum \gamma_i - 6 \quad (14),$$

здесь  $\sum \gamma_i$  – сумма 12-ти случайных чисел, равномерно распределенных на интервале (0,1).

Спектры нейтронов  $f(\lambda)_{30}$  и  $f(\lambda)_{10}$ , зарегистрированные на 30-ти и 10-ти метровой базах, получались согласно выражению (13), а результат (отношение спектров нейтронов  $f(\lambda)_{30}/f(\lambda)_{10}$ ) получался аппроксимацией этого отношения линейной функцией. В расчет были включены нейтроны с энергией от 1 мэВ до 520 мэВ. Каждый детектор обладал 100% эффективностью регистрации нейтронов в этом диапазоне энергий и зарегистрировал  $2,99 \cdot 10^{16}$  нейтронов. Моделирование трех измерений дало времена жизни нейтрона:

$$\tau_n = 999,62 \pm 1,99 \text{ с}; \quad \tau_n = 1003,30 \pm 1,97 \text{ с}; \quad \tau_n = 999,91 \pm 1,96 \text{ с}.$$

Итак, моделирование показывает, что в идеальных условиях, в отсутствии фона и остаточного газа в пролетном пространстве и при 100 % эффективности регистрации нейтронов, предлагаемый метод измерения времени жизни нейтрона дает хорошие результаты.

Для того чтобы выбрать методику измерений позволяющую избавиться от строгого требования одинаковости детекторов, был промоделирован эксперимент с детекторами, имеющими неодинаковые эффективности регистрации нейтронов.

На рисунке 6 представлены результаты моделирования эксперимента с детекторами расположенными на 10-ти и 30-ти метровых базах. Детекторы имеют толщину 8 и 8,2 длин

свободного пробега для нейтронов с длиной волны 1,7 Å. Спектр отношения  $f_{10} \cdot \varepsilon_{10} / f_{30} \cdot \varepsilon_{30}$  – черные квадратики. Видно, что этот спектр существенно отличается от прямой черной линии.

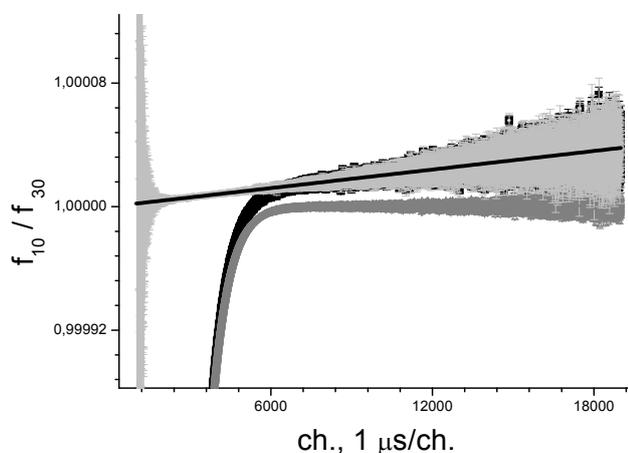


Рисунок 8. Спектр  $f_{10} \cdot \varepsilon_{10} / f_{30} \cdot \varepsilon_{30}$  – черные квадратики. Спектр калибровки детекторов на 10-ти метровой базе  $R = f_{10} \cdot \varepsilon_{10} / f_{10} \cdot \varepsilon_{30}$  – серые треугольники. Спектр, поправленный на эффективность детекторов  $f_{10} \cdot \varepsilon_{10} / f_{30} \cdot \varepsilon_{30} / R$  – светлосерые треугольники, результат линейной аппроксимации – черная прямая линия.

На этом же рисунке приведены результаты калибровки. Детекторы расположены на 10-ти метровой базе. Спектр отношения  $R = f_{10} \cdot \varepsilon_{10} / f_{10} \cdot \varepsilon_{30}$  – серые треугольники.

Окончательный спектр, поправленный на эффективность детекторов  $f_{10} \cdot \varepsilon_{10} / f_{30} \cdot \varepsilon_{30} / R$  – светло серые треугольники. Время жизни нейтрона, полученное линейной аппроксимацией поправленного спектра, равно  $\tau_n = 999,09 \pm 1,40$  с.

До сих пор, при моделировании экспериментов по измерению времени жизни нейтрона времяпролетным методом, мы полагали фон  $V(t)$  в выражении (7) равным 0. В реальном эксперименте можно ожидать [3], как минимум 3 вида фона: внешний фон экспериментального зала и космоса, фон рассеянных нейтронов и  $\gamma$  – квантов от пучка нейтронов установки, фон от запаздывающих нейтронов. Так как структура фона нам не известна, мы предположили, что фон, в формуле (7) одинаков на обеих времяпролетных базах, а давление остаточного газа равно нулю. Чтобы зависимость определения времени жизни нейтрона от величины фона была видна более отчетливо, количество зарегистрированных нейтронов было увеличено до  $3 \cdot 10^{18}$ . Результаты моделирования представлены на рисунке 5.

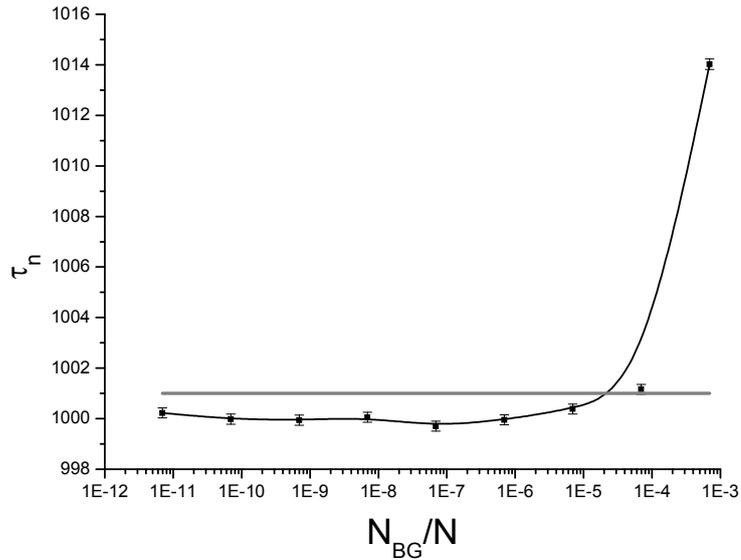


Рисунок 9. Зависимость времени жизни нейтрона от величины фонового счета детекторов.

Видно, что для того чтобы систематическая погрешность была много меньше секунды, необходимо чтобы отношение фонового счета нейтронов к замедленным нейтронам вспышки было меньше чем  $5 \cdot 10^{-7}$ . Это условие заведомо не выполняется для запаздывающих нейтронов. На рисунке 8 приведены измерения времяпролетных спектров нейтронов, прошедших 10 сантиметров свинца, 2 мм тантала и 0,2 мм индия – серые кружочки. Черные квадратики – пучок нейтронов перекрыт 10 см свинца, 2 мм тантала, 0,2 мм индия и 10 см оксида самария.

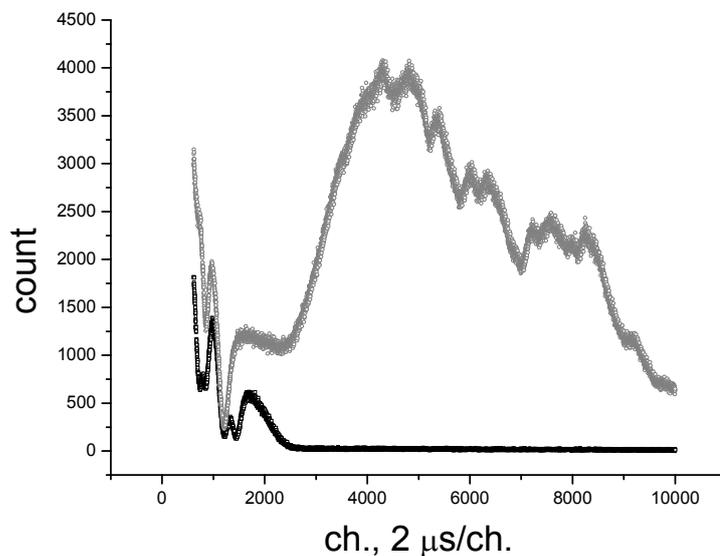


Рисунок 10. Измерение фона на 28 м времяпролетной базе 1-го канала реактора ИБР-2. Серые кружочки – пучок нейтронов перекрыт 10 см свинца, 2 мм тантала и 0,2 мм индия. Черные квадратики – пучок нейтронов перекрыт 10 см свинца, 2 мм тантала, 0,2 мм индия и 10 см оксида самария.

Нейтроны, прошедшие сквозь самарий, имеют энергию больше 150 мэВ, и их количество весьма велико. Полученное отношение равно  $\sum N_{InTaSm} / \sum N_{InTa} = 0,007475$ . Суммы брались с 2882 канала по 10000 канал.

Метод корректного определения фона запаздывающих нейтронов в процессе разработки.

Итоги исследования:

Разработан принципиально новый метод измерения времени жизни нейтрона, свободный от многих систематических погрешностей измерений.

Метод корректного определения фона запаздывающих нейтронов в процессе разработки.

Использованная литература:

Александров Ю.А., Шарапов Э.И., Чер Л., Дифракционные методы в нейтронной физике. М.: Энергоиздат, 1981. 216с.

Соболь И.М., Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973. 312 с.

А.И. Куклин и др. Письма в ЭЧАЯ. Т. 8, № 2(165). с. 200-217. Анализ спектров и потоков от криогенных и тепловых замедлителей нейтронов реактора ИБР-2 по результатам моделирования и экспериментов на установке малоуглового рассеяния ЮМО.

Развитие методов нейтронной радиографии и томографии применительно к импульсным источникам нейтронов.

Исполнители: и.о. зав. Сектором Р.А.Садыков. Отв. Трунов Д.Н., Аксенов С.Н.

Проведен монтаж установки для нейтронной томографии и радиографии на базе установки Геркулес. Проведены тестовые радиографические исследования дефектов объемной структуры немагнитной камеры высокого давления. Исследовано влияние графитового и бериллиевого фильтра на качества полученных радиографических снимков. Проведены измерения различных металлов и костей для оценки оптимальных параметров установки.

Развитие новых методов регистрации нейтронов. Научный руководитель Равиль Асхатович Садыков.

Создание и развитие нейтронных детекторных кольцевых систем на основе сцинтилляторов. Автоматизация и кольцевые детекторы на установке Кристалл .

Ответственные исполнители: Столяров А.А., Трунов Д.Н., Марин В.Н.

Изготовлен прототип большого твердотельного двухкоординатного детектора нейтронов

По результатам тестовых экспериментов с сцинтилляционными детекторами нейтронов, разработанных в ЛНИ, сделан устный доклад на международной конференции [1] и опубликована статья [2]. По результатам тестовых экспериментов на установке МНС на ИН-06 с использованием сцинтилляционного детектора с временной фокусировкой сделан устный доклад [3] и направлена в печать публикация [4].

[1] A new scintillation detectors based on SiPM and lightguides. - V.S. Litvin, V.N. Marin, R.A. Sadykov, D.N. Trunov , S.N. Axenov and S.P. Kuznetsov CMR-2017, Dubna

[2] Кольцевой детектор нейтронов для времяпролетного дифрактометра, состоящий из линейных сцинтилляционных детекторов на основе кремниевых фотоумножителей. - В. Н. Марин, Р. А. Садыков, Д. Н. Трунов, В. С. Литвин, С.Н. Аксенов – ПТЭ 2018 №1 с. 5-12.

[3] Нейтронный времяпролетный дифрактометр высокого разрешения на импульсном источнике нейтронов ИН-06 в ИЯИ РАН - Кузнецов С.П., Марин В.Н., Литвин В.С., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Лебедь Ю.Б., Мешков И.В., Садыков Р.А. - III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз 2017

[4] Дифрактометр высокого разрешения на импульсном нейтронном источнике ИН-06 ИЯИ РАН. - С.П. Кузнецов, В.С. Литвин, В.Н. Марин, Д.Н. Трунов, С.Н. Аксенов, Ю.Б. Лебедь, И.В. Мешков, Р.А. Садыков – Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования - 2018, № 5 (в печати).

Создание условий для исследования с применением низкотемпературных устройств и систем высокого давления. Модернизация гелиевых криостатов, прессов и камер высокого давления различного типа: поршень-цилиндр до 30 кбар и наковален вплоть до 1Мбар.

Ответственные исполнители: Садыков Р.А., Гаврилюк А.Г., Аксёнов С.Н., Трунов Д.Н.

Проведены подготовительные работы по созданию условий для исследования с применением низкотемпературных устройств и систем высокого давления. Проведена подготовка гелиевого криостата замкнутого цикла для нейтронографических исследований к

эксперименту, однако необходим ремонт вакуумного кожуха. Направлена заявка в ФАНО на получение субсидии.

Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце.

Руководитель д.ф.-м.н. Коптелов Э.А.

Для измерений на СВЗ разработана многопроволочная пропорциональная камера регистрации осколков деления и  $\alpha$ - частиц. Подготовлена к экспериментальным измерениям система регистрации и обработки данных. Для завершения работы необходимо иметь слои  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . Предполагается в дальнейшем использовать возможности экспериментальной поверки в ОИЯИ детектирующей аппаратуры, предназначенной для работы во время сеансов на СВЗ.

Разработка методики по определению времени задержки вылета нейтронов из замедлителя.

Для отработки методики использовались экспериментальные возможности ОИЯИ.

Определение времени задержки вылета нейтронов из замедлителя было сделано следующим образом. С помощью монокристалла формировался пучок нейтронов дифракции с определенной длиной волны [1], и вычислялось время пролета этих нейтронов  $t_{\text{cul}}$ . Время замедления и вылета нейтронов из замедлителя в этом случае равно

$$\Delta t = (t_1 - t_0) - t_{\text{cul}} \quad (1).$$

Здесь:  $t_1$  – время регистрации рефлекса первого порядка;  $t_0$  – время вспышки, полученное аппроксимацией в виде Гаусса фрагмента времяпролетного спектра вспышки, как показано выше;  $t_{\text{cul}}$  – время пролета, вычисленное из измеренного угла Брэгга, оцененной длины пролетной базы  $L = 28040$  мм и известной величины  $2d_{200} = 6,59 \text{ \AA}$  по формулам (2) и (3):

$$n\lambda = 2 \cdot dhkl \cdot \sin(\theta) \quad (2),$$

$$\lambda = 3.956 \cdot t / L \quad (3).$$

На рисунке 11 представлена зависимость  $\Delta t$  от длины волны регистрируемых нейтронов дифракции.

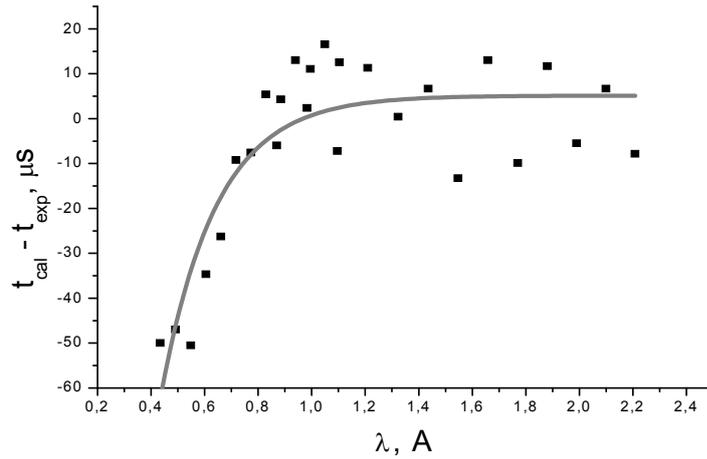


Рисунок 11. Относительное время замедления и вылета нейтронов из замедлителя в зависимости от длины волны нейтронов.

Время вылета нейтронов сравнительно быстро увеличивается с увеличением длины волны нейтронов, и, начиная с длины волны нейтрона примерно  $1 \text{ \AA}$ , остается практически постоянным вплоть до значения  $2,2 \text{ \AA}$ . Нейтроны замедляются до этой области длин волн и вылетают из замедлителя одновременно. В этом случае ширина рефлексов должна иметь такую же зависимость.

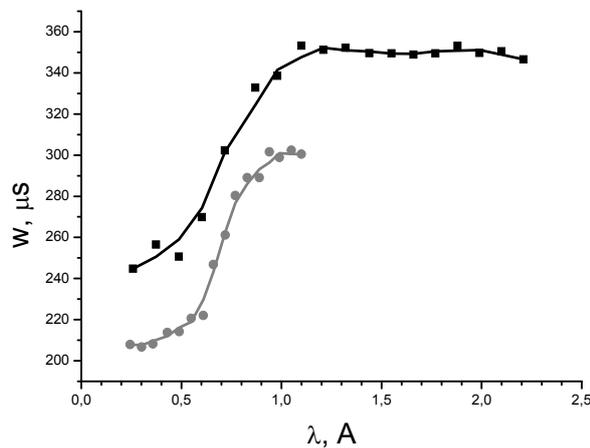


Рисунок 12. Зависимость полуширины рефлексов, аппроксимированных в виде Гаусса, от длины волны нейтрона. Черные квадратики и черная линия – рефлексы первого порядка, серые кружочки и сплошная серая линия – рефлексы второго порядка. Маркерами отмечены экспериментальные результаты.

На рисунке 12 приведена зависимость ширин рефлексов 1-го и 2-го порядков от длины волны нейтрона, которые получены аппроксимацией в форме Гаусса. Так как вид полученных рефлексов имеет несимметричную форму, то найденные величины ширин, к сожалению, носят только качественный характер.

Итоги исследования :

Время вылета нейтронов сравнительно быстро увеличивается с увеличением длины волны нейтронов, и, начиная с длины волны нейтрона примерно  $1\text{ \AA}$ , остается практически постоянным вплоть до значения  $2,2\text{ \AA}$ .

Получена зависимость ширин рефлексов 1-го и 2-го порядков от длины волны нейтрона.

Время эмиссии нейтронов от замедлителя зависит от длины волны нейтронов.

Определение фоновых условий.

Развивалось применение кода SHIELD для моделирования естественного нейтронного фона в исследовательских установках, в подземной физике, а также в аналогичных задачах:

K.V.Manukovsky, O.G.Ryazhskaya, N.M.Sobolevsky, A.V.Yudin. Neutron Production by Cosmic-Ray Muons in Various Materials. <http://arxiv.org/abs/1703.06407>

В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский. Геохронология и мониторинг космических лучей по накоплению космогенных изотопов  $^{53}\text{Mn}$  и  $^{10}\text{Be}$  в земных породах. Космические исследования 55 (2017) 367-372. Английская версия: V.E.Yants, S.G.Lebedev, and N.M.Sobolevsky. Geochronology and Monitoring of Cosmic Rays for Accumulating Cosmogenic Isotopes  $^{53}\text{Mn}$  and  $^{10}\text{Be}$  in Terrestrial Rocks. Cosmic Research 55 (2017) 333–337.

Проблемы физики трансмутации ядерных материалов и технология подкритических систем на пучках заряженных частиц.

Руководители Проекта. д.ф.-м.н. Коптелов Э.А., к.ф.-м.н. Сидоркин С.Ф. д.ф.-м.н. Соболевский Н.М.

В 2017 году продолжены работы по выработке оптимального решения создания демонстрационного подкритического стенда для подхода к решению проблем выжигания минорных актиноидов, а также проблемы ториевого ядерного цикла ядерных энергетических установок будущего.

Изучен и обоснован модифицированный вариант исследовательского ADS – стенда, адаптированного к существующей инфраструктуре экспериментального комплекса и реального тока протонов линейного ускорителя ИЯИ РАН (максимальная мощность при

умножении  $M = 50$  составляет  $\sim 5$  МВт при энергии протонов 300 МэВ и среднем токе 250 мкА).

Рассмотрены варианты бланкета с жидко-солевыми вставками.

Рассмотрены возможности увеличения среднего времени жизни мишени ADS – стенда за счет использования вращающихся мишеней.

Продолжаются обсуждения других вариантов стенда с представителями IThC – Международного ториевого комитета.

Продолжено развитие транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования процессов взаимодействия частиц с веществом. Проведено сравнение различных кодов, выявлены области их эффективного использования.

Проведено моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ.

Реферируемые журналы, препринты

J.W.Norbury, T.C.Slaba, N.Sobolevsky, B.Reddell. Comparing HZETRN, SHIELD, FLUKA and GEANT transport codes. Life Sciences in Space Research 14(2017)64-73.

Доклады на конференциях и школах

L.N. Latysheva, S.G. Lebedev, N.M. Sobolevsky, A.V. Feschenko. The stand for irradiation of electronic boards at the INR RAS linac: estimation of particle fluxes, activation, and dose rate. Oral talk at the 25th International Seminar on Interactions of Neutrons with Nuclei (ISINN-25), Dubna, Russia, May 22 – 26, 2017. <http://isinn.jinr.ru/past-isinns/isinn-25/24/Sobolevsky.pdf>

Рабочее совещание EUCARD2 Workshop, CERN, 7-9 February 2017

<http://eucard2.web.cern.ch/activities/wp4-accelerator-applications-accappli>

<https://indico.cern.ch/event/564485>

The ADS-Troitsk project. S.F. Sidorkin, L.V. Kravchuk, A.V. Feschenko, E.A.Koptelov, A.D. Rogov, M. Bourquin, F. Carminati, J.-C. de Mestral, F. Gerigk, V. Grichine, R. Gimalov, Y. Kadi, E. Lillestol, M. Losasso, J.-P. Revol, K. Samec

ISINN-25, Dubna, Russia, May 22 – 26, 2017 25-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: <http://isinn.jinr.ru>

FRANK LABORATORY OF NEUTRON PHYSICS

JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

Proposal of the ADS research stand of the Institute for Nuclear Research RAS

S.F. Sidorkin, L.V. Kravchuk, A.V. Feschenko, E.A.Koptelov, A.D. Rogov

Расширенный научный семинар «Жидко-солевые реакторы: перспективы применения, научные и технологические вопросы создания», 07 декабря 2017 ВНИИНМ им. ак. Бочвара.

Информационное письмо ВНИИНМ от 17.11.2017, № 001 – 14/87 по списку рассылки С.Ф.Сидоркин «Использование ускорительно-мишенного комплекса ИЯИ РАН для экспериментов с топливными композициями ЖСР»

В 2017 году издан учебник, рекомендованный в качестве учебного пособия для студентов ВУЗов, обучающихся по направлению подготовки 03.03.01 «Прикладные математика и физика».

Н.М.Соболевский. Метод Монте-Карло в задачах о взаимодействии частиц с веществом. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2017.

Создание системы перемещения двухкоординатного детектора нейтронов на установке ГОРИЗОНТ.

Руководители Проекта д.ф.-м.н Коптелов Э.А., к.ф.-м.н. Садыков Р.А.

Создан простой механизм перемещения двухкоординатного детектора установки «Горизонт» с ручным управлением. Проведено дооснащение Нейтронного рефлектометра-малоуглового спектрометра «Горизонт» двухкоординатным монитором и двухкоординатным детектором нейтронов. Проведены тестовые измерения. Получены профили и спектры прямого пучка. Изучена фоновая обстановка в экспериментальной зоне установки. На рис. 1а приведен времяпролетный спектр нейтронов падающего на образец пучка, измеренный с помощью двухкоординатного монитора. Также проведены контрольные измерения при мониторе, закрытом листовым кадмием, который поглощает нейтроны с энергией меньше 0.5 эВ (рис. 1 б). Из сравнения этих двух спектров следует, что в прямом пучке отсутствуют быстрые нейтроны, благодаря изогнутому зеркальному нейтронному волноводу. Получены спектры малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) на тестовых образцах. Были выбраны образцы сплава 40ХНЮ в виде 2-мм пластин до и после термообработки, вызывающей образование наночастиц и, как следствие, увеличение сечения МУРН. Падающий пучок формировался в виде квадрата сечением 5х5 мм с помощью автоматизированных коллимирующих устройств. Рассеянные нейтроны регистрировались с помощью двухкоординатного детектора. Полученные матрицы зависимости счета детектора от координаты и времени пролета проинтегрированы по-горизонтали и переведены в зависимости интенсивности от переданного импульса нейтрона, нормировка проводилась по интегральному флюенсу прямого пучка. По результатам измерений на данной установке сделаны устные доклады [1, 2].

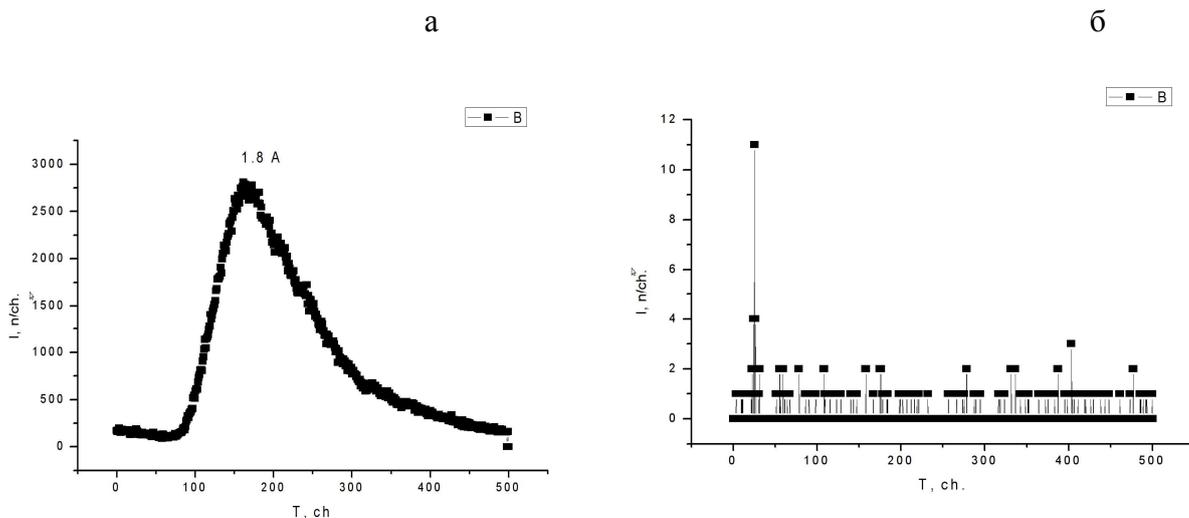


Рисунок 13. Спектр прямого пучка на выходе из нейтроновода без кадмия (а) и перекрытого кадмием (б). Видно, что быстрые нейтроны отсутствуют, благодаря изогнутому зеркальному нейтроноводу.

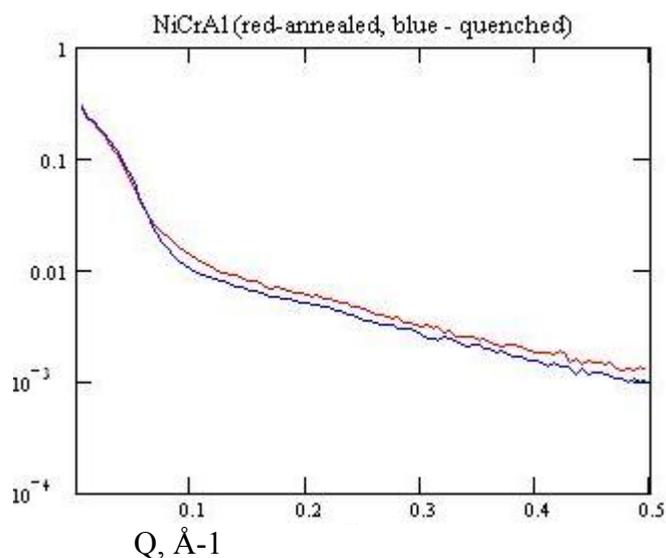


Рисунок 14. Спектры малоуглового рассеяния нейтронов на сплаве 40ХНЮ до (синий) и после отжига (красный). Получены на установке «Горизонт».

Выполнение монтажно-пусковых работ и ввод в действие установки Геркулес для исследований образцов водородной энергетики *in situ* Создание герметичного безопасного бокса для наводороживания и нейтронных исследований. Исследование структуры образцов клатратов и водородной энергетики под давлением газов до 10 кбар.

Ответственные исполнители: Аксенов С.Н. , Садыков Р.А., Трунов Д.Н., Гаврилюк А.Г. Лебедь Ю.Б.

В 2017 году благодаря поддержке ФАНО, которое выделило деньги на ремонт установок, был проведен ремонт установки. Сейф был полностью загерметизирован. Были проведены пусконаладочные работы и установка в готовности для тестовых испытаний.

Создание системы перемещения кольцевого детектора нейтронов на установке КРИСТАЛЛ.

Разработан и изготовлен механизм перемещения кольцевого детектора нейтронов на установке КРИСТАЛЛ, на основе шагового двигателя, с программным управлением.

Доклады по теме:

1. Литвин В.С., Чураков А.В., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Мешков И.В., Садыков Р.А. - Нейтронный времяпролетный рефлектометр-малоугловой спектрометр «ГОРИЗОНТ» на импульсном источнике нейтронов ИН-06 в ИЯИ РАН. - III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз, 24-27 января 2017, Москва.

2. Литвин В.С., Чураков А.В., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Садыков Р.А. - Установка «ГОРИЗОНТ». Первые эксперименты по малоугловому рассеянию на импульсном источнике ИН-06 ИЯИ РАН. - V Конференция по малоугловому рассеянию нейтронов "МУРомец 2017", 20-22 сентября 2017 г., Гатчина.

Разработка высокоэффективных твердотельных детекторов нейтронов.

Ответственный исполнитель: Садыков Равиль Асхатович.

В 2017 году проводилось дальнейшее исследование детекторов, состоящих из ZnS(Ag)/LiF, а также прототипов двухкоординатного детектора нейтронов со спектрсмещающими волокнами и лавинными фотодиодами в ограниченном Гейгеровском режиме.

Экспериментально определена эффективность разработанных счетчиков. В качестве образцового использовался гелиевый счетчик «Гелий-3» высокого давления (8 атм.) производства фирмы «Консенсус» г. Запрудня. В качестве источника нейтронов использовался  $^{252}\text{Cf}$ . Использовалось отношение счетов гелиевого и сцинтилляционного счетчиков с учетом площадей счетчиков. Относительная эффективность сцинтилляционного счетчика - 50%, а для счетчика с эффективностью сцинтиллятора 42% - 74%. Исходя из давления гелия-3 в образцовом счетчике, указанного в паспорте, эффективность счетчика - 80

% для длины волны  $1.8 \text{ \AA}$ . Соответственно, абсолютная эффективность сцинтилляционных счетчиков оценивается как 45% и 60 %.

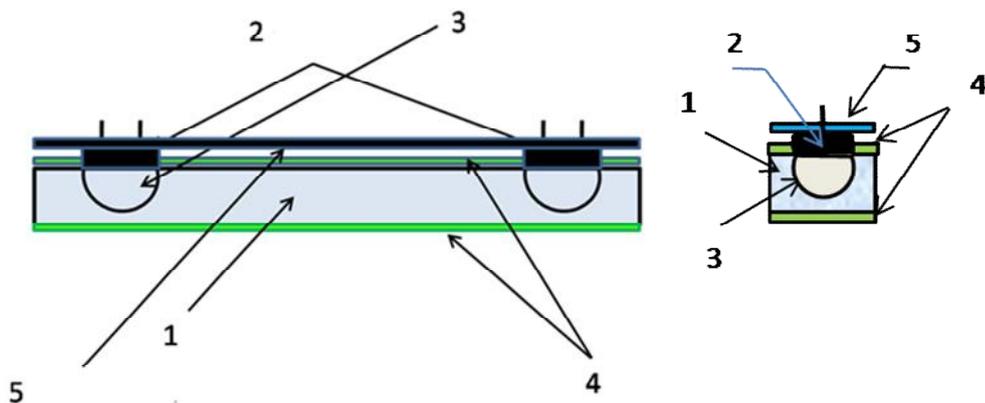


Рисунок 15. Конструкция сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов.

Световод из органического стекла или полистирола, 2 - Лавинные диоды SiPM, 3- Оптические линзы встроенные в световод, 4 - Сцинтиллятор ZnS(Ag)/LiF, 5 - Кроссплата.

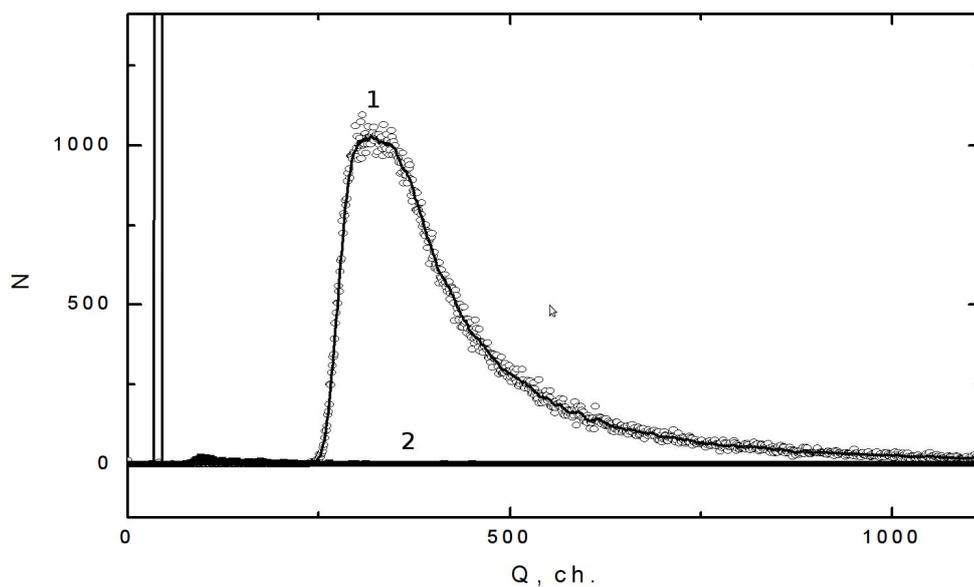
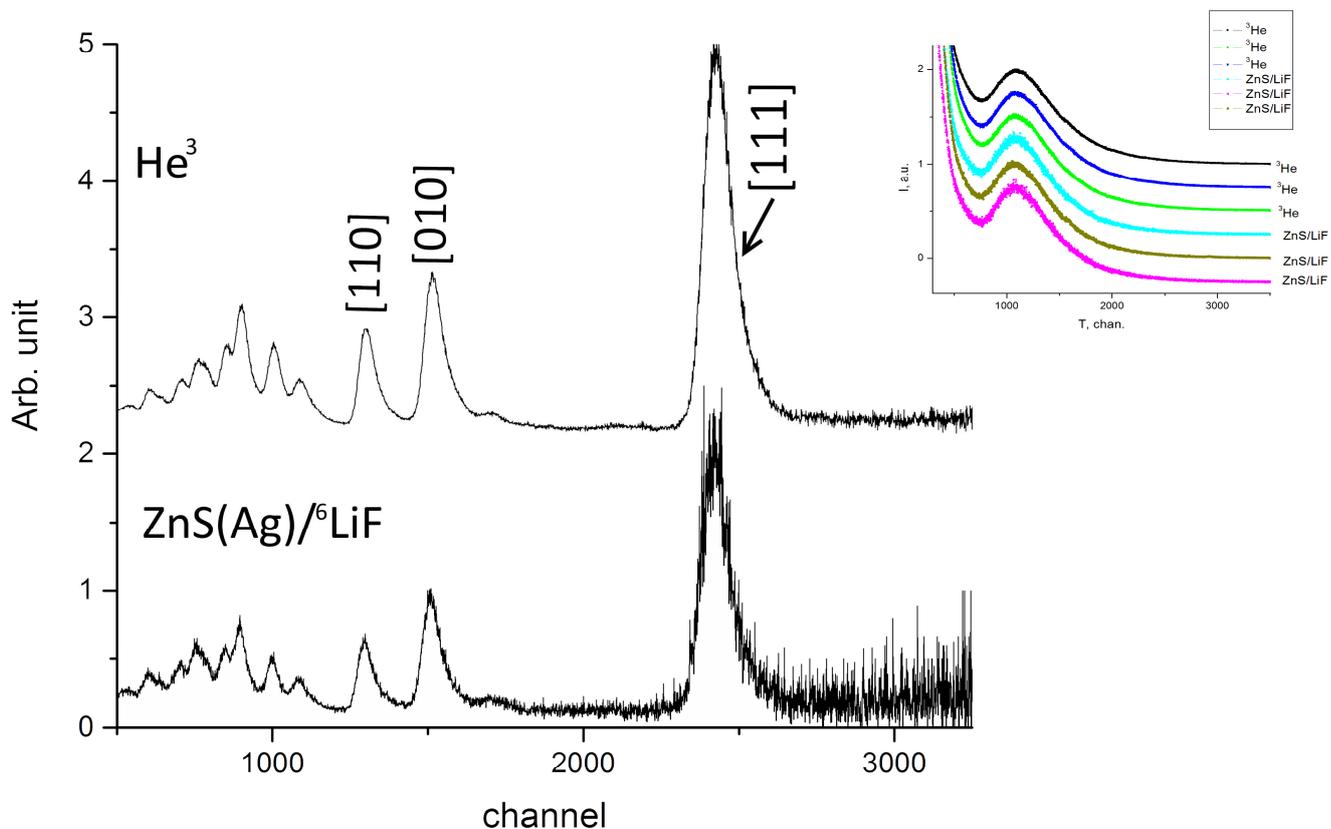


Рисунок 16. Зарядовые спектры счетчика типа 1. (1) — при облучении счетчика



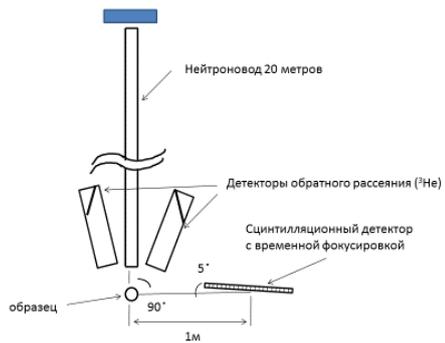
нейтронами. (2) — темновые шумы. Порог соответствует 50 отсчетам шкалы, что соответствует 15 фотоэлектронам. Пик соответствует 150 фотоэлектронам.

Рисунок 17. Времяпролетные спектры, измеренные на порошке синтетического алмаза с помощью гелиевых и новых сцинтилляционных счетчиков. Проведена нормировка на соответствующие спектры ванадия (на вставке).

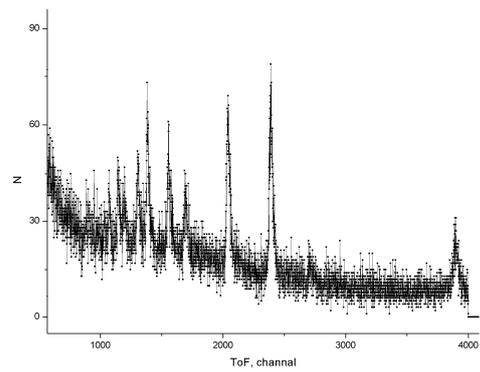
Разработка и создание многомодульного блока детекторов нейтронов с временной фокусировкой.

Разработан и создан модуль дифрактометра высокого разрешения с временной фокусировкой с использованием сцинтилляционных детекторов нового типа на основе ZnS/LiF и многопиксельных лавинных фотодиодов, который был протестирован на пучке МНС (канал 2, ИН-06). Модуль предназначен для измерений под углами, близкими к 90°. Достигнуто разрешение 1,3 % при длительности протонного импульса 60 мкс, что лучше чем расположение детекторов по окружности, дающее разрешению 2%.

Для разработанного модуля дифрактометра с временной фокусировкой разработана система регистрации сигналов для работы по времяпролетной методике (рис. 18).



а



б

Рисунок 18. Схема расположения сцинтилляционного модуля с временной фокусировкой под  $90^\circ$  (а) и нейтронограмма поликристаллического технического алмазного порошка (б).

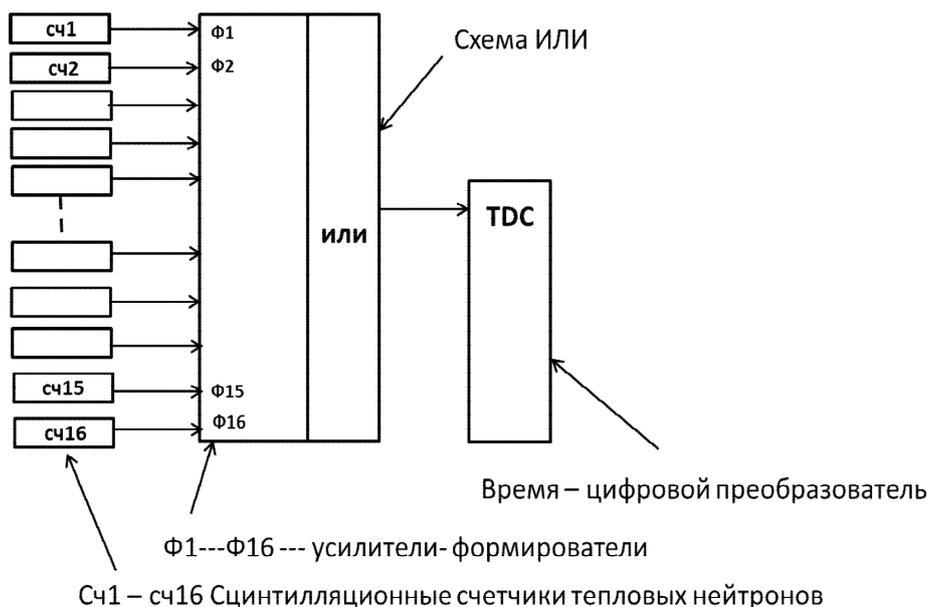


Рисунок 19. Организация включения детектора с временной фокусировкой, основанного на сцинтилляционных счетчиках тепловых нейтронов.

Создание проекта нейтронных радио- и томографии на импульсном источнике нейтронов ИЯИ ИН-06 в режиме реального времени на основе высокоскоростных спектральных детекторов.

Подготовлен проект установки для радио- и томографии в режиме реального времени на импульсном источнике нейтронов ИН-06 с детектором на основе высокоскоростной ПЗС-камеры и сцинтиллятора ZnS/LiF.

Доклады по теме:

3. A new scintillation detectors based on SiPM and lightguides. - V.S. Litvin, V.N. Marin, R.A. Sadykov, D.N. Trunov , S.N. Axenov and S.P. Kuznetsov CMR-2017, 9-12 October 2017, Dubna

4. Нейтронный времяпролетный дифрактометр высокого разрешения на импульсном источнике нейтронов ИН-06 в ИЯИ РАН. - Кузнецов С.П., Марин В.Н., Литвин В.С., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Лебедь Ю.Б., Мешков И.В., Садыков Р.А. - III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз, 24-27 января 2017, Москва.

Публикации по теме:

5. Кольцевой детектор нейтронов для времяпролетного дифрактометра, состоящий из линейных сцинтилляционных детекторов на основе кремниевых фотоумножителей. / В. Н. Марин, Р. А. Садыков, Д. Н. Трунов, В. С. Литвин, С.Н. Аксенов // ПТЭ 2018 №1 с. 5-12.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа сотрудников ЛНИ в 2017 году продемонстрировала возможности проведения исследований и получения значимых результатов по ряду актуальных направлений современной физики, в том числе с использованием экспериментальных возможностей Лаборатории в ИЯИ РАН.

Ряд результатов получен в результате сотрудничества с коллегами в России и за рубежом.

## ПУБЛИКАЦИИ

1. N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, R.Ogul. Influence of the hyper-terms in mass formulae on yield of hypernuclei in nuclear reactions. Proc. of the 32th International Conference of Turkish Physical Society, Bodrum, 5-10 Sept, 2016. AIP Conf. Proc. v. 1815, 060003 (2017). doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4976399>
2. A.S.Botvina, K.K.Gudima, J.Steinheimer, M.Bleicher, J.Pochodzalla. Formation of hypernuclei in heavy-ion collisions around the threshold energies. Phys. Rev. C, v. 95, p. 014902 (10 pages), 2017. DOI: 10.1103/PhysRevC.95.014902
3. A.Botvina, M.Bleicher, J.Pochodzalla, J.Steinheimer. Formation of hypernuclear in relativistic ion collisions. Proc. of the 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015). Journal of the Physical Society of Japan: JPS Conf. Proc., v.17, 092002 (2017). <https://doi.org/10.7566/JPSCP.17.092002>
4. A.S.Botvina, J.Steinheimer, and M.Bleicher. Formation of exotic baryon clusters in ultra-relativistic heavy-ion collisions. Phys. Rev. C, v.96, p.014913 (6 pages), 2017. DOI: 10.1103/PhysRevC.96.014913
5. S.P.Avdeyev, A.S.Botvina, W.Karcz, V.V.Kirakosyan, V.P. Ladygin. Study of the source velocity with the light relativistic ions at CBM. CBM Progress Report 2016, page 187. GSI, Darmstadt, Germany (2017). [http://repository.gsi.de/record/201318/files/cbm\\_pr2016.pdf?version=1](http://repository.gsi.de/record/201318/files/cbm_pr2016.pdf?version=1)
6. A.S.Botvina. Statistical production and binding energy of hypernuclei. Preprint INR RAS 1435/2017 (16 pages), Moscow, 2017.
7. А.В.Андреев, Ю.М.Бурмистров, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, Л.Н.Латышева, М.В.Мордовской, В.Н.Пономарёв, Г.В.Солодухов, Н.М.Соболевский. ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК. Патент RU 2 634 330 С1, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, дата регистрации 26.10.2017.
8. И.Н.Цымбалов, Р.В.Волков, Н.В.Еремин, К.А.Иванов, В.Г.Недорезов, А.Н.Мушкаренко, А.Пасхалов, А.Л.Полонский, А.Б.Савельев, Н.М.Соболевский, А.А.Туринге, С.А.Шуляпов. Исследование реакции  $D(\gamma, n)H$  вблизи порога с использованием мощного фемтосекундного лазерного излучения. Ядерная Физика 80 (2017) 189–194. Английская версия: I.N.Tsymbalov, R.V.Volkov, N.V.Eremin, K.A.Ivanov, V.G.Nedorezov, A.A.Paskhalov, A.L.Polonskij, A.B.Savel'ev, N.M.Sobolevskij, A.A.Turinge, S.A.Shulyapov. Investigation of the reaction  $D(\gamma, n)H$  near the threshold by means of powerful femtosecond laser radiation. Physics of Atomic Nuclei 80 (2017) 397–401.

9. J.W.Norbury, T.C.Slaba, N.Sobolevsky, B.Reddell. Comparing HZETRN, SHIELD, FLUKA and GEANT transport codes. *Life Sciences in Space Research* 14(2017)64-73.
10. John W. Norbury, Nikolai Sobolevsky, Charles M. Werneth. SHIELD and HZETRN Comparisons of Pion Production Cross Sections. Accepted in *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*
11. B. J.Steinheimer, A.Botvina and M.Bleicher. Sub-threshold charm production in nuclear collisions. *Phys. Rev. C*, v. 95, p. 014911 (6 pages) , 2017. DOI: 10.1103/PhysRevC.95.014911
12. R.Ogul, N.Buyukcizmeci, A.Ergun, A.S.Botvina. Production of neutron-rich exotic nuclei in projectile fragmentation at Fermi energies. *Nucl. Sci. Tech.* v. 28, p.18, 2017. doi:10.1007/s41365-016-0175-6
13. Аксенов В.Л., Балагуров А.М., Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д., Высокопоточный источник нейтронов на основе каскадного бустера, *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*, 2017 г., вып.2, стр. 4.
14. V.L .Aksenov, V.D. Ananiev, G.G. Komyshev, A.D. Rogov, E.P. Shabalin, **On the limit of neutron fluxes in the fission-based pulsed neutron sources**, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, Volume 14, Issue 5, pages 788-797, 2017.
15. I. S. Lyubutin, S. S. Starchikov, A. G. Gavriliuk, I. A. Troyan, Yu. A. Nikiforova, A. G. Ivanova, A.I. Chumakov, R. Ruffer, "Magnetic phase separation and strong enhancement of the Neel temperature at high pressures in a new multiferroic Ba<sub>3</sub>TaFe<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>14</sub>", *JETP Letters* 105(1), (2017).
16. Yu. A. Nikiforova, A. G. Gavriliuk, I. S. Lyubutin, A. G. Ivanova, I. A. Troyan, S. S. Starchikov, S. N. Aksenov, V. V. Struzhkin, S. N. Sul'yanov and K. V. Glazyrin, "Structural transitions in iron-based Ba<sub>3</sub>NbFe<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>14</sub> langasite at high pressures", *EPL* 116, 66003 (published online 16 February 2017).
17. Jianjun Ying, Xiao-jia Chen, Naizhou Wang, Xianhui Chen, Alexander Gavriliuk, Ivan I. Naumov, Russell J. Hemley, Igor I. Mazin and Viktor V. Struzhkin, "Fermi surface reconstruction in 2H-TaSe<sub>2</sub> under high pressure mediated by interlayer interaction", submitted to *Nature Communications* (2017).
18. A. G. Gavriliuk, I. A. Trojan, A. G. Ivanova, S. N. Aksenov, Yu. Nikiforova, "Structural properties and phase compositions of tin hydrides SnH<sub>x</sub> at high pressures 150-250 GPa", *PETRA-III experiment DESY Report* (2017).
19. Haohua Wen, A. A Semenov and C. H. Woo "Many-body effects in the mobility and diffusivity of interstitial solute in a crystalline solid: The case of helium in BCC tungsten", *J. Nucl. Mater.*, 2017, vol. 493, pp. 21-29

20. K.V.Manukovsky, O.G.Ryazhskaya, N.M.Sobolevsky, A.V.Yudin. Neutron Production by Cosmic-Ray Muons in Various Materials. <http://arxiv.org/abs/1703.06407>

21. В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский. Геохронология и мониторинг космических лучей по накоплению космогенных изотопов  $^{53}\text{Mn}$  и  $^{10}\text{Be}$  в земных породах. Космические исследования 55 (2017) 367-372. Английская версия: V.E.Yants, S.G.Lebedev, and N.M.Sobolevsky. Geochronology and Monitoring of Cosmic Rays for Accumulating Cosmogenic Isotopes  $^{53}\text{Mn}$  and  $^{10}\text{Be}$  in Terrestrial Rocks. Cosmic Research 55 (2017) 333–337.

22. J.W.Norbury, T.C.Slaba, N.Sobolevsky, B.Reddell. Comparing HZETRN, SHIELD, FLUKA and GEANT transport codes. Life Sciences in Space Research 14(2017)64-73.

23. Н.М.Соболевский. Метод Монте-Карло в задачах о взаимодействии частиц с веществом. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2017.

24. Кольцевой детектор нейтронов для времяпролетного дифрактометра, состоящий из линейных сцинтилляционных детекторов на основе кремниевых фотоумножителей. / В. Н. Марин, Р. А. Садыков, Д. Н. Трунов, В. С. Литвин, С.Н. Аксенов // ПТЭ 2018 №1 с. 5-12.

Доклады на конференциях и школах. 2017 год

1. The characteristics of the neutron beam of 1-st channel of pulsed reactor IBR-2. Kuznetsov V. L., Kuznetsova E. V., Sedyshev P.V., Dubna, May 26-30, 2017 «Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure and Related Topics». ISINN-25 (XXV International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei)

2. Measurements of the coherent neutron amplitude of scattering in the diffraction. Kuznetsov V.L., Kuznetsova E. V., Sedyshev P.V., Dubna, May 26-30, 2017 «Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure and Related Topics». ISINN-25 (XXV International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei)

3. Литвин В.С., Чураков А.В., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Мешков И.В., Садыков Р.А. - Нейтронный времяпролетный рефлектометр-малоугловой спектрометр «ГОРИЗОНТ» на импульсном источнике нейтронов ИН-06 в ИЯИ РАН. - III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз, 24-27 января 2017, Москва.

4. Литвин В.С., Чураков А.В., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Садыков Р.А. - Установка «ГОРИЗОНТ». Первые эксперименты по малоугловому рассеянию на импульсном источнике ИН-06 ИЯИ РАН. - V Конференция по малоугловому рассеянию нейтронов "МУРодец 2017", 20-22 сентября 2017 г., Гатчина.

5. A new scintillation detectors based on SiPM and lightguides. - V.S. Litvin, V.N. Marin, R.A. Sadykov, D.N. Trunov , S.N. Axenov and S.P. Kuznetsov CMR-2017, 9-12 October 2017, Dubna

6. Нейтронный времяпролетный дифрактометр высокого разрешения на импульсном источнике нейтронов ИН-06 в ИЯИ РАН. - Кузнецов С.П., Марин В.Н., Литвин В.С., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Лебедь Ю.Б., Мешков И.В., Садыков Р.А. - III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз, 24-27 января 2017, Москва.

7. L.N. Latysheva, S.G. Lebedev, N.M. Sobolevsky, A.V. Feschenko. The stand for irradiation of electronic boards at the INR RAS linac: estimation of particle fluxes, activation, and dose rate. Oral talk at the 25th International Seminar on Interactions of Neutrons with Nuclei (ISINN-25), Dubna, Russia, May 22 – 26, 2017. <http://isinn.jinr.ru/past-isinns/isinn-25/24/Sobolevsky.pdf>

8. Рабочее совещание EUCARD2 Workshop, CERN, 7-9 February 2017 <http://eucard2.web.cern.ch/activities/wp4-accelerator-applications-accapplihttps://indico.cern.ch/event/564485>The ADS-Troitsk project. S.F. Sidorkin, L.V. Kravchuk, A.V. Feschenko, E.A.Koptelov, A.D. Rogov, M. Bourquin, F. Carminati, J.-C. de Mestral, F. Gerigk, V. Grichine, R. Gimalov, Y. Kadi, E. Lillestol, M. Losasso, J.-P. Revol, K. Samec

9. ISINN-25, Dubna, Russia, May 22 – 26, 2017 25-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: <http://isinn.jinr.ru>FRANK LABORATORY OF NEUTRON PHYSICS JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH Proposal of the ADS research stand of the Institute for Nuclear Research RASS.F. Sidorkin, L.V. Kravchuk, A.V. Feschenko, E.A.Koptelov, A.D. Rogov

10. Расширенный научный семинар «Жидко-солевые реакторы: перспективы применения, научные и технологические вопросы создания», 07 декабря 2017 ВНИИИМ им. ак. Бочвара. Информационное письмо ВНИИИМ от 17.11.2017, № 001 – 14/87 по списку рассылки. С.Ф.Сидоркин «Использование ускорительно-мишенного комплекса ИЯИ РАН для экспериментов с топливными композициями ЖСР».

11. A.S.Botvina. Mechanisms of hypernuclei formation in relativistic ion collisions. A talk at DPG-Fruehjahrstagung 2017 conference, 27-31 March 2017, Muenster, Germany.<http://www.dpg-verhandlungen.de/year/2017/conference/muenster/part/hk/session/47>

12. A.Botvina. Processes of hypernuclei formation in relativistic ion collisions. Talk at 17th International conference "Strangeness in Quark Matter" - SQM2017, Utrecht, Netherlands. July 10-15, 2017. <https://indico.cern.ch/event/576735/sessions/241443/#20170713>

13. A.Botvina. Production of hyper-nuclei and exotica using UrDMD and a coalescence model. Invited Talk at 2-nd International EMMI workshop "Anti-matter, hyper-matter and exotica production at the LHC". Turin, Italy, November 6-10, 2017. <https://indico.gsi.de/event/6301/timetable/#all.detailed>

14. N. Sobolevsky. Absorbed dose rate in water phantom inside Al-screen under irradiation by GCR protons and nuclei using the SHIELD transport code. Radiation Environment and Risk Analysis At and Near the Lunar Surface: Cis-lunar Vehicle Requirements. Technical Interchange Meeting (TIM) #4, 13–14 June, 2017, Moscow.

15. J.Norbury, N.Sobolevsky, C.Werneth, T.Slaba, B.Reddell,. Space Radiation Transport Calculations. Progress since TIM #3. Radiation Environment and Risk Analysis At and Near the Lunar Surface: Cis-lunar Vehicle Requirements. Technical Interchange Meeting (TIM) #4, 13–14 June, 2017, Moscow.