

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

В 2014 г. в ЛНФ работы велись в традиционных направлениях: изучение процессов нарушения пространственной и временной четности при взаимодействии нейтронов с ядрами; изучение процесса деления; экспериментальное и теоретическое исследование фундаментальных свойств нейтрона; гамма-спектроскопия нейтронно-ядерных взаимодействий; структура атомного ядра; получение новых данных для реакторных приложений и для ядерной астрофизики; эксперименты с ультрахолодными нейтронами. Значительная часть исследований выполнена на модернизированной исследовательской ядерной установке ИБР-2, импульсном источнике резонансных нейтронов ИРЕН и установке ЭГ-5. Особо следует отметить широкий круг прикладных работ, связанный с применением НАА. Ряд работ в области фундаментальной физики и физики ультрахолодных нейтронов проводились на установках ядерных центров Германии, Китая, США, Франции, Швейцарии.

Модернизация установки ИРЕН

В 2014 г. продолжались работы по модернизации установки ИРЕН (рис.27). Цель работ – достижение проектных параметров источника нейтронов (интенсивность порядка 10^{13} н/с) к 2016 г. Проект предусматривает монтаж второй ускоряющей секции, установку новых модуляторов и замену клистронов. К настоящему времени приобретены два новых модулятора, формирующие в нагрузке высоковольтные импульсы мощностью до 180 МВт с частотой циклов до 120 Гц и два клистрона E3730A Toshiba мощностью 50 МВт. Выполнение проекта позволит работать с частотой циклов 50 Гц при энергии электронов ~ 170 МэВ, что дает среднюю мощность пучка ~ 1.5 кВт. Дополнительное увеличение выхода нейтронов может быть достигнуто за счет замены вольфрамовой нейтронопроизводящей мишени на мишень из урана-238. Монтаж второй секции, новых источников СВЧ-мощности, урановой мишени требует значительной модернизации инженерной инфраструктуры комплекса ИРЕН, работы по которой ведутся в настоящее время. Так в 2014 году был произведен монтаж системы кондиционирования и вентиляции ускорительных залов, были начаты работы по модернизации системы электроснабжения здания 43. Вместе с тем, в 2014 г. на физический эксперимент установка ИРЕН проработала 1360 часов.



Рис. 27. Подъем модуляторов в зал ускорителя через специально сделанный транспортный проем.

I. Экспериментальные и методические исследования

Модернизация детекторной системы «Ромашка-ИЯИЯЭ»

Многдетекторная система «Ромашка-ИЯИЯЭ» состоит из 12 детекторных модулей на основе NaI(Tl) и предназначена для проведения измерений нейтронных сечений на установке ИРЕН. Детекторная система смонтирована и установлена на канале №4 установки ИРЕН. Были изготовлены, протестированы и смонтированы 12 эмиттерных повторителей сигналов с фотумножителей детекторов гамма-лучей на основе кристаллов NaI(Tl). Проведена серия измерений с помощью стандартных спектрометрических гамма источников ОСГИ (Cs-137 и Co-60) для различных геометрий «источник-детектор», с целью экспериментального и модельного (аналитического) определения эффективности регистрации гамма-излучения неточечных источников. Получены экспериментальные значения эффективностей, модельные находятся в стадии определения. С помощью компьютерной программой FLUKA рассчитано распределение интенсивности (нейтрон, гамма) -поля в области гамма-спектрометра «Ромашка-ИЯИЯЭ» на 4-ом канале ИРЕН (рис. 28)

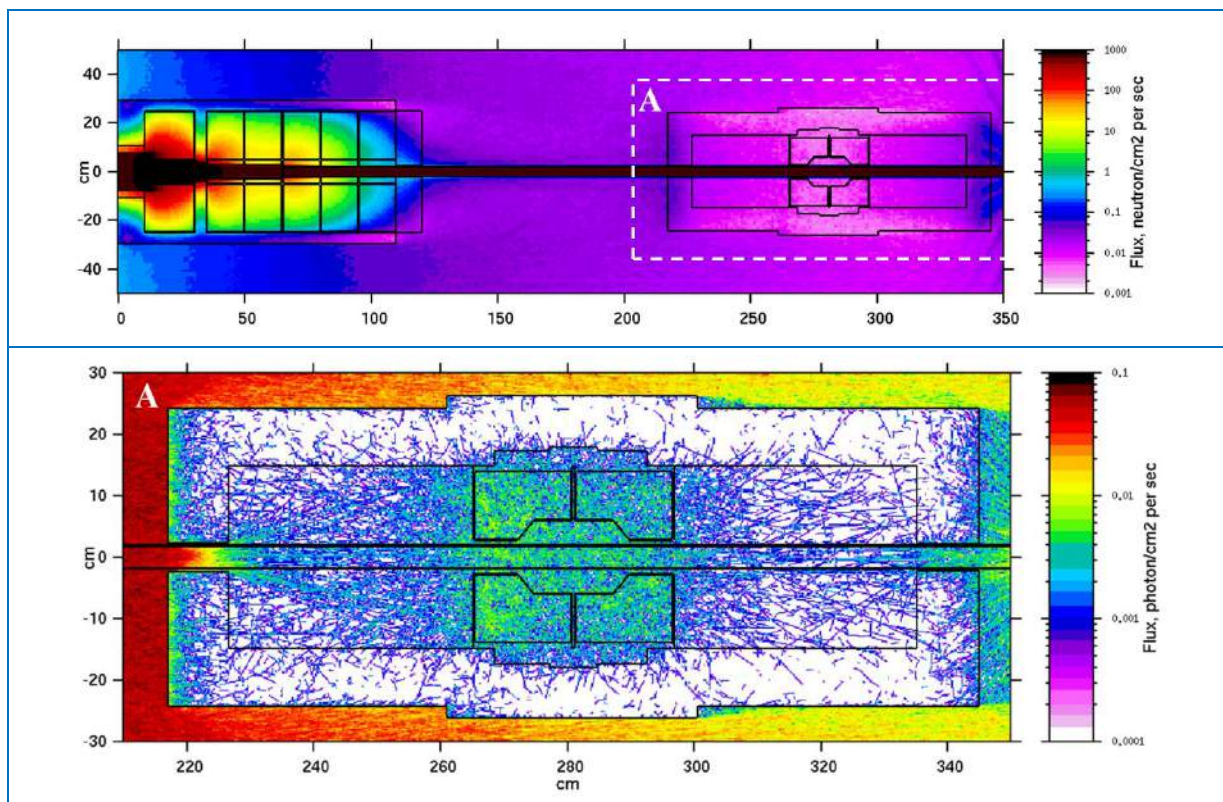


Рис. 28. Интенсивность нейтронного поля в области защитного коллиматора (ЗК) 12-детекторного гамма-спектрометра Ромашка-ИЯИЯЭ (верх) и гамма-лучей в нем, когда на вход ЗК падает пучок нейтронов и гамма-лучей из ИРЕН.

Проект TANGRA: Разработка и развитие метода меченых нейтронов для определения элементной структуры вещества и изучения ядерных реакций

Было проведено тестирование многдетекторной установки «Ромашка», состоящей из 24 гексагональных кристаллов NaI(Tl), при помощи гамма-квантов из реакции неупругого рассеяния 14 МэВ-ных нейтронов на углероде $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)^{12}\text{C}$. В качестве источника нейтронов использовался генератор меченых нейтронов ИНГ-27. Нейтроны испускаются из реакции $d + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}(3.5\text{МэВ}) + n(14.1\text{МэВ})$, в которой α -частица и нейтрон разлетаются практически в

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

противоположных направлениях и поэтому, зная направление импульса α -частицы, можно с хорошей точностью определить направление импульса нейтрона. Таким образом, мечение нейтрона можно осуществлять с помощью многоканального α -детектора, который встраивается в портативный нейтронный генератор, обеспечивающий ускорение дейтронов до энергий 80-100 кэВ и фокусирование их на тритиевую мишень. Для регистрации α -частиц использовался 64-пиксельный кремниевый детектор, встроенный в ИНГ-27. Измерение временного интервала между сигналами с α - и γ -детекторов позволяет определить расстояние от точки испускания нейтрона в d-t реакции до точки, в которой произошло взаимодействие меченого нейтрона с ядром исследуемого вещества (скорость нейтрона с энергией 14.1 МэВ равна 5 см/нсек). Таким образом, возможно определение всех трех координат точки, в которой произошло образование характеристического γ -излучения.

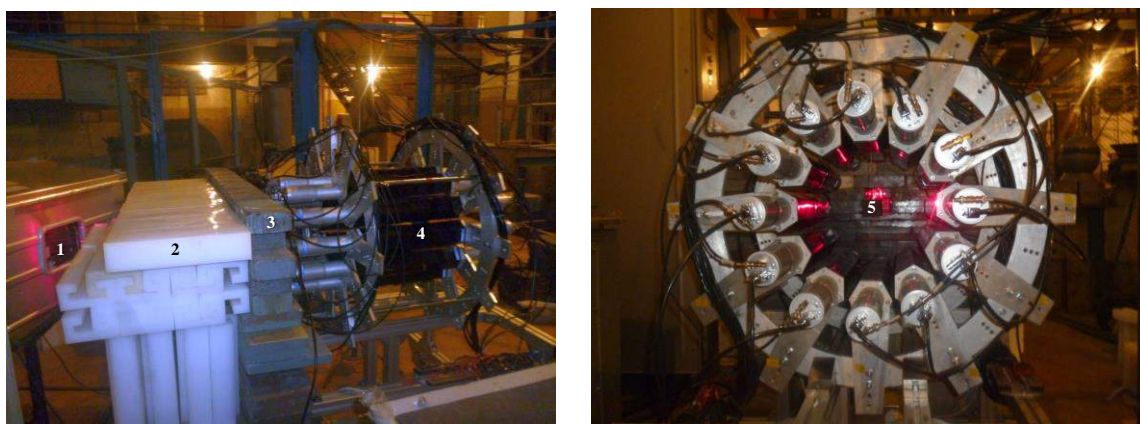


Рис. 29 Постановка эксперимента по исследованию неупругого рассеяния 14 МэВ-ных меченых нейтронов на ядрах ^{12}C : 1 – генератор меченых нейтронов ИНГ-27, 2 – полиэтилен, 3 – свинец, 4 – гамма-детекторная система «Ромашка», 5 – куб из графита.

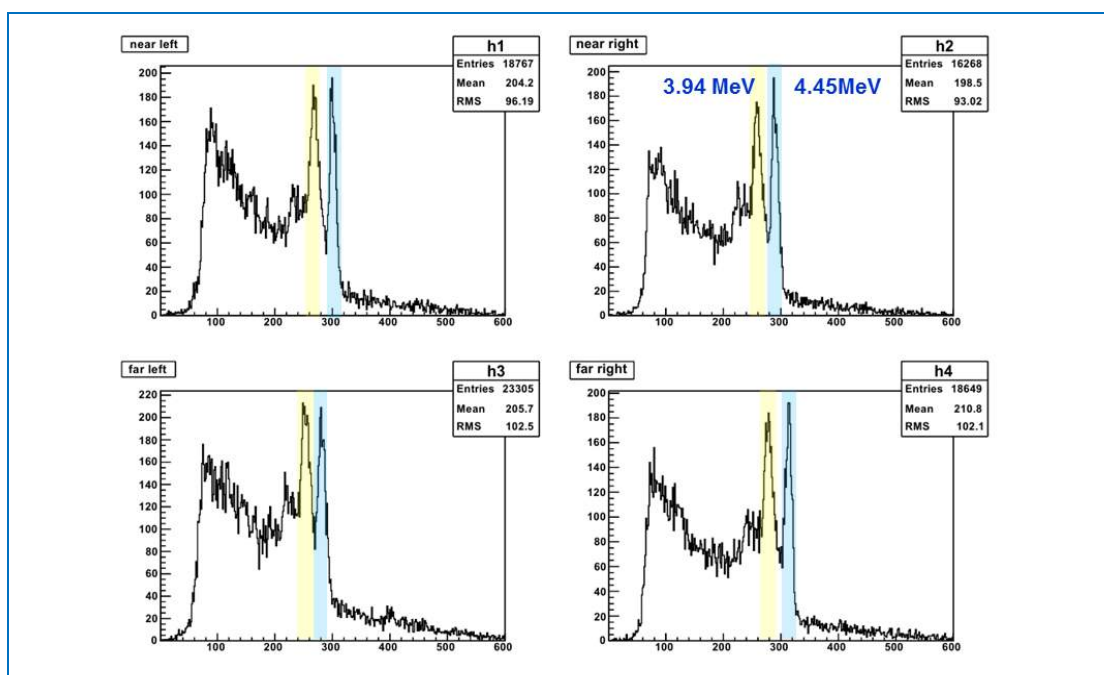


Рис. 30. Амплитудные спектры гамма-лучей с 4-х секций установки «Ромашка».

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В эксперименте были измерены временные и амплитудные спектры в совпадении с центральным кремниевым пикселем, который соответствует нейтронному конусу, направленному на мишень из графита, расположенную в центре детекторной системы «Ромашка» (рис. 29). Детекторы были заэкранированы от прямого попадания нейтронов из генератора с помощью комбинированного коллиматора из полиэтилена и свинца. Эксперимент показал, что полученное временное и амплитудное разрешение достаточно для проведения измерений по методике меченых нейтронов с использованием комбинации ИНГ-27 + «Ромашка». Амплитудные спектры гамма-лучей с 4-х секции NaI(Tl) показаны на рис. 30.

Были проведены экспериментальные исследования, а также моделирование наиболее эффективной защиты для уменьшения потока прямых нейтронов из генератора в гамма или нейтронные детекторы. Был создан экспериментальный стенд, позволяющий измерять эффективность защиты детекторов с использованием различных материалов защиты с толщиной, варьируемой от 0 до 50 см. В качестве детекторов использовались сцинтилляторы на основе NaI(Tl), BGO, кристаллического стильбена и жидкости BC-501. Два последних позволяют разделять нейтроны и гамма-кванты по форме импульса. В качестве материалов защиты проверялись различные комбинации из свинца, железа и борированного полиэтилена. Экспериментально найдены наиболее подходящие для проведения запланированных экспериментов составы комбинированной защиты: 30 см (Fe) + 10 см (BPE) + 10 см (Pb) и 20 см (Fe) + 10 см (BPE) + 20 см (Pb). Более детальные результаты будут опубликованы в «Письмах в ЭЧАЯ» (на русском языке), а сокращённая версия статьи будет направлена в Nucl. Instr. and Methods (на английском языке). На рис. 31 показаны схема эксперимента и один из графиков, показывающий степень ослабления 14 МэВ нейтронов генератора ИНГ-27 комбинированной защитой из слоёв Fe и Pb разных толщин.

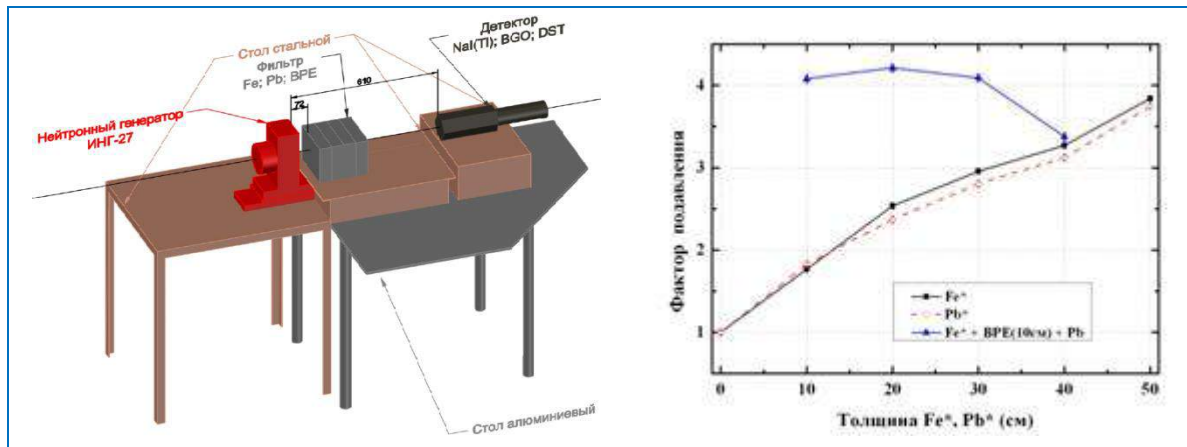


Рис. 31 Слева: схема эксперимента по оптимизации защиты от 14 МэВ-х нейтронов. Справа: фактор ослабления нейтронов (и гамма-лучей) при изменении толщины Fe и Pb, измеренный с помощью гексагонального детектор из NaI(Tl).

Была спроектирована и изготовлена установка для измерения углового распределения вылета гамма-квантов в реакции неупругого рассеяние 14-МэВ-ных нейтронов на углероде (рис. 32). Детекторы гамма-квантов на основе NaI(Tl) располагаются в горизонтальной плоскости под разными углами относительно направления потока нейтронов на мишень. Изготовлен коллиматор, который позволяет максимально защитить детекторы от попадания прямых нейтронов из генератора. Размеры коллиматора минимизированы для уменьшения фона от рассеянных на нем быстрых нейтронов. Планируется проведение экспериментов в конце 2014 – начале 2015 г.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



Рис. 32. Схема установки для измерения углового распределения в испускании гамма-квантов в неупругом рассеянии 14 МэВ-х нейтронов: генератор меченых нейтронов ИНГ-27; комбинированная защита; набор детекторов нейтронов и гамма-квантов.

Работы в рамках подготовки эксперимента по измерению (n, e) рассеяния

В 2014 году продолжалась доводка программ 8-канального временного кодировщика и измерительного модуля установки АУРА на базе персонального компьютера. На нейтронном источнике ИРЕН выполнено многочасовое тестирование работы установки с управлением поворотным столом и набором измеряемых спектров [3]. В ходе дальнейшего тестирования установки АУРА проведены четыре недельных цикла измерений анизотропии рассеяния медленных нейтронов с энергиями в интервале 0.005 – 10 эВ металлическим ванадием, который используется как калибровочный образец в экспериментах по физике конденсированных сред. Каждый цикл измерений состоял из ряда часовых экспозиций с записью измеренных детекторами спектров по окончании каждой из них. Поскольку на поворотном столе установлены четыре детектора, и каждый из них попеременно измеряет рассеяние нейтронов вперед и назад (позиции детекторов по отношению к нейтронному пучку меняются при повороте стола на 180° по завершении каждой экспозиции), то анизотропия рассчитывалась как среднее геометрическое отношения отсчетов всех детекторов «вперед/назад»:

$$R = \sqrt[4]{\frac{(N_s - N_{bg})_{2f} (N_s - N_{bg})_{3f} (N_s - N_{bg})_{1f} (N_s - N_{bg})_{4f}}{(N_s - N_{bg})_{1b} (N_s - N_{bg})_{4b} (N_s - N_{bg})_{2b} (N_s - N_{bg})_{3b}}}$$

где под корнем в числителе – суммарные счета детекторов с вычетом фонов в позиции рассеяния нейтронов вперед, а в знаменателе – суммы детекторных счетов в позиции рассеяния назад. Относительная ошибка отношения вычислялась как

$$\delta R = \sqrt{\sum_1^8 \delta^2(N_s - N_{bg})}, \text{ где } \delta(N_s - N_{bg}) = \frac{\sqrt{(N_s + c^2 N_{bg})}}{N_s - c N_{bg}} \text{ и } c = \frac{M_s}{M_{bg}}.$$

M_s и M_{bg} – счета мониторов с образцом и без образца, соответственно. Результаты представлены на **рис. 33**.

Данные работы [4] хорошо согласуются с отношениями $R(E)$, полученными в экспериментах на реакторе ИБР-2 ранее, и показывают, что в области энергий нейтронов ниже 0.1 эВ рассеяние на ванадии имеет анизотропное поведение, отличное от чисто кинематической анизотропии рассеяния нейтронов на свободном ядре.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Продолжаются расчеты Монте-Карло с целью уточнения кинематической поправки к асимметрии рассеяния тепловых нейтронов криптоном, необходимой для эксперимента по извлечению точного значения длины n, e -рассеяния из угловой анизотропии медленных нейтронов, рассеиваемых инертным газом при нормальном давлении.

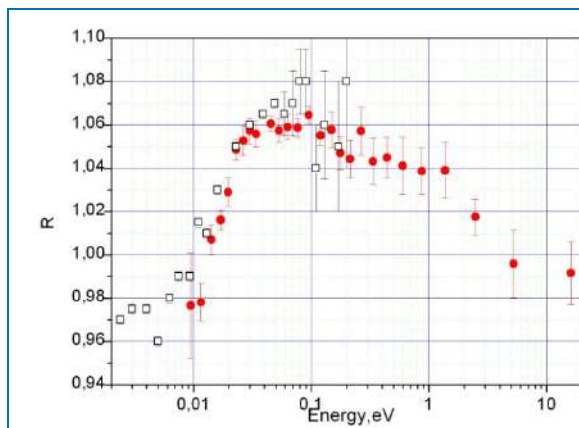


Рис. 33. Усредненные отношения $R(E)$ из работы [3] (точки) и данные, полученные в 2004 году на пучке 116 реактора ИБР-2 (полые квадраты)

Измерение параметров поляризованного пучка нейтронов на установке КОЛХИДА

В 2014 году на канале №1 ИЯУ ИБР-2, на спектрометре поляризованных нейтронов, после неоднократной переборки внутриканальных коллиматоров, проводились работы по определению параметров поляризованного пучка нейтронов. Параметры были определены для нейтронов энергии 0.062 эВ – 2.3 эВ. Для определения параметров поляризованного пучка нейтронов был использован метод двух преобразователей. Получен пучок поляризованных нейтронов с поляризацией $P_n = 0.98$. Схема установки поляризованных нейтронов показана на рис. 34.

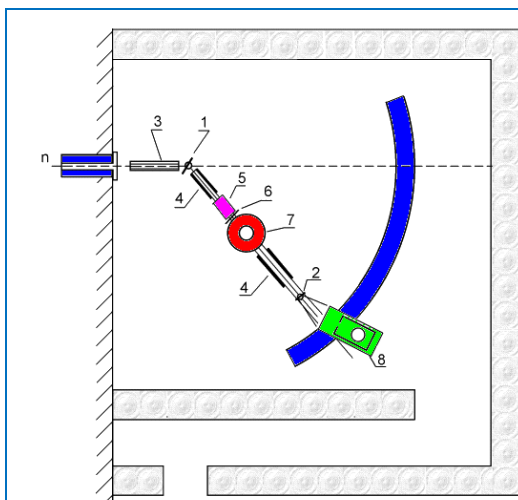


Рис. 34. 1 – первичный коллиматор; 2 – коллиматор Соллера; 3 – кристалл поляризатора; 4 – ведущие магнитные поля; 5 – флиппер Мезея; 6 – шим; 7 – криостат; 8 – кристалл анализатора; 9 – детектор.

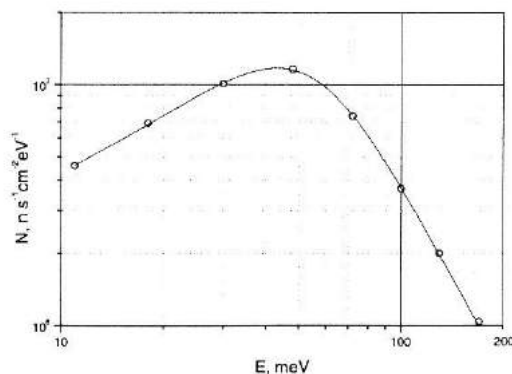


Рис. 35. Зависимость плотности потока нейтронов от энергии нейтронов, падающих на поляризатор.

Формирование спектра нейтронов осуществляется в замедлителе реактора. Нейтроны, выходящие из замедлителя, проходят в биологической защите через канал, в которой помещен

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

первичный коллиматор 1. В экспериментальном зале перед поляризатором помещен соллеровский коллиматор 2. Для поляризации и анализа поляризации нейтронов используются монокристаллы Co-Fe.

Интенсивность и спектр первичного пучка нейтронов, падающих на поляризатор, были измерены с помощью камеры деления RM-70. Камера была установлена на пролетном расстоянии 13.5 м. В результате были получены данные об интенсивности и спектре нейтронов в интервале энергии от 10 до 200 мэВ (**рис. 35**). Поток нейтронов в указанном интервале энергии составлял $1.0 \cdot 10^6$ н/см²с.

Для монокристалла Co-Fe в геометрии Лауэ проводилось измерение дифракции нейтронов для различных углов θ падения нейтронов на плоскость (200) в диапазоне от 3 до 19 град (**рис. 36, 37**). В таблице приведены значения углов θ , для которых проведены измерения, и соответствующие им длины волн и энергии нейтронов. В результате сканирования угла θ находился максимум отраженного пучка. Скорость счета n_1 , интенсивность I_1 , учитывающая эффективность детектора и площадь отраженного пучка ($s \cong 4\text{см}^2$), приведены в **Таблице 1**.

Таблица 1. Параметры пучка поляризованных нейтронов

Угол θ , град.	19	12	6	4	3
Длина волны λ , Å	1,15	0,74	0,37	0,25	0,19
Энергия E_n , эВ	0,062	0,15	0,6	1,3	2,3
Скорость счета детектора после поляризатора n_1 , с ⁻¹	800	270	65	33	22
Интен/ть поляризованного пучка I_1 , н/см ² с	430	200	80	60	50
Скорость счета детектора после анализа n_2 , с ⁻¹	70	23	3,1	0,6	0,2

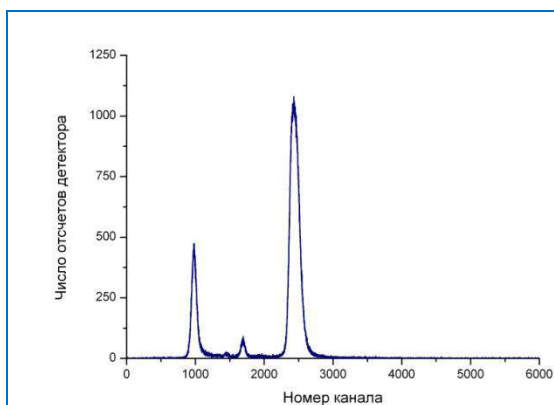


Рис. 36. Времяпролетный спектр нейтронов после поляризатора, полученный за 3 мин измерений. $\theta = 19^\circ$

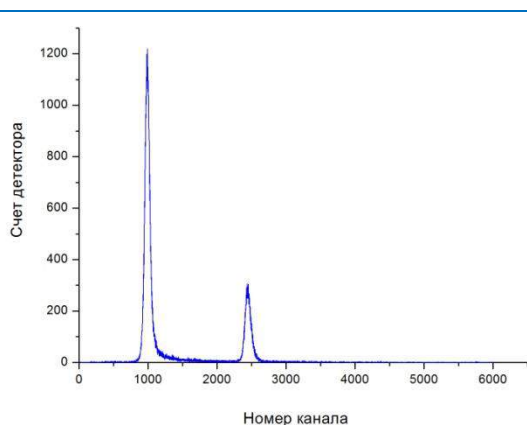


Рис. 37. Времяпролетный спектр нейтронов после анализатора, полученный за 10 мин измерений. $\theta = 19^\circ$

Наблюдение перехода Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу

В рамках подготовки экспериментов по исследованию слабого нейтрон-ядерного взаимодействия в дифракции нейтронов, на 10-ом канале ИЯУ ИБР-2 проводятся эксперименты по изучению дифракции нейтронов на монокристалле бромида калия. Монокристалл бромида калия был выбран потому что в р-волновом резонансе брома-81 обнаружен довольно большой Р-нечетный эффект в пропускании. В частности было обнаружено интересное явление, переход Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу.

Падающий пучок нейтронов имел поперечное сечение 4x40 мм и расходимость 4×10^{-3} радиана. Перед монокристаллом устанавливалась пластина из кадмия или из борированного полиэтилена, чтобы нейтроны не попадали на боковую поверхность монокристалла. За монокристаллом так же устанавливалась такая же пластина, которая закрывала боковую поверхность монокристалла в геометрии дифракции нейтронов по Лауэ, или закрывала торец монокристалла, при наблюдении перехода Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу. На **рис. 38** представлены времяпролетные спектры двух геометрий.

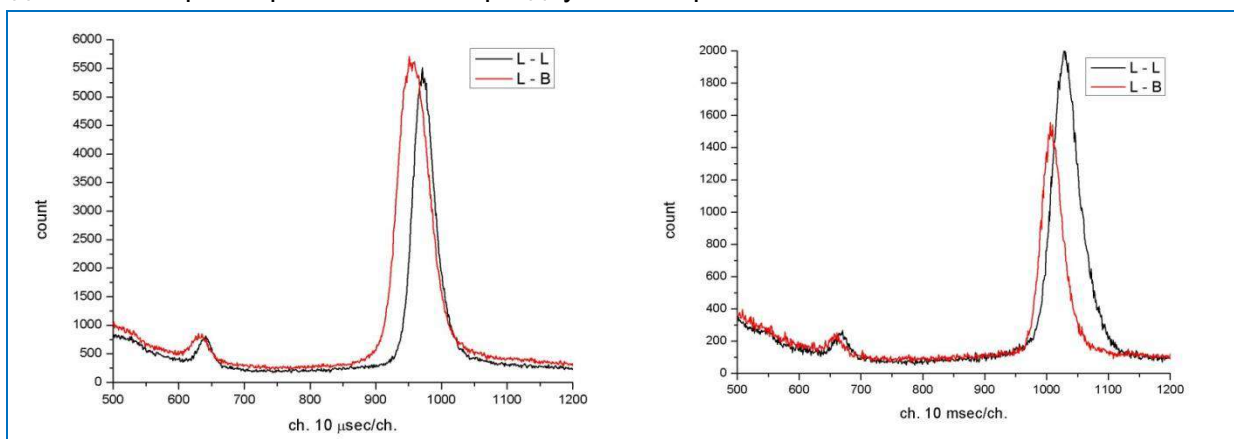


Рис. 38. Черная линия – дифракция нейтронов в геометрии Лауэ, красная линия – переход Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу.

Рис. 39. Монокристалл повернут на 180° вокруг вектора рассеяния. Черная линия – дифракция нейтронов в геометрии Лауэ, красная линия – переход Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу.

Самое простое объяснение наблюдаемого эффекта – двойниковость монокристалла. Чтобы проверить эту гипотезу, монокристалл был повернут на 180° градусов вокруг вектора рассеяния.

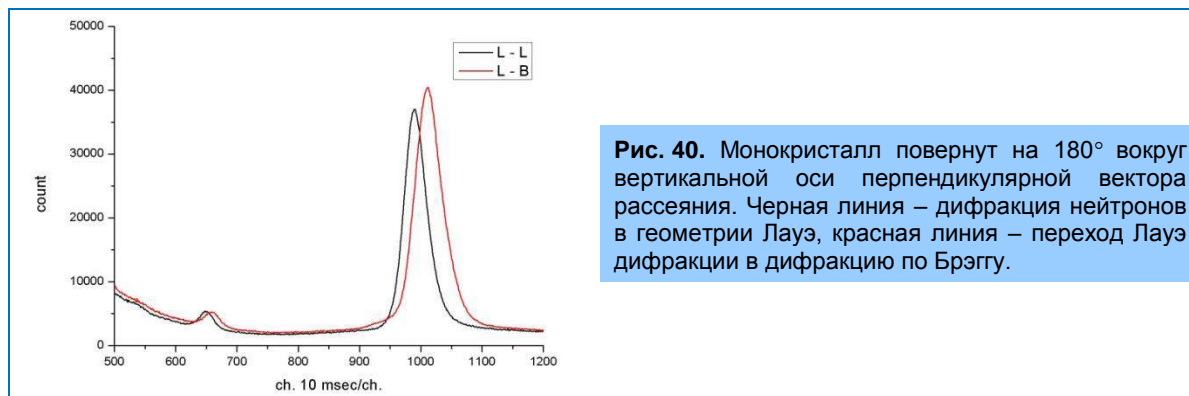


Рис. 40. Монокристалл повернут на 180° вокруг вертикальной оси перпендикулярной вектора рассеяния. Черная линия – дифракция нейтронов в геометрии Лауэ, красная линия – переход Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На **рис. 39** представлены времяпролетные спектры эти измерений. Видно, что характер спектров не изменился. В принципе такая картина может наблюдаться либо в деформированном монокристалле, либо за счет слабого нейтрон-ядерного взаимодействия. Если монокристалл деформирован, то повернув монокристалл на 180 градусов вокруг оси перпендикулярной вектору рассеяния, мы должны наблюдать противоположное расположение рефлексов. Результаты этих измерений представлены на **рис. 40**. Они подтверждают гипотезу о деформированном монокристалле. Подобная картина наблюдается на трех монокристаллах бромида калия изготовленных в разное время.

Развитие методов исследования физики деления

Регистрация тройного и четверного спонтанного деления ^{252}Cf с помощью ΔE - E телескопов на основе кремниевого пиксельного детектора TimePix

В 2014 году в ЛНФ совместно с ТУ Прага проводились измерения тройного и четверного спонтанного деления ^{252}Cf с использованием детекторов TimePix. Для идентификации тройных частиц использовался ΔE - E метод, позволяющий разделять легкие заряженные частицы по заряду. В качестве ΔE -детектора использовался тонкий кремниевый детектор (12 мкм), в качестве E -детектора – пиксельный детектор TimePix с толщиной сенсорного слоя 300 мкм.

Схема экспериментальной установки показана на **рис. 41**. В вакуумной камере располагается спонтанный источник деления ^{252}Cf и две сборки из ΔE - E детекторов. Между источником и детекторами помещалась алюминиевая фольга толщиной 31 мкм, которая обеспечивала полное поглощение осколков деления и альфа-частиц из спонтанного альфа-распада калифорния (6.2 МэВ). Таким образом, детекторы регистрировали только длиннопробежные легкие заряженные частицы из тройного деления.

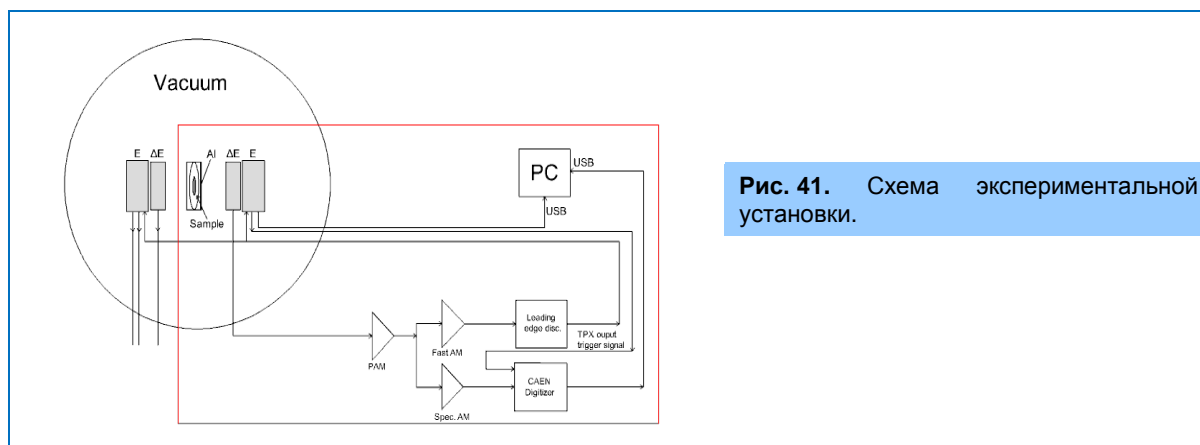


Рис. 41. Схема экспериментальной установки.

На **рис. 42a** показаны двухмерные ΔE - E кривые разделения легких заряженных частиц. В эксперименте удалось зарегистрировать частицы от водорода до бериллия. Хорошо видно наиболее интенсивную область альфа-частиц. Для каждого типа частиц были построены энергетические спектры. Предварительно были сделаны поправки на потери энергии в алюминиевой фольге и в ΔE детекторе, рассчитанные с помощью программы Srim. **Рис. 42b** демонстрирует измеренное энергетическое распределение альфа-частиц в тройном делении ^{252}Cf в сравнении с известными литературными данными. **Рис. 43(a,b,c)** демонстрируют энергетические спектры гелия, лития и бериллия. Для каждого из спектров была проведена подгонка кривой Гаусса и были определены выходы легких заряженных частиц.

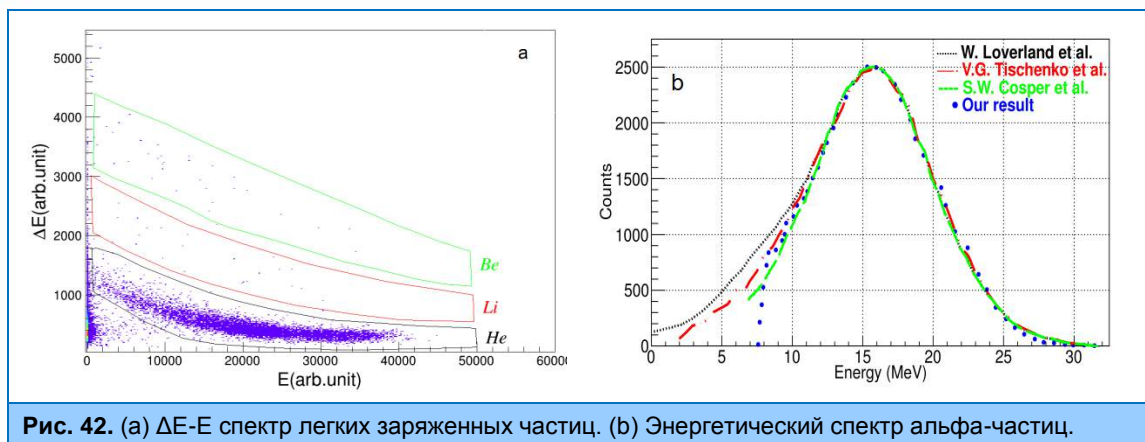


Рис. 42. (а) ΔE - E спектр легких заряженных частиц. (б) Энергетический спектр альфа-частиц.

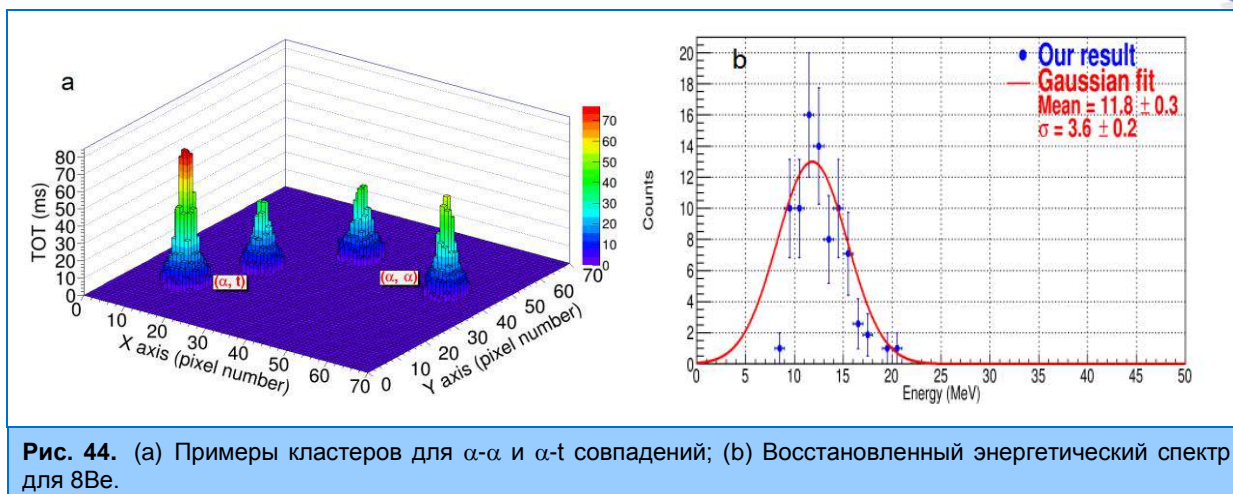


Рис. 43. Энергетические спектры легких заряженных частиц: (а) He, (b) Li, (с) Be.

В эксперименте также велся поиск еще более редкой моды деления, чем тройное деление – четверного деления – когда наряду с двумя основными осколками испускаются две легкие заряженные частицы. Вероятность такого процесса чрезвычайно мала и достигает 10^{-6} – 10^{-7} от обычного двойного деления. Как правило, в четверном делении образуются две альфа-частицы, которые, в свою очередь, могут испускаться либо независимо (истинное четверное деление), либо в результате распада нестабильного ядра ${}^8\text{Be}$, испущенного в качестве третьей частицы (псевдо-четверное деление).

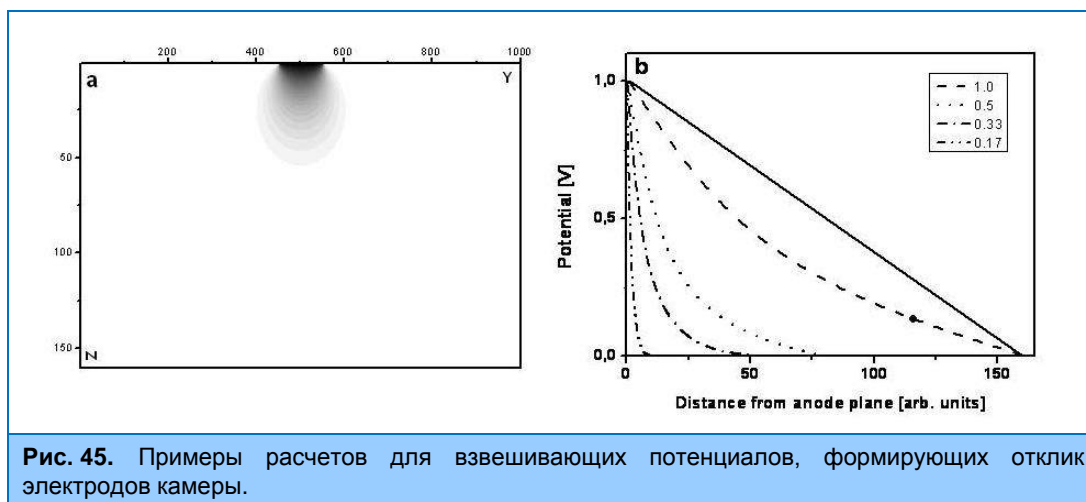
Были наблюдаены 72 события, в которых две частицы были зарегистрированы одновременно в одном или двух телескопах. Из них в 63 событиях наблюдалось симметричное распределение энергий между двумя частицами и в 9 событиях – асимметричное. Первая группа событий была приписана к α - α четверному деления, вторая группа – к α -t (рис. 44а). События, в которых две α -частицы испускались под очень маленьким углом друг к другу, были приписаны псевдо-четверному делению – распаду нестабильного короткоживущего ${}^8\text{Be}$. Из измеренных энергий альфа-частиц был восстановлен энергетический спектр испускаемых частиц ${}^8\text{Be}$, который представлен на рис. 44б. Также были определены вероятности истинного и псевдочетверного деления, которые находятся в согласии с известными экспериментальными и теоретическими оценками.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



Позиционно-чувствительная камера для исследования мгновенных нейтронов деления

В связи с разработкой позиционно чувствительной двойной ионизационной камеры был выполнен ряд расчетных работ. Проведены расчеты электростатических полей и моделирование отклика детектора при регистрации осколков деления (**рис. 45**). Были выведены формулы для вычисления координат осколков в трехмерной декартовой системе координат. В результате численного моделирования детектора было показано, что благодаря полосковой структуре анодов камеры, появилась возможность отказа от сетки Фриша. Была разработана архитектура системы сбора данных с детектора с применением 64-канальной системы синхронизации и оцифровки импульсов детектора. Было показано, что разработанный детектор может быть использован для создания изображений объектов в нейтронной радиографии с импульсным источником нейтронов.



Исследования реакций (n,p) , (n,α)

Продолжены экспериментальные и теоретические исследования реакций (нейтрон, заряженная частица) на быстрых нейтронах. Измерения проводятся на ускорителях Ван-де-Граафа ЭГ-5 в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ и ЭГ-4.5 Института физики тяжелых ионов Пекинского университета. Данные о реакциях с вылетом заряженных частиц, вызванных

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

быстрыми нейтронами, представляют значительный интерес для изучения механизмов ядерных реакций, структуры атомных ядер, выбора конструкционных материалов и проведения расчетов при создании новых установок для ядерной энергетики.

Проведены измерения реакций $^{25}\text{Mg}(n,\alpha)^{22}\text{Ne}$ и $^{54,56,\text{nat}}\text{Fe}(n,\alpha)$. Завершен анализ данных измерений реакций $^{57}\text{Fe}(n,\alpha)^{54}\text{Cr}$ и $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ при $E_n \sim 4.0 - 6.5$ МэВ, результаты опубликованы. Завершена обработка данных из измерений реакции $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)^{37}\text{Ar}$, подготовлена публикация. Для этого ядра измерены дифференциальные сечения реакций $^{40}\text{Ca}(n,\alpha_0)$, $(n,\alpha_{1,2})$, and $(n,\alpha_{3,4,5})$ при энергии нейтронов 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 и 6.5 МэВ. Экспериментальные значения сечений сравнены с расчетами с использованием кода TALYS-1.6 (рис. 46, 47). Выполнен систематический анализ наших экспериментальных сечений реакции (n,α) в энергетическом диапазоне от 4 до 6 МэВ. Зависимость этих сечений от параметра $(N-Z+0.5)/A$ в указанном энергетическом диапазоне была наблюдаема и объяснена в рамках статистической модели.

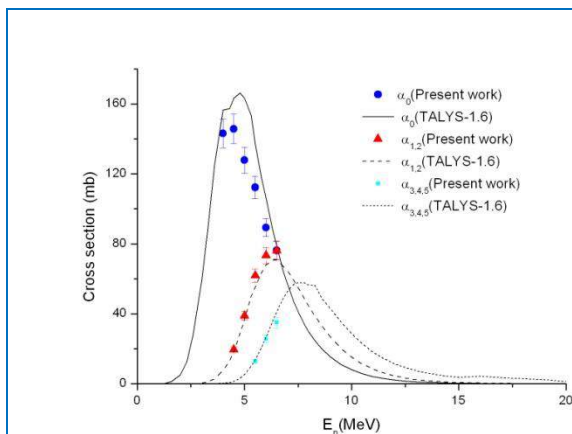


Рис. 46. Измеренные парциальные сечения реакций $^{40}\text{Ca}(n,\alpha_0)$, $(n,\alpha_{1,2})$ и $(n,\alpha_{3,4,5})$ в сравнении с расчетами, выполненными по программам TALYS-1.6.

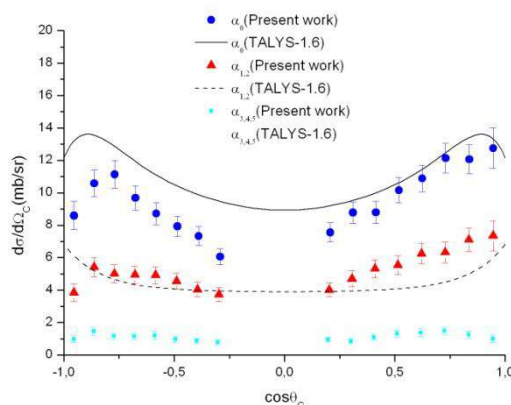


Рис. 47. Парциальные дифференциальные сечения реакции $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)^{37}\text{Ar}$ в СЦМ при $E_n = 5.5$ МэВ.

Исследования структуры ядра

Разработан и полностью протестирован принципиально новый вариант практической модели каскадного распада произвольного уровня ядра любого типа с энергией возбуждения, равной энергии связи нуклона и выше. Полное отсутствие пригодных для практических целей теоретических моделей свойств возбужденных уровней со структурой, определяемой несколькими квазичастицами и фонами, обусловило необходимость включения в такую модель чисто феноменологических представлений о плотности уровней вибрационного типа и парциальных ширин их распада. В частности, для задания формы энергетической зависимости суммарной плотности квазичастичных и фонных уровней при любых энергиях возбуждения ядра. Варьирование этих зависимостей для различных функций энергии возбуждения и анализ аппроксимированных значений параметров модифицируемых феноменологических представлений показал, что изменение плотности уровней вибрационного типа (точно воспроизводящих значения экспериментальных интенсивностей двухквантовых каскадов) определяется единственным и общим для ядер любой массы и формы параметром - средним значением энергии спаривания нуклона $\Delta = 12.8/\sqrt{A}$.

Число разорванных куперовских пар нуклонов ниже энергии спаривания и пороги их разрыва при использованных вариантах модификации феноменологической части модели

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

вполне соответствует полученным ранее значениям. При этом дипольные электрические и магнитные парциальных ширинах гамма-распада уровней обеспечивать наличие 1-2 максимума соответствующих силовых функций. То есть такие параметры возбужденного ядра, как плотность уровней и вероятность их распада с методически радикально лучшей точностью описываются моделями, учитывающими наличие в ядре обычной и сверхтекучих фаз и их взаимодействие. Соответственно, статистическая модель ядра (существующая более полувека), не соответствует современному уровню экспериментального изучения ядра.

Новые экспериментальные данные по интенсивностям двухквантовых каскадов в ядрах ^{52}V и ^{64}Cu , полученные на реакторе Далата (Вьетнам), проанализированы в рамках этой модели гамма-распада нейтронных резонансов (рис. 48-50). Показано, что эти новые данные полностью воспроизводятся в рамках модели, учитывающей наличие в возбужденном ядре сверхтекучей формы ядерной материи. И не укладываются в рамки существующих представлений о ядре, как о чисто фермионной системе.

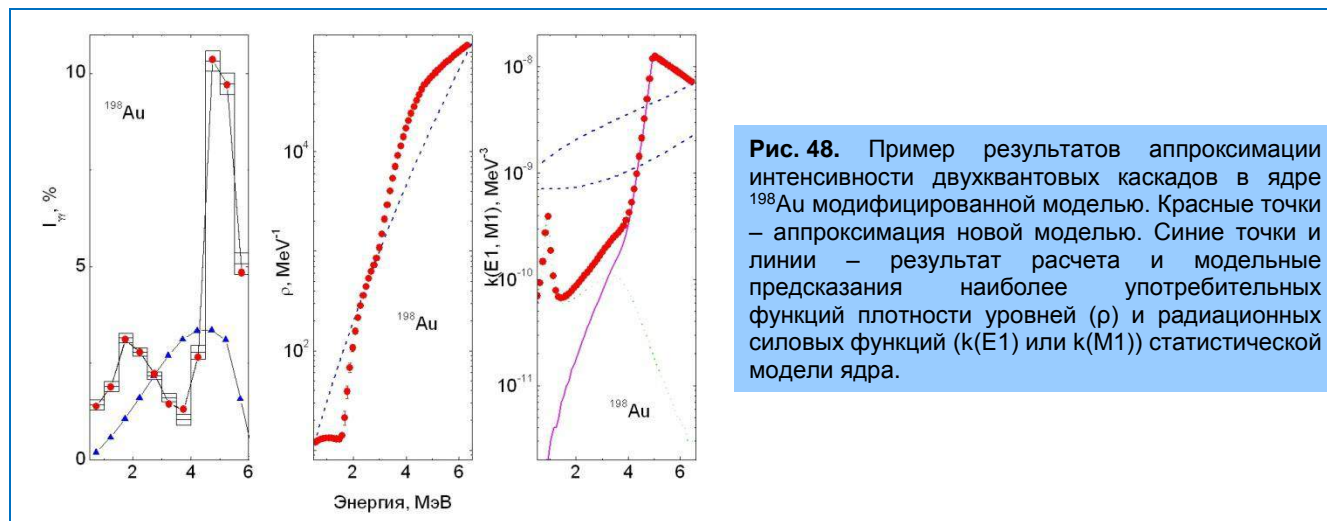


Рис. 48. Пример результатов аппроксимации интенсивности двухквантовых каскадов в ядре ^{198}Au модифицированной моделью. Красные точки – аппроксимация новой моделью. Синие точки и линии – результат расчета и модельные предсказания наиболее употребительных функций плотности уровней (ρ) и радиационных силовых функций ($k(E1)$ или $k(M1)$) статистической модели ядра.

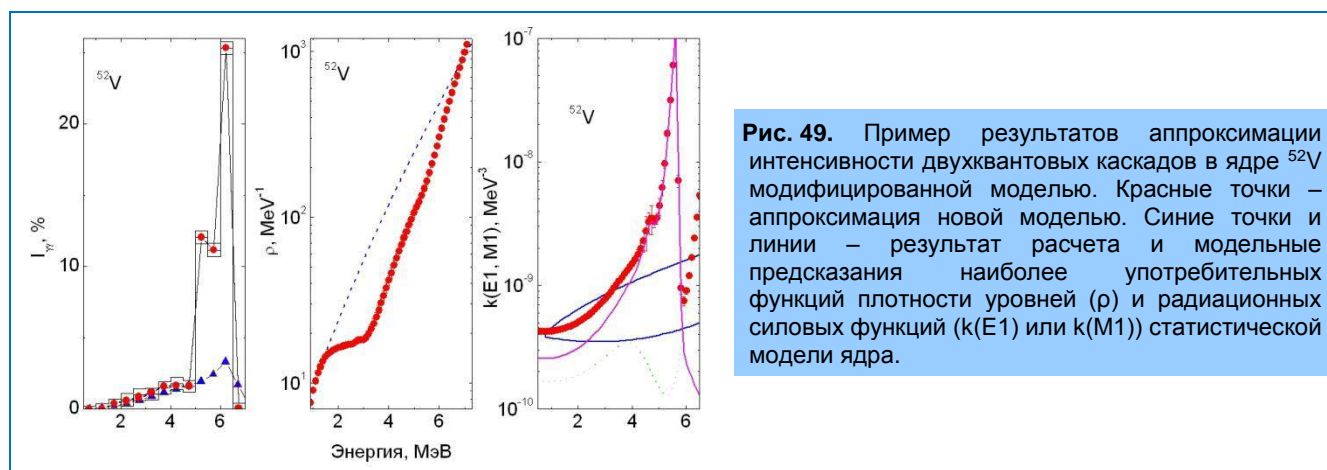


Рис. 49. Пример результатов аппроксимации интенсивности двухквантовых каскадов в ядре ^{52}V модифицированной моделью. Красные точки – аппроксимация новой моделью. Синие точки и линии – результат расчета и модельные предсказания наиболее употребительных функций плотности уровней (ρ) и радиационных силовых функций ($k(E1)$ или $k(M1)$) статистической модели ядра.

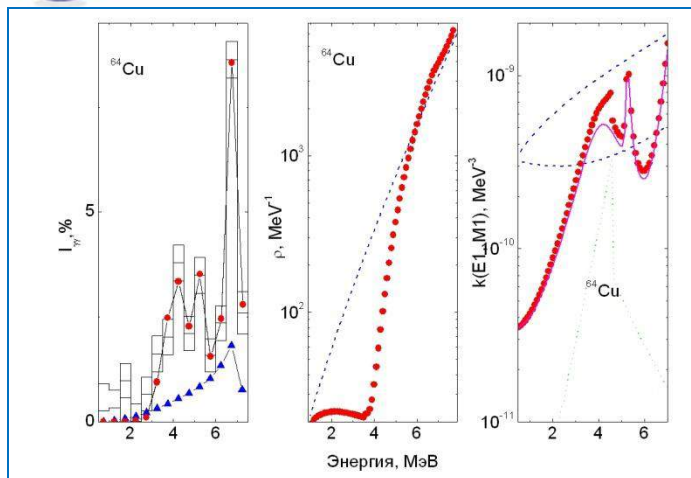


Рис. 50. Пример результатов аппроксимации интенсивности двухквантовых каскадов в ядре ^{64}Cu модифицированной моделью. Красные точки – аппроксимация новой моделью. Синие точки и линии – результат расчета и модельные предсказания наиболее употребительных функций плотности уровней (ρ) и радиационных силовых функций ($k(E1)$ или $k(M1)$) статистической модели ядра.

Расчет гелиевого источника УХН на выведенном пучке тепловых нейтронов

В настоящее время прогресс в области физики ультрахолодных нейтронов (УХН), как инструмента ядерно-физических исследований, в значительной степени ограничен интенсивностью существующих источников УХН. Поэтому во многих научных центрах мира разрабатываются проекты по созданию новых усовершенствованных источников, позволяющих увеличить плотности и потоки доступных для экспериментов УХН на 1-2 порядка.

Гелиевый источник УХН был впервые предложен еще 1975 г. в работе [6]. Принцип работы такого источника основан на том, что при рассеянии нейтрона в жидком ^4He , в гелии может возбудиться фонon с энергией 1.02 мэВ. Если при этом энергия нейтрона немного превышает 1.02 мэВ, то он превратится в ультрахолодный. УХН могут образовываться таким образом из падающих нейтронов с энергией, лежащей в очень узком диапазоне, т.к. энергия УХН ограничена сверху ~ 300 нэВ. Возможно также одновременное возбуждение двух и более фононов в гелии. Для широкого спектра падающих холодных нейтронов оба процесса будут давать сопоставимое число УХН.

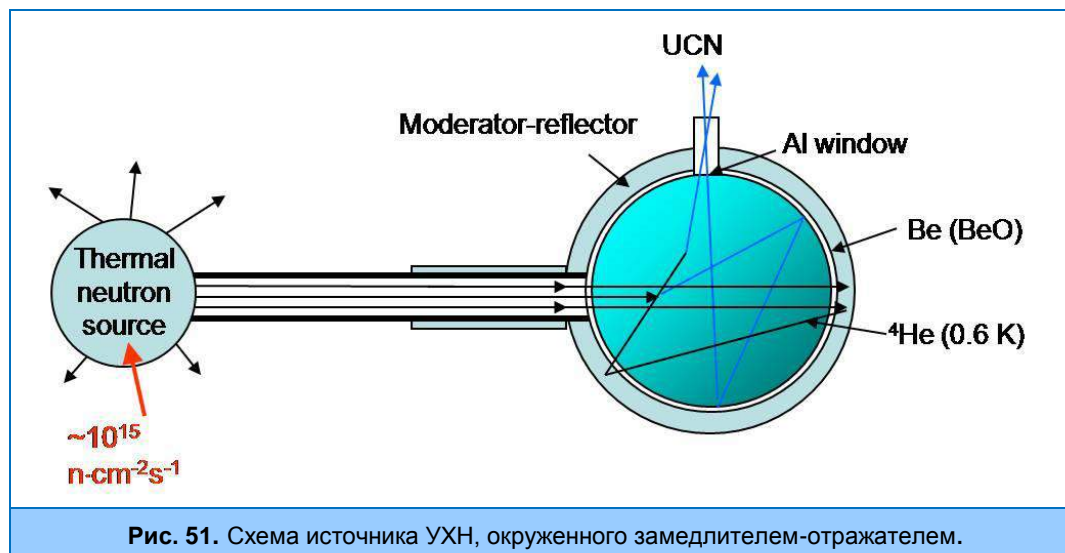
В той же работе было показано, что образовавшиеся УХН могут достаточно долго жить в сверхтекучем гелии, если его температура $\sim 1^\circ$ К или ниже. Это обстоятельство позволяет накапливать УХН в источнике такого типа до очень высокой плотности.

Если источник УХН, содержащий жидкий гелий при температуре ниже 1 К, установленный в пучок холодных нейтронов, окружить отражателем холодных нейтронов, из которых будут производиться УХН (т.е. сделать ловушку для холодных нейтронов), то можно заметно повысить поток холодных нейтронов в источнике, и соответственно темп генерации УХН. Если в качестве отражателя использовать вещество, которое одновременно является и хорошим замедлителем тепловых нейтронов (и которое фактически будет являться источником холодных нейтронов), то можно, во-первых, значительно поднять поток холодных нейтронов в источнике, а следовательно и его производительность, и, во-вторых, для производства УХН использовать “дешевые” тепловые нейтроны вместо “дорогих” холодных [7]. Так, максимальная плотность потока в пучках холодных нейтронов на реакторе ILL достигает $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, а максимальная плотность потока теплового пучка на том же реакторе, может достигать $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

На рис. 51 схематично изображен такой источник УХН, окруженный замедлителем-отражателем, который является источником холодных нейтронов. Чем выше альbedo отражателя, тем выше плотность потока нейтронов в источнике (в пределе, при альbedo

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

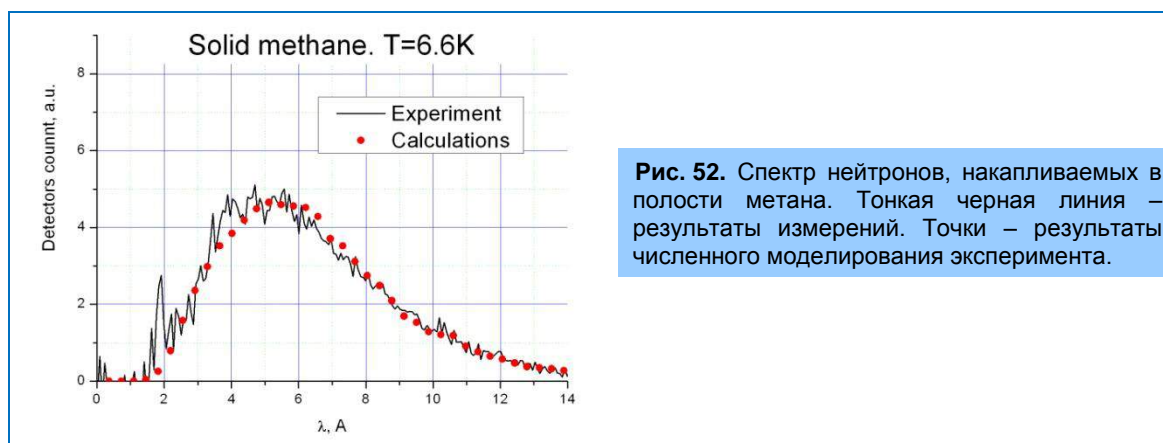
отражателя строго равно 1 плотность потока нейтронов, накопленных в полости отражателя, будет строго равна плотности потока в источнике – для реакторов ПИК и ILL $\sim 10^{15} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).



Вещество с максимальным альбедо холодных нейтронов, которое нам удалось найти – твердый метан в фазе II, охлажденный до температуры $\sim 4\text{ K}$. Твердый метан одновременно является и одним из лучших холодных замедлителей нейтронов.

Если источник УХН расположить на конце нейтронновода диаметром 20 см непосредственно за биологической защитой реактора, то плотность потока тепловых нейтронов на входе в источник на реакторе ILL составит $1.2 \cdot 10^{11} \text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$, а на реакторе ПИК – $3.6 \cdot 10^{11} \text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$. Соответствующие интегральные потоки: $3.8 \cdot 10^{13} \text{ n/s}$ и $1.14 \cdot 10^{14} \text{ n/s}$.

Чтобы определить, как работает замедлитель-отражатель из твердого метана, в прошлом году были произведены измерения количества и спектра нейтронов, накапливаемых в полости твердого метана, если в нее запустить монохроматические нейтрона с длиной волны 1.8 \AA . В этом году было проведено компьютерное моделирование эксперимента при помощи программы MCNP 4с со специальным ядром для твердого метана. Результаты измерений и расчетов полностью совпали (рис. 52). Это позволило нам рассчитать параметры предлагаемого источника УХН.



1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты этих расчетов таковы: достигаемая объемная плотность УХН в источнике диаметром 40 см, установленном на реакторе ILL, составляет $4.4 \cdot 10^4$ UCN/cm³ при темпе производства УХН: $5 \cdot 10^6$ UCN/s. Тот же источник, установленный на реакторе ПИК, даст, соответственно: $1.3 \cdot 10^5$ UCN/cm³ и $1.5 \cdot 10^7$ UCN/s. При этом объемная плотность УХН в источнике будет на 3 порядка больше, чем достигнута в существующих источниках УХН.

Сотрудничество в коллаборации GRANIT в ILL (Франция).

ЛНФ ОИЯИ совместно с ФИАН и Университетом Верджинии (США) являются коллективным членом коллаборации GRANIT. Цель коллаборации состоит в развитии и строительстве гравитационного нейтронного спектрометра второго поколения с ультравысоким энергетическим разрешением – GRANIT (ГРавитационные Нейтронные Индуцированные Переходы).

В рамках работ по развитию спектрометра, в текущем году были проведены измерения фактора потерь в изготавливаемом сапфировом нейтроноводе. Полученные результаты измерений вероятности потерь в нейтроноводе составили $3 \cdot 10^{-4}$ на удар. При этом отсутствие спектральной зависимости потерь указывает на отсутствие нейтронных щелей в нейтроноводе. При его обезгаживании или охлаждении до азотной температуры вероятность потерь упадет в несколько раз. Это позволит в следующем году перейти на новую нейтроноводную систему со значительно улучшенными характеристиками.

Продолжение эксперимента по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона

Продолжена работа по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона с гравитационным спектрометром EpiGraph построенным в 2010 г. и существенно усовершенствованным в 2011 году. Работа прибора основана на совместном использовании Нейтронных Интерферометров Фабри-Перо и прерывателя-модулятора нейтронного потока. Изменение энергии нейтрона mgH при падении в гравитационном поле сравнивается в нем с энергий, передаваемой нейтрону при дифракции в -1 порядок на движущейся дифракционной решетке.

Особенностью прибора является возможность использования оригинального метода времени пролета, основанного на периодической модуляции нейтронного потока и измерении фазы осцилляции скорости счета детектора. Регистрация УХН ведется детектором, синхронизованным с модулятором. Высокая степень монохроматизации пучка ($\Delta v/v < 2\%$) позволяет работать с временами пролета, многократно превышающими период модуляции, что обеспечивает уникальное энергетическое разрешение прибора.

В истекшем году:

1. Проведен анализ результатов, полученных в предыдущем цикле измерений.
2. Проанализированы возможные причины нескольких систематических эффектов, обнаруженных ранее.
3. Создан новый программно-измерительный комплекс для управления элементами прибора, сбора и первичного анализа полученных данных. С его помощью производится перестройка и стабилизация частоты модулятора-прерывателя и вращающейся решетки, а также перемещение по высоте анализирующего фильтра. Для первичного анализа и сбора данных используется автономное устройство E 20-10 с четырехканальным АЦП с частотой опроса 10МГц и буферизацией данных. Обмен с PC производится по USB порту. В связи со спецификой источника УХН PF2, на котором ведутся эксперименты, работа программы синхронизируется с устройством, распределяющим пучки УХН от источника.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4. Для лучшего понимания особенностей работы прибора и выявления систематических погрешностей начата работа по МС моделированию спектрометра с использованием пакета Geant4-UCN
5. В начавшемся 3 ноября с.г. цикле измерений на пучке УХН института Лауэ-Ланжевена в Гренобле найдены причины по крайней мере трех источников систематических погрешностей, проявившихся в измерениях 2012г.

Фурье-спектрометрия УХН по времени пролета и экспериментальное исследование спектров УХН при дифракции на движущейся решетке.

При анализе результатов экспериментальных данных, полученных в 2012 году было понято, что используемое нами явление квантования энергии нейтронов при дифракции на движущейся решетке недостаточно хорошо изучено как теоретически, так и экспериментально. В истекшем году нами были предприняты значительные усилия для восполнения этого пробела. Для экспериментального изучения этого явления было сделано следующее:

1. Проанализированы имеющиеся экспериментальные данные тестовых экспериментов по фурье-спектроскопии УХН.
2. Проведены модельные МС расчеты симулирующие набор и анализ фурье-спектров по времени пролета.
3. Спроектирован и изготовлен новый модулятор спектрометра (**рис. 53**) с соответствующим статором.

В начавшемся 3 ноября с.г. цикле измерений на пучке УХН института Лауэ-Ланжевена в Гренобле методика Фурье-спектрометрии по времени пролета успешно опробована и получены временные спектры УХН, сформированные тремя разными типами интерференционных фильтров.



Рис. 53. Многощелевой Фурье прерыватель спектрометра Epigraph.

Совместно с В. А. Бушуевым (МГУ им. Ломоносова) развита многоволновая динамическая теория дифракции нейтронов на движущейся фазовой решетке в рамках приближения медленно меняющихся амплитуд. Проанализировано влияние скорости движения решетки, ее периода и высоты штрихов на дискретный энергетический спектр и интенсивности дифракционных пиков различных порядков. В развитие предшествующих работ А. И. Франка, в которых была предсказана возможность отрицательного времени задержки при отражении нейтронов от многослойных структур совместно с В. А. Бушуевым проведен анализ понятия группового времени задержки (ГВЗ) при отражении электромагнитных волн и нейтронов от резонансных и нерезонансных сред и слоистых структур. Рассмотрена связь ГВЗ с временной задержкой импульсов и пространственным продольным сдвигом пучков. Обсуждены возникающие при этом мнимые парадоксы и влияние ГВЗ на форму отраженных

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

импульсов и пучков. Начата работа по расчетам квантовых эффектов при пропускании нейтронов через кварцевый вибратор, колеблющийся с высокой частотой. В рамках модели эффективного потенциала этот объект представляет собой область потенциала, граница и величина которого периодически зависят от времени. Трудность таких квантовых расчетов обусловлена тем обстоятельством, что время распространения нейтронов через вещество (10^{-4} с) много больше периода осцилляции (5×10^{-7} с) (рис. 54).

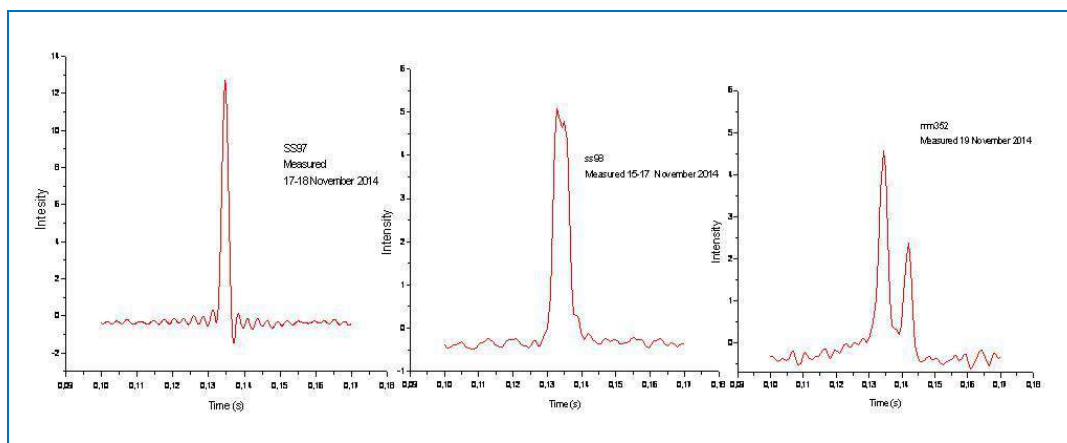


Рис. 54. Спектры времени пролета, сформированные интерференционными филитрами и полученные методом Фурье-спектроскопии. Слева направо: пятислойный фильтр с узкой линией пропускания, шириной порядка 4 нэВ, девятислойный фильтр с широкой линией пропускания порядка 10 нэВ и пятислойный фильтр со связью между резонаторами, и расщепленной линией пропускания.

Методические и прикладные исследования

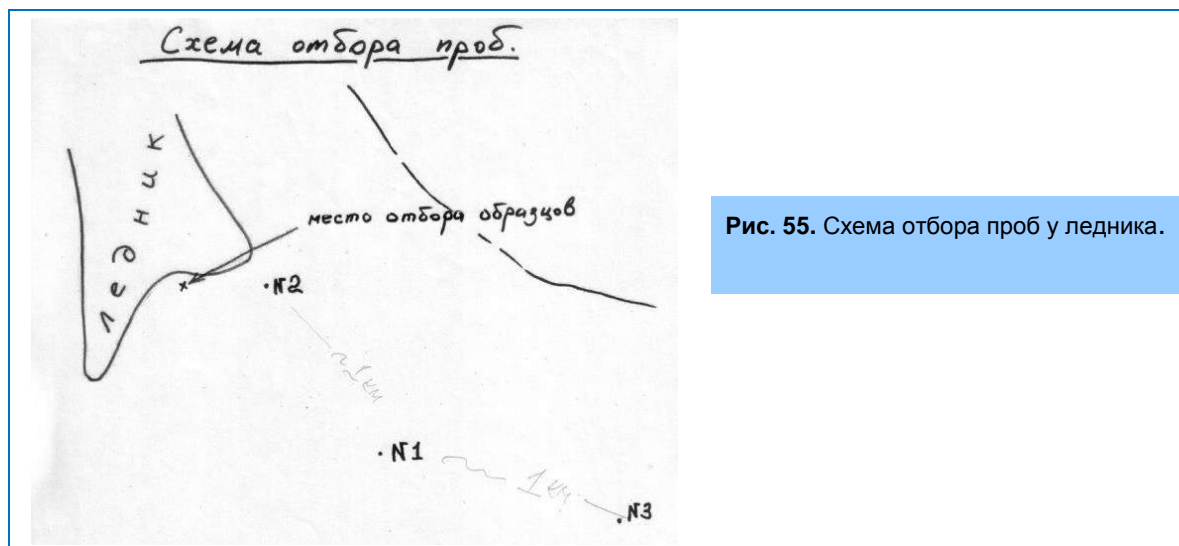
Аналитические и методические исследования на установке ИРЕН

На установке ИРЕН изучалось воздействие нейтронов и гамма-квантов на пластиковые сцинтилляторы, используемые в эксперименте CMS в ЦЕРНе. Опыт трёхлетней работы адронного калориметра показал неожиданно большое уменьшение светового выхода пластиковых детекторов. Был сделан вывод, что не все факторы влияния радиоактивного излучения на сцинтилляторы были учтены. Для прояснения этого вопроса были проведены исследования четырёх типов пластиковых сцинтилляторов SCSN-81, UPS-923A (изготовлены в Харькове), BC-408, LNE (изготовлены в Дубне). Облучение проводилось на установке ИРЕН – источнике резонансных нейтронов. Максимальное время облучения – 30 дней. Величина световых выходов образцов различной формы после облучения сравнивалась с величиной световых выходов до облучения. Полученные результаты не показали значительного влияния темпа облучения на световой выход. В эксперименте CMS между сцинтилляторами находится большое количество бронзы. Поэтому исследовалось влияние дополнительной наведённой радиоактивности, излучаемой радиоизотопами, появившимися в результате облучения нейтронами бронзы. Для этого на одном и том же расстоянии от мишени ИРЕН облучались два одинаковых сцинтиллятора SCSN-81. Но за одним из них располагался диск из бронзы. Измерения световых выходов показали, что существует значительный вклад от наведённой активности. Результаты измерений подтверждаются результатами расчётов с помощью программы FLUKA.

В 2014 г. были закончены измерения и обработка данных, связанные с поиском космической пыли в образцах, предоставленных Государственным астрономическим институтом им. П. К. Штернберга, МГУ. Измерения проводились на установке ИРЕН.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализировались образцы, доставленные экспедициями 2010 – 2011 гг. в районе ледника Арктур (Северо-Чуйский хребет Алтая) (рис. 55).



Точка X – место, где собирались отложения, накопившиеся в скальных углублениях дна ручья. В точках №№1-3 отбирались контрольные пробы грунта ледниковых морен с нескольких горизонтов: поверхность, глубина 0.3 м; 0.6 м. Расстояния между точками 1-3 около 1 км. Анализ проводился методом нейтронной спектроскопии. Результаты исследования приведены в **Таблице 2**.

Таблица 2. Результаты анализа образцов.

Название образца	Глубина, м	Вес образца, г	Масса железа в образце по элементу, г	Весовая доля железа в образце, %
Точка X		270	12.6 ± 2.4	4.7 ± 0.9
Точка №1	0.0	470	10.98 ± 1.77	2.34 ± 0.37
	0.3		14.05 ± 1.6	3.0 ± 0.34
	0.6		8.59 ± 1.9	1.83 ± 0.40
Точка №2	0.0		14.02 ± 4.0	3 ± 0.9
	0.3		13.4 ± 2.1	2.8 ± 0.4
	0.6		11.15 ± 2.56	2.4 ± 0.5
Точка №3	0.0		9.30 ± 1.30	1.98 ± 0.30
	0.3		15.8 ± 2.37	3.36 ± 0.5
	0.6		17.21 ± 1.38	3.66 ± 0.29

Аналитические исследования на пучках заряженных частиц ускорителя ЭГ-5

Ускоритель ЭГ-5 проработал в этом году 495 часов на различные эксперименты. Основное направление исследований – элементный анализ приповерхностных слоев твердых тел с помощью ядерно-физических аналитических методик резерфордовского обратного рассеяния (методика RBS) и методики ядер отдачи (методика ERD). Эксперименты проводились с участием сотрудников ряда российских и зарубежных институтов: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (г. Москва), Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова (г. Гатчина), Воронежский Государственный Университет, Университет имени Марии Кюри-Склодовской (г. Люблин, Польша), Электротехнический институт Словацкой Академии Наук, Институт прикладной физики национальной академии наук Украины, VINCA Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Serbia. Кроме того, сотрудники ЛЯП проводили эксперименты по исследованию характеристик матричных полупроводниковых детекторов из арсенида галлия на пучках заряженных частиц от ускорителя ЭГ-5.

Аналитические исследования на реакторе ИБР-2

Развитие экспериментальной базы сектора НАА

В подотчетный период в СНААПИ разработан пакет программ для комплексной автоматизации многоэлементного нейтронного активационного анализа (НАА) на реакторе ИБР-2 и проведен монтаж трех устройств автоматической смены образцов (УСО) для автоматизации массовых измерений спектров, облученных образцов на трех детекторах [7]. Новый коммутационный шкаф для спектрометрической электроники и контроллеров для управления УСО обеспечил их эксплуатацию при заданной температуре. После завершения монтажных работ произведена окончательная настройка программы автоматизации измерений спектров с использованием базы данных НАА. Работа по автоматизации НАА проводится в рамках Координационной программы МАГАТЭ «Development of an Integrated Approach to Routine Automation of Neutron Activation Analysis» (F1.20.25/CRP1888, Contract No. 17363).

Во время летней стоянки реактора проведена наладка работы пневмотранспорта с новым компрессором, а также монтаж кондиционера и приточно-вытяжной вентиляции в помещении 129а установки РЕГАТА.

Для проведения элементного анализа методом атомной абсорбционной спектрометрии (ААС) в лабораторном корпусе (пом. 83-3) установлен атомно-абсорбционный спектрометр iCE3500 фирмы Thermo Scientific, смонтированы приточно-вытяжная вентиляция и вытяжной шкаф в соответствии с требованиями, предъявляемыми к лабораториям, работающим с кислотами, используемыми при анализе образцов методом ААС. По завершении монтажных работ специалистами фирмы Intertech Corporation проведены пуско-наладочные работы атомно-абсорбционного спектрометра с оформлением сертификата о готовности спектрометра для проведения исследований.

В этом же корпусе (пом. 83-2) установлен низкофоновый HPGe детектор с защитой для проведения планируемых радиоэкологических исследований.

Методическая работа

В связи с началом совместных работ с сектором астробиологии Лаборатории радиобиологии им. Н.М. Сисакяна ОИЯИ по определению элементного состава метеоритов, а также с целью оценки возможностей устройств автоматической смены образцов на детекторах, были проведены методические исследования по определению концентраций элементов для некоторых средне- и долгоживущих изотопов метеоритов путем измерения спектров наведенной гамма-активности через несколько часов после короткого облучения. Образцы

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

облучались в течение 1–3 минут с последующим измерением спектров сразу после облучения, а затем с выдержкой от нескольких до десятков часов.

Библиотеки короткоживущих изотопов, используемые для стандартных массовых измерений концентраций элементов, были откорректированы и дополнены данными для ряда средне- и долгоживущих изотопов. Таким образом, для изотопов с периодом полураспада несколько десятков часов и даже лет разработана методика расчета концентраций элементов в некоторых специфических образцах после коротких облучений. При этом установлена необходимость использования и, соответственно, приобретения одноэлементных стандартных образцов с заданными параметрами.

Биомониторинг воздушных загрязнений

В рамках международной программы «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе – оценки на основе анализа мхов-биомониторов» в 2014 году завершена работа по изучению экологической ситуации в районе феррохромового производства в г. Тихвин Ленинградской области [8]. Полученные результаты вошли в Годовой отчет Комиссии ООН по дальнему переносу воздушных загрязнений в Европе. В рамках гранта РФФИ (№ 14-05-31279) для молодых ученых «Мой первый грант» в 2014 году проведен отбор 170 образцов мхов и почв на территории Московской и Тверской областей. Проведен многомерный статистический анализ данных, полученных методом нейтронной активации, и с использованием ГИС-технологий построены карты распределений элементов-загрязнителей на изучаемой территории.

Многолетнее сотрудничество со словацкими специалистами в области биомониторинга атмосферных выпадений следовых элементов нашло отражение в главе книги «Атмосферные загрязнения». Завершено исследование атмосферных выпадений тяжелых металлов и радионуклидов в районе атомной электростанции в г. Темелин, Чехия [9]. В течение отчетного периода выполнены две работы по анализу данных атмосферных выпадений тяжелых металлов и других элементов в Албании. В рамках Программы исследований Сербия-ОИЯИ проведен сравнительный анализ воздушных загрязнений в так называемых «уличных каньонах» Москвы и Белграда. Статья направлена в журнал «*Environmental Monitoring and Assessment*». Проведен НАА образцов мхов из национальных парков Польши, собранных учителями и школьниками в рамках Программы Польша-ОИЯИ.

Завершена работа по определению концентраций элементов во мхах-биомониторах, собранных на территории, прилегающей к свинцово-цинковому комбинату в Кърджали – одном из самых экологически неблагополучных мест Болгарии. Полученные результаты использованы в бакалаврской дипломной работе болгарской студентки Герганы Христовой (Пловдив), выполненной под руководством доц. С. Мариновой и доц. М.В. Фронтасевой и с отличием защищенной в Болгарии в 2014 году. В ближайшее время будет завершен НАА почв из той же экологически «горячей точки» Болгарии. Результаты войдут в магистерскую диссертацию Г. Христовой.

Биотехнологии

В сотрудничестве с биофизиками Института физики им. Э. Андроникашвили Грузинского государственного университета им. И. Джавахишвили и Университета им. И. Чавчавадзе в 2014 году велись исследования по разработке методов синтеза наночастиц золота и серебра новым видом микроорганизмов - археями. Штамм термоацидофильного кренархеона *Sulfolobus islandicus* LAL14/1, предоставленный Институтом им. Л. Пастера (Париж, Франция) был использован для получения наночастиц серебра и золота в условиях высоких температур (75° С). В комплексе с рядом оптических и аналитических методов нейтронный активационный анализ на реакторе ИБР-2 использовался для характеристики процессов синтеза наночастиц

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

золота и серебра исследуемым видом архей, применение которых в технологических целях до настоящего времени весьма ограничено [10].

В 2014 году продолжались совместные работы с Институтом биотехнологии и микробиологии АН Молдовы по исследованию процесса извлечения токсичных металлов (хром, никель) из сточных вод с помощью микроводоросли *Spirulina platensis*. Выполнялись также исследования по мониторингу изменения содержания основных компонентов биомассы спирулины (белки, углеводы и др.) в процессе образования наночастиц серебра микроводорослями [11].

В рамках пилотного проекта с Университетом в Оулу, Финляндия, продемонстрированы возможности НАА сосновых опилок, используемых при очистке сточных вод в качестве сорбентов металлов. Совместно с Институтом инженерной экологии (Institute of Environmental Engineering) Университета Обуда (Óbuda University), Будапешт, Венгрия, были проведены аналогичные исследования в модельном эксперименте по использованию растения *Miscanthus sinensis* в качестве сорбента металлов. Выполненная работа является частью кандидатской диссертации аспиранта Университета Обуда, Альберта Санизло (Венгрия).

В сотрудничестве с Институтом водных проблем РАН с помощью эпитеплового НАА был определен элементный состав цианобактериальных сообществ - экстремофилов, живущих в термальных источниках Камчатки при температурах выше 55°С.

Оценка состояния окружающей среды

В 2014 году в рамках совместного с Египтом проекта «Оценка экологической ситуации в бассейне р. Нил с использованием ядерно-физических аналитических методов» продолжен многоэлементный анализ почв и донных отложений, отобранных в дельте р. Нил, вдоль его русла и искусственных каналов. Полученные результаты показали, что элементный состав объектов исследования определяется, главным образом, геохимическими особенностями изучаемого региона и не несет на себе следов антропогенной нагрузки.

В сотрудничестве с Институтом биологии южных морей (Севастополь) с целью оценки состояния прибрежной экосистемы Крыма завершен анализ образцов макроводорослей-биомониторов, отобранных в прибрежной зоне Черного моря. Выявлены наиболее чистые области акватории прибрежной зоны Крыма и для водорослей из них определены фоновые концентрации около 30 макро- и микроэлементов [12]. Оработана методика пробоотбора и пробоподготовки фитопланктона для НАА на реакторе ИБР-2 и определен элементный состав 50 проб. Впервые получены концентрации 46 элементов в фитопланктоне Черного моря. Оценено влияние элементного состава на биофизические параметры функциональной активности фитопланктонных сообществ в прибрежных зонах. Полученные результаты показали, что фитопланктон может успешно использоваться в качестве биомонитора водных экосистем. Работа была также представлена на III Международной научно-практической конференции «Биоразнообразие и устойчивое развитие» (Симферополь, Россия) и ISINN-22 (Дубна, Россия) [13].

В рамках сотрудничества с МГУ (Биологический факультет) начаты работы по определению элементного состава почвы, донных отложений, наземной и водной растительности с целью оценки потоков загрязнителей в стратегически важных участках Черного моря (прибрежная зона г. Анапа, г. Новороссийск и г. Туапсе).

Совместно с Университетом в Стелленбоше, ЮАР, продолжены комплексные исследования воздушной среды с помощью мхов и лишайников, а также водной экосистемы (заливы Салдана и Дэнджер) в Атлантическом океане, Западное побережье ЮАР, в рамках проекта «Моллюски как биомониторы водных экосистем в ЮАР».

Анализ продуктов питания

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Завершены исследования и принята ведущим американским академическим журналом *Food and Nutrition Sciences* в печать совместная работа сектора с аналитическим центром Геологического института РАН в области применения ядерно-физических аналитических методов для исследования качества продуктов питания, в частности, по определению содержания Cl, Br, I и Se в организме человека.

НАА применялся для исследования элементного состава некоторых сельскохозяйственных культур (овощей и зерновых), выращенных с использованием биоэнергоактиватора «Биораг», созданного биохимиками Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили, а также для анализа соответствующих образцов почвы. Состав почвы показал хорошее совпадение со средними данными, характерными для земных пород. Результаты НАА исследованных образцов свидетельствуют об отсутствии токсичных элементов в сельскохозяйственных культурах, выращенных с использованием биоэнергоактиватора. Более того, содержание тяжелых металлов во всех случаях уменьшалось, что свидетельствует о положительном воздействии инновационного препарата на элементный состав сельскохозяйственных культур [14].

Результаты НАА пищевых масел (подсолнечное и оливковое) из Румынии показали существенное различие в их элементном составе, что согласуется с литературными данными, полученными другими методами. Концентрации тяжелых металлов не превосходят рекомендованные ВОЗ (WHO) значения, допустимые для продуктов питания человека [15].

Геология

В рамках совместного проекта ОИЯИ-Румыния (проф. О. Дулиу, Университет в Бухаресте) в 2014 году продолжены исследования геохимии Черного моря. С помощью НАА изучен элементный состав вертикальных профилей донных отложений. (Duliu, Szabo et al., 2014). В результате изучения геохимии лёсса Четвертичного периода, образцы которого были собраны в Добруджа (Румыния), были получены сведения о климате Четвертичного периода.

Совместно с Western Cape University, ЮАР проведен НАА образцов золы, образованной при сжигании угля на тепловой электростанции в Матла, в провинции Мпамаланга Южной Африки (Mpumalanga Province in South Africa). Показаны аналитические преимущества НАА с использованием эпитепловых нейтронов в определении элементного состава золы по сравнению с другими аналитическими методами: спектрометрия оптического излучения с индуктивно-связанной плазмой (ICP-OES), масс спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (LA ICP-MS) и рентгено-флюоресцентный анализ (XRF).

Анализ материала внеземного происхождения

В 2014 завершена работа по поиску космической пыли в торфяных колонках Сибири и в талой воде высокогорного ледника Актру на Алтае. Датирование слоев торфяных колонок было проведено в Университете им. Адама Мицкевича в Польше. Частицы, выявленные с помощью методов электронной микроскопии, а также оценка результатов НАА образцов торфа из этих колонок по соотношению концентраций железа и никеля, позволяют предполагать, что выявленные частицы могут иметь внеземное происхождение. Более спорной представляется идентификация материала, собранного с помощью магнитных ловушек в талой воде ледника на Алтае. Результаты проведенных исследований обсуждались на Круглом столе «Актуальные проблемы общей и космической радиобиологии и астробиологии», 28-29 октября 2014 г. в Дубне. Начаты исследования торфяной колонки, отобранной в районе падения Тунгусского метеорита в 1908 году. Они проводятся совместно со специалистами Университета Мицкевича (Польша), имеющих большой опыт в датировании (определении возраста) образцов и интерпретации данных ретроспективного элементного анализа торфяных колонок.

Антропологические исследования

В рамках завершаемого в 2014 году проекта РФФИ (№ 12-06-00096/14), совместного с МГУ (НИИ и Музей антропологии им. Д.Н. Анучина), продолжен НАА волос представительной группы детей Онгудайского района республики Алтай (~ 200 детей), а также почв и растительности из мест их проживания с целью установления возможных корреляций элементного состава и выявления эндемических особенностей влияния геохимической среды на организм человека. При обработке результатов НАА применяли Многомерный статистический анализ.

Медицинские растения

Новым перспективным направлением исследований с помощью НАА в СШАПИ стал анализ растений, используемых в медицине. Эти работы ведутся совместно со специалистами Монголии, Польши и Болгарии. Работа по анализу традиционных монгольских растений (*Carduus crispus* L., *Sanguisorba officinalis*, *Granium pratense*, *Chamaenerion angustifolium* (L) Scop), применяемых в фитотерапии удостоена награды Thomas Edison Award-2014 (Издательство PHOTON, в разделе «Медицинские растения» для «вдохновения и распространения знаний среди молодых ученых». («...The authors receive Thomas Edison Award-2014 in the domain of Medicinal Plants for Inspiration and Knowledge Distribution among young research scholars») [16].

Материаловедение

В 2014 году совместно с Научно-практическим центром НАНБ по материаловедению Национальной академии наук Беларуси в рамках гранта РФФИ-Беларусь (ОИЯИ) были проведены работы по исследованию процессов кристаллизации и характеристике искусственных алмазов в системе C-Mn-Ni-Fe. В ходе эксперимента были получены кристаллы алмазов в системах Fe-Ni-C и Mn-Ni-C при давлении 5 ГПа и температуре 1700 К. Применение НАА позволило изучить примесный состав алмазов. Электронную микроскопию проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi SU8000 в Институте органической химии им. Н.Д. Зелинского (Москва), по гранту для краткосрочных научных и образовательных стажировок в области электронной микроскопии (Ю.В. Алексеенко). С помощью электронной микроскопии были определены размер и форма полученных кристаллов. Установлено, что, несмотря на схожесть механизма образования кристаллов, их характеристики значительно отличаются. В системе Fe-Ni-C вырастают кристаллы более совершенной геометрии и больших размеров. Из данных по примесному составу следует, что в системе Mn-Ni-C стимулировано образование зародышей и, соответственно, образуются менее прочные и менее крупные кристаллы несовершенной формы. Таким образом, используя определенную каталитическую систему, можно получать кристаллы с заданными характеристиками. Начата также совместная работа по изучению процессов фазообразования и физических характеристик соединений в системе Cu-Fe-S при воздействии высоких давлений и температур. Часть экспериментального материала передана в Университет в Галаце, Румыния, для проведения рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии.

Литература

- 1 Исследования в области нейтронной ядерной физики <http://www.info.jinr.ru/plan/ptp-2014/r441104.htm>.
- 2 Development of the tagged neutron method for elemental analysis and nuclear reaction studies (project TANGRA), <http://indico.jinr.ru/materialDisplay.py?contribId=7&materialId=0&confId=759>.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- 3 Enik T.L., Likhachev A.N., Mitsyna L.V., Popov A.B., Salamatin I.V., Sirotin A.P., AURA setup testing at IREN neutron beam. JINR Preprint E3-2014-13, Dubna, 2014.
- 4 Enik T.L., Mitsyna L.V., Popov A.B., Salamatin I.M., The Angular Anisotropy of Slow Neutrons Scattering Measured at IREN Facility with Vanadium as a Sample. JINR Preprint E3-2014-27, p. 42.
- 5 Golub R., Pendlebury J.M., Super-thermal sources of ultra-cold neutrons. (1975) *Physic Letters A*, v. 53, p. 133-135.
- 6 Baessler, S. et al., New methodical developments for GRANIT. (2011) *Comptes Rendus Physique*, v. 12, p. 729.
- 7 Pavlov S.S., Dmitriev, A.Yu. Chepurchenko I.A., Frontasyeva M.V., (2014) Automation system for measurement of gamma-ray spectra of induced activity for neutron activation analysis at the reactor IBRR-2 of Frank Laboratory of Neutron Physics at the Joint Institute for Nuclear Research. *Physics of Elementary Particles and Nuclei*, v. 11, p. 737–742.
- 8 Vergel K.N., Goryainova Z.I., Vikhrova I.V., Frontasyeva M.V., (2014) Moss biomonitoring and employment of the GIS technology within the framework of the assessment of air pollution by industrial enterprises in the Tikhvin District of the Leningrad Region. *Ecology of Urban Areas*, v. 2, p. 92-101.
- 9 Thinova L., Frontasyeva M., Vergel K., Bayushkina E., (2014) Assessment of contamination with trace elements and man-made radionuclides around Temelin Nuclear Power Plant in Czech Republic. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 104, p. 432-435.
- 10 Kalabegishvili T. L., Murusidze I. G., Prangishvili D. A., Kvachadze L. I., Kirkesali E. I., Rcheulishvili A. N., Ginturi E. N., Janjalia M. B., Tsertsvadze G. I., Gabunia V. M., Frontasyeva M.V., Zinicovscaia I., Pavlov S. S., (2014) Gold nanoparticles in *Sulfolobus islandicus* biomass for technological applications. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, v. 6, p. 1302-1308.
- 11 Zinicovscaia I., Cepoi L., Rudi L., Chiriac T., Valuta A., Duca Gh., Kirkesali E., Frontasyeva M.V., Culicov O., Pavlov S.S., Bobrikov I., (2014) Biochemical changes in some cultures of cyanobacteria at the synthesis of silver nanoparticles. *Canadian Journal of Microbiology*, doi: 10.1139/cjm-2014-0450
- 12 Kravtsova A., Milchakova N., Frontasyeva M., (2014) Accumulation of macro- and trace elements in brown algae *Cystoseira* studied by multielement instrumental neutron activation analysis (the Black Sea, south-western Crimea). *Ecological Chemistry and Engineering*, v. 21, p. 9-23.
- 13 Nekhoroshkov P.S., Kravtsova A.V., Frontasyeva M.V., Tokarev Yu. N., (2014) Neutron activation analysis and scanning electron microscopy of phytoplankton in the coastal zone of Crimea (The Black Sea). *American Journal of Analytical Chemistry*, v. 5, p. 323-334.
- 14 Frontasyeva M.V., Pavlov S.S., Zinicovscaia I.I., Bagdavadze N. V., Kirkesali E.I., Gakhokidze R., (2014) Neutron activation analysis of agricultural crops exposed to bioenergoactivator. *Agricultural Chemistry*, v. 6, p. 55-61.
- 15 Culicov O. A., Zinicovscaia I., Setnescu T., Setnescu R., Frontasyeva M. V., (2014) Elemental content of edible oils studied by neutron activation analysis. Accepted by *Revue Roumaine de Chimie*, 2014.
- 16 Baljinnyam N., Tsevegsuren N., Jugder B., Frontasyeva M.V., Pavlov S.S., (2014) Investigation of elemental content of some Mongolian medicinal plants. *International Journal of Medicinal Plants. Photon*, v. 106, p. 481-492.