

*На правах рукописи*

*Ингерман Светлана Владимировна*

Энергетические спектры антинейтрино  
продуктов деления  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$   
в ядерном реакторе, рассчитанные с использованием  
экспериментальных данных

1.3.15.— Физика атомных ядер и элементарных частиц,  
физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

**Научный руководитель:**

*Синев Валерий Витальевич*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел экспериментальной физики, лаборатория гамма-астрономии и реакторных нейтрино, ведущий научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

*Дербин Александр Владимирович*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Отделение нейтронных исследований, отдел полупроводниковых ядерных детекторов, заведующий отделом.

*Лютостанский Юрий Степанович*, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Отделение ядерно-физических технологий, заместитель руководителя Отделения.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (г. Москва, г. Троицк).

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте [www.inr.ru](http://www.inr.ru)

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.163.01,  
кандидат физико-математических наук

*Демидов Сергей Владимирович*

## Общая характеристика работы

Впервые идея о возможности детектирования нейтрино от ядерного реактора с помощью радиохимического и, в частности, хлор-аргонового метода была высказана Б. М. Понтекорво [1] в 1946 году. Им была предложена реакция захвата нейтрино ядром атома  $^{37}\text{Cl}$  с превращением его в  $^{37}\text{Ar}$ . Однако, с помощью этого метода не удалось зарегистрировать нейтрино из ядерного реактора, хотя позднее им было зарегистрировано нейтрино от Солнца. Открытие нейтрино было сделано Ф. Райнесом и К. Коуэном [2] в эксперименте на реакторе в Саванна-Ривер (США) в 1956 году. Райнес и Коуэн использовали реакцию обратного бета-распада (ОБР) (1) для регистрации антинейтрино от реактора, с тех пор ставшей классической в нейтринных реакторных экспериментах



Эти два эксперимента показали, что нейтрино от реактора и нейтрино от Солнца не идентичны друг другу. Позднее их назвали нейтрино (от Солнца) и антинейтрино (от реактора).

Процесс (1) с его большим, по меркам нейтринной физики, сечением ( $\sim 10^{-43}$  см<sup>2</sup> в реакторном спектре) является одним из наиболее фундаментальных, который обратен распаду нейтрона



С восстановлением спектра антинейтрино связывается решение целого ряда задач. Среди них поиски нейтринных осцилляций [3; 4], интерпретация измерений нейтринных реакций на дейтроне и электроны, изучение жесткой части спектра антинейтрино короткоживущих продуктов деления, наблюдение за накоплением в активной зоне реактора плутония и выгорания урана.

История экспериментов с участием антинейтрино от ядерного реактора продолжается более 70 лет. С начала 80-х годов осуществлен ряд многочисленных экспериментов: ILL (Institut Laue–Langevin) [5], Bugey [6], РОНС [7] на Ровенской АЭС, Goesgen [8], Palo Verde [9] и др. в которых развивались методы регистрации антинейтрино и проводились детальные измерения спектра антинейтрино от реактора на разных расстояниях с целью поиска нейтринных осцилляций, которые наблюдались в потоке солнечных нейтрино.

Развитие реакторных экспериментов создало базу для исследования возможности практического применения антинейтрино для решения задач нейтринной диагностики внутриреакторных процессов: определение энерговыработки реактора, выгорание  $^{235}\text{U}$  и накопления  $^{239}\text{Pu}$  в активной зоне реактора непосредственно в ходе кампании. Развитие нейтринной спектроскопии позволяет производить дистанционный изотопный анализ ядерного топлива в работающем реакторе. Идея применения была предложена Л. А. Микаэляном [10] в 1978 году и развита в работах [11–17], где было показано различие в спектрах антинейтрино урана и плутония. Это дает возможность для контроля за наработкой плутония в плане системы гарантий МАГАТЭ.

Реакторные антинейтрино широко используются для изучения фундаментальных свойств нейтрино, которые в основном образуются в результате бета-распада богатых нейтронами осколков деления, генерируемых тяжелыми делящимися изотопами  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$ . В 2011 году усовершенствованные расчеты Th. A. Mueller и др. [18] и P. Huber [19] (модель НМ) предсказали потоки реакторных антинейтрино, которые примерно на 5% превышают потоки, измеренные в нескольких реакторных нейтринных экспериментах с короткой базой. Это несоответствие известно как “реакторная антинейтринная аномалия” (RAA) [20; 21]. Кроме того, это несоответствие может зависеть от состава ядерного топлива [22; 23]. Была выдвинута гипотеза, что уменьшение числа антинейтрино связано с их осцилляциями в четвертый тип (сорт) нейтрино - стерильные нейтрино с разницей квадратов масс стерильного и активного нейтрино порядка  $1 \text{ эВ}^2$ . Предлагаются различные эксперименты по поиску осцилляций в стерильное состояние, например [24; 25], часть из них уже ведется. Также во многих ведущихся экспериментах делается анализ на присутствие стерильных нейтрино.

Другая сопутствующая аномалия в реакторных экспериментах - это не соответствие формы спектра антинейтрино измеряемого с расчетным в области 6 МэВ. Там проявляется пик (“5 MeV bump” в наблюдаемой энергии), который не удавалось описать расчетным путем.

В настоящей диссертационной работе используется комбинированный метод получения реакторного спектра антинейтрино, который включает в себя расчет энергетических спектров антинейтрино основных делящихся изотопов урана и плутония от ядерного реактора с использованием ранее экспериментально измеренных спектров. В расчете спектров антинейтрино используется метод прямого суммирования с использованием уточненной нами базой ядерных данных в которую включены продукты деления с неизвестными схемами распадов к которым применялась силовая функция. Для отработки методики использовались данные из экспериментов: РОНС [26; 27] и Double Chooz [28; 29] и применены для экспериментов Daya Bay [30] и RENO [31].

### Актуальность темы.

Предложен новый метод расчета спектра реакторных антинейтрино, который опирается на высоко-статистические измерения спектра антинейтрино. Метод использует силовую функцию для описания вероятностей ветвей бета-переходов ядер с неизвестными схемами бета-распада. Силовая функция подбирается таким образом, чтобы обеспечить наилучшее описание энергетического спектра антинейтрино, полученного в экспериментах РОНС на Ровенской АЭС и Double Chooz.

Целью представленной работы является получение расчетных спектров антинейтрино от компонент ядерного топлива реактора:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ .

Стандартный спектр антинейтрино ядерного реактора представляет собой суперпозицию данных спектров в пропорции количества делений каждого изотопа в активной зоне ядерного реактора.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие **задачи**:

1. Создать улучшенную базу данных параметров распада бета-активных атомных ядер, включающую распределения вероятностей ветвей бета-переходов для неизвестных ядер.
2. С использованием новой базы ядерных данных рассчитать спектры антинейтрино от осколков основных делящихся изотопов:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ , входящих в состав топлива ядерного реактора.
3. Решить проблему формы энергетического спектра антинейтрино в области энергии около 6 МэВ, где наблюдается расхождение в экспериментальных данных и в предыдущих расчетах.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в том, что:

1. Получены новые спектры антинейтрино:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  от компонент топлива ядерного реактора с использованием экспериментальных спектров антинейтрино из высоко-статистических экспериментов, которые лучше удовлетворяют экспериментальным сечениям реакции обратного бета-распада. Отличия от экспериментальных величин составляет не более одного процента. В то время как спектры Хьюбера-Мюллера (модель НМ) дают отличия свыше более трех процентов.
2. Впервые использована силовая функция для описания вероятностей ветвей бета-переходов неизвестных схем распада.
3. Впервые получен расчетный энергетический спектр антинейтрино ядерного реактора, совпадающий с экспериментальным.
4. Впервые получены модельные схемы бета-переходов для атомных ядер, у которых отсутствуют данные о схемах распада.

### **Практическая значимость.**

С использованием разработанного метода получена уточненная база вероятностей ветвей бета-переходов атомных ядер, которая включает 1165 ядер. Из них 278 с неизвестными схемами распада, далекие от линии бета-стабильности. Полученные силовые функции (распределение вероятностей ветвей бета-перехода) для короткоживущих ядер могут быть проверены и уточнены методами ядерной физики.

Анализируя детектированный энергетический спектр нейтрино при помощи расчетного, можно определить, какие изотопы делятся в момент измерения в активной зоне ядерного реактора, и, следовательно, оценить состояние и состав топливной загрузки. Удаленный мониторинг реактора при помощи нейтрино позволит в режиме реального времени отслеживать выгорание урана в ядерном топливе и накопление плутония. Впервые появилась возможность определения

состава активной зоны по количеству делений изотопов ядерного топлива за счет точного описания суммарного зарегистрированного спектра антинейтрино при помощи расчета.

Полученная в диссертационной работе база данных параметров распада бета-активных атомных ядер может быть применена для получения расчетных энергетических спектров антинейтрино основных делящихся изотопов урана и плутония для определения экспериментального спектра в любом эксперименте на ядерном реакторе при известном составе активной зоны.

Знание точных спектров реакторных нейтрино, когда они являются фоном, позволит выделять редкие события, изучаемые в подземных низкофоновых лабораториях. Например, реакторные нейтрино являются фоном при поиске гео-нейтрино, потоков нейтрино от солнца, диффузного потока космических нейтрино и определения иерархии нейтринных масс при исследовании осцилляций с высоким энергетическим разрешением.

### **Методология и методы исследования.**

Разработанные в диссертационной работе методы предоставляют ряд решений в расчете и анализе спектров антинейтрино от реактора.

Применен метод суммирования спектров антинейтрино отдельных осколков деления, образующихся в результате деления тяжелых изотопов в реакторе.

Для расчета спектра антинейтрино использовались высоко-статистические экспериментальные спектры антинейтрино, полученные в экспериментах: Double Chooz, Daya Bay, RENO и Ровно. Экспериментальный спектр позитронов Double Chooz был преобразован в антинейтринный при помощи оригинального метода с использованием функции отношения спектров, полученной расчетом Монте-Карло. Метод был проверен и подтвержден стандартным методом сингулярного разложения.

Для нахождения силовой функции использовался комбинированный метод, в котором производилась минимизация функционала, подобного функции  $\chi^2$ . Подобранная силовая функция для каждого неизвестного ядра обеспечила лучшее согласие формы экспериментального и расчетного спектров нейтрино. В результате были определены параметры неизвестных ранее схем распадов ряда ядер.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная комбинированная методика расчета спектра антинейтрино от ядерного реактора с использованием метода прямого суммирования и силовой функции позволяет получить энергетические спектры антинейтрино основных делящихся изотопов, входящих в состав ядерного топлива:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ .
2. Разработанная силовая функция описывает вероятности бета-переходов ядер для продуктов деления с неизвестными схемами распадов.

3. Полученная уточненная база данных параметров бета-активных атомных ядер подтверждает схемы распадов некоторых короткоживущих осколков с использованием экспериментальных данных, которые ранее были получены только теоретическим путем.
4. С использованием разработанной комбинированной методики расчёта получены энергетические спектры антинейтрино делящихся изотопов:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  из экспериментальных данных Ровенского и Double Chooz экспериментов.
5. Полученный энергетический спектр антинейтрино ядерного реактора при среднем составе ядерного топлива по числу делений демонстрирует отсутствие аномалии в области 6 МэВ, наблюдавшейся в отношении экспериментальных спектров к расчетным спектрам других авторов.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждает следующим: достигнуто согласие полученных расчетных спектров с экспериментальными спектрами антинейтрино от ядерного реактора в экспериментах: Ровно, Double Chooz. Все полученные результаты были опубликованы в рецензируемых научных журналах и изложены на международных и российских научных конференциях.

#### Апробация работы.

Результаты проведенных исследований были доложены автором лично на:

1. IX Всероссийский молодежный научный форум с международным участием “Open Science 2022”, Гатчина, ПИЯФ им. Б.П. Константинова, 16-18 ноября 2022 года.
2. EUROPEAN SCHOOL OF HIGH-ENERGY PHYSICS, Израиль, Иерусалим, 30 ноября - 13 декабря 2022.
3. 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный, 3-8 апреля 2023 года.
4. 73-я международная конференция по ядерной физике «ЯДРО-2023: Фундаментальные вопросы и приложения», РФЯЦ - ВНИИЭФ, Саров, 9-13 октября 2023 года.
5. XII молодёжная конференция Физика элементарных частиц и космология, ВШЭ, Москва, 23–24 октября 2023 года.
6. 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный, 1-6 апреля 2024 года.
7. LX Всероссийская научно-практическая конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники, Москва, РУДН, 20-24 мая 2024 года.
8. The 7th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2024), Москва, НИЯУ МИФИ, 22-25 октября 2024 года.
9. XIII молодёжная конференция Физика элементарных частиц и космология 2024, ВШЭ, Москва, 3–4 декабря 2024 года.

10. 67-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный, 31-5 апреля 2025 года.

### Личный вклад.

Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его определяющем участии. Автором выполнено:

- составление каталогов бета-активных атомных ядер в диапазоне массовых значений  $A = 58 \div 184$ , формирующих исходную базу данных Nuclide, состоящей из порядка 1000 продуктов деления;
- разработка и отладка пакета программ для расчета энергетического спектра антинейтрино, а также для расчета сечений и анализа модельных схем распада;
- проведен расчет энергетических спектров антинейтрино методом рекуррентного суммирования, основанный на уточненной базе данных параметров бета-активных атомных ядер;
- проведено сравнение расчетных энергетических спектров антинейтрино и ряда экспериментальных спектров;
- разработан программный код и проведен анализ исходной базы ядерных данных Nuclide с уточненной базой, в котором сравнивались модельные схемы распада для оцененных продуктов деления с исходными данными.

### Публикации.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 2 печатных работах, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин. Список публикаций приведен в конце автореферата: [A1–A5].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 139 страниц, включая 35 рисунков и 18 таблиц. Список литературы содержит 87 наименований.

## Содержание работы

Во введении кратко описана история нейтрино от ядерного реактора. Подчеркивается важность проблемы спектров антинейтрино, которая имеет первостепенную значимость в фундаментальных и прикладных исследованиях антинейтрино от реактора. Обосновывается актуальность темы данной работы, изложены цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость разработанного метода расчета спектра реакторных антинейтрино.

В первой главе описан механизм возникновения электронных антинейтрино в реакторе. Дается обзор основных методов получения спектра антинейтрино от ядерного реактора, которые используются и сравниваются в настоящей

работе: метод прямого суммирования, метод прямого измерения спектра антинейтрино от ядерного реактора и метод сингулярного разложения SVD.

Во **второй главе** представлен расчет спектров антинейтрино комбинированным методом для основных делящихся изотопов урана и плутония, основанный на уточненной базе данных параметров бета-активных атомных ядер. В полученной базе данных для осколков с оцененными и неизвестными схемами распадов применялась силовая функция для описания вероятностей бета-переходов ядра. Силовая функция подбиралась для наилучшего описания спектра антинейтрино, полученного в эксперименте Ровно. Вероятности бета-переходов мы распределили по функции Гаусса со средним значением, лежащим в диапазоне энергий от 2 МэВ до энергии бета-распада  $Q_\beta$ , и дисперсией, равной 20 % от средней энергии. Средняя энергия бета-перехода подбиралась как параметр, равный некоторой доле от  $Q_\beta$ . Подбор средней энергии осуществлялся методом минимизации функционала, составленного из расчетных и экспериментальных спектров

$$\chi_m^2 = \sum_{i=5,8,9,1} \sum_{k=1}^{25} \left( \frac{y_{i,k}^{exp} - y_{i,k}^{calc}}{\sigma_{i,k}^{exp}} \right)^2, \quad (3)$$

где  $m$  - номер итерации,  $y_{i,k}^{exp}$  - экспериментальный спектр антинейтрино из [32],  $y_{i,k}^{calc}$  - расчетный спектр,  $\sigma_{i,k}^{exp}$  - погрешность экспериментального спектра.

На каждом этапе минимизации формировался заново расчетный спектр при изменении средней энергии бета-переходов у оцененных и неизвестных осколков деления.

Для расчета был создан пакет программ «AnuReactorSpectrum» для ЭВМ, составленный на языке программирования C++ [A3].

На рис. 1 представлены расчетные спектры антинейтрино для основных четырех делящихся изотопов урана и плутония, полученные данной методикой в сравнении с экспериментальными спектрами [32]. Наилучшее согласие между экспериментальными и расчетными спектрами достигалось при помощи метода минимизации.

Получены сечения реакции ОБР (1) для спектров антинейтрино урана и плутония из ряда работ и представлены в табл. 1, где в последней колонке приведено сечение реакции ОБР для спектра, соответствующего составу активной зоны реактора при измерении в эксперименте Double Chooz [29]. В работе [29] экспериментально было получено значение сечения реакции ОБР для состава ядерного топлива по числу делений с точностью 1 %:  $^{235}\text{U}$  - 0.52,  $^{238}\text{U}$  - 0.087,  $^{239}\text{Pu}$  - 0.333 и для  $^{241}\text{Pu}$  - 0.06,  $\sigma_f = (5.71 \pm 0.06) \times 10^{-43}$  см<sup>2</sup>/деление. В эксперименте Ровно, в работе [27], измеренное сечение  $\sigma_f = (6.0 \pm 0.3) \times 10^{-43}$  см<sup>2</sup>/деление для состава активной зоны:  $^{235}\text{U}$  - 0.586,  $^{238}\text{U}$  - 0.075,  $^{239}\text{Pu}$  - 0.292 и  $^{241}\text{Pu}$  - 0.047. Измеренные сечения хорошо согласуются в пределах экспериментальной ошибки и с поправкой на состав активной зоны реактора.

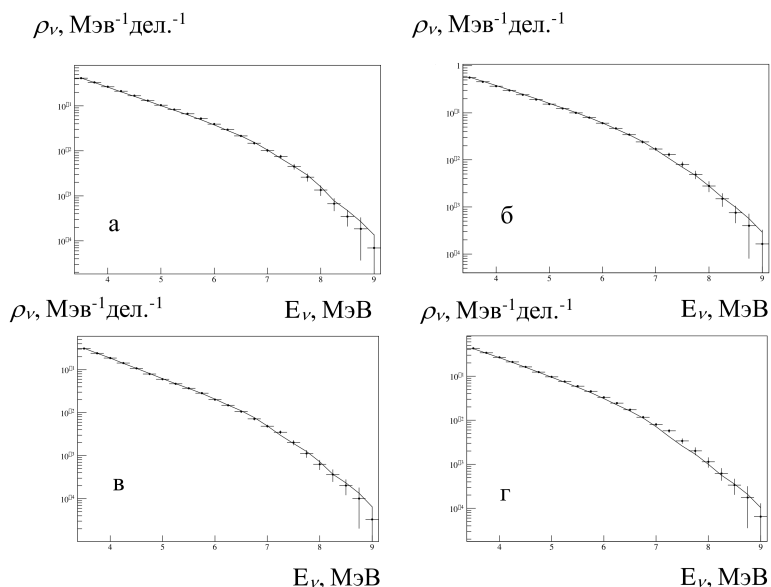


Рис. 1 — Результат описания экспериментальных спектров антинейтрино из работы [32] расчетными: а –  $^{238}\text{U}$ , б –  $^{235}\text{U}$ , в –  $^{241}\text{Pu}$ , г –  $^{239}\text{Pu}$ . Точки с ошибкой – экспериментальный спектр, кривая – описывающий расчетный спектр.

Таблица 1 — Сечение реакции ОБР (1) до 9 МэВ,  $\sigma_f \times 10^{-43}$  [см<sup>2</sup>/деление]

	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$	Double Chooz
ИЯИ РАН [A1]	6.241	9.089	4.269	5.948	5.815
ILL [33; 34]	6.395	8.903	4.185	5.768	5.840
Vogel [35]	6.498	9.135	4.508	6.520	6.066
МИФИ [36]	6.404	9.267	4.383	6.489	5.985
Huber-Mueller [18; 19]	6.658	10.08	4.364	6.031	6.154
Копейкин [37]	6.308	9.395	4.33*	6.01*	5.900

\* Посчитано авторами.

Проведено сравнение полученных в настоящей работе спектров антинейтрино со спектрами Хьюбера-Мюллера из работ [18; 19] и экспериментальными спектрами, рис. 2. Для спектров из работ [18; 19] наблюдается отличие в области 6 МэВ энергии нейтрино, которое характерно для экспериментальных спектров в области 5 МэВ наблюдаемой энергии. Со спектрами антинейтрино из работы [32] наблюдается хорошее согласие, за исключением мягкой области, где могло сказаться недостаточное исключение функции отклика детектора и влияние спектров обработанного топлива.

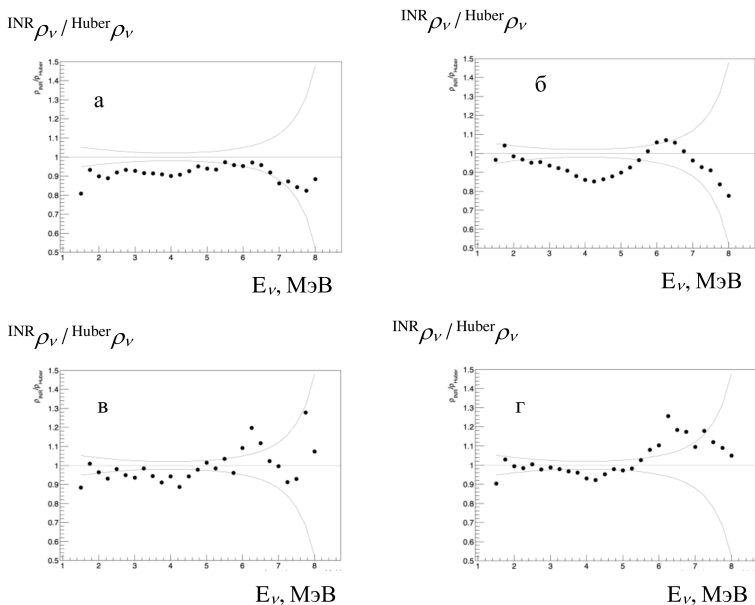


Рис. 2 — Отношение спектров антинейтрино, полученных в данной работе, к спектрам из работ [18; 19] - черные точки: а –  $^{235}\text{U}$ , б –  $^{238}\text{U}$ , в –  $^{239}\text{Pu}$ , г –  $^{241}\text{Pu}$ . Показана оцененная погрешность расчетных спектров - сплошные кривые сверху и снизу.

В настоящей работе получена уточненная база данных параметров бета-активных атомных ядер, которая включает в себя оцененные и неизвестные осколки деления. В процессе варьирования схем бета-распада ядер – продуктов деления, отвечающим наиболее точному описанию экспериментальных спектров антинейтрино из работы [32] были изменены схемы бета-распада для 241 оцененных ядер и получены модельные схемы распада для неизвестных ядер. В ряде случаев, полученные в настоящей работе модельные схемы распада, оказались такими же [A4], как и в базе ядерных данных МАГАТЭ [38]. Схожей структурой модельных схем распада для оцененных ядер составило 54. Получены каталоги спектров продуктов деления [A5]. Полученная уточненная база данных параметров бета-активных атомных ядер может быть применена для получения расчетных энергетических спектров антинейтрино основных делящихся изотопов урана и плутония для сравнения с экспериментальными спектрами в любых других экспериментах на реакторе.

В **третьей главе** получены экспериментальные спектры антинейтрино урана и плутония из измерения [A3], выполненного на ближнем детекторе в эксперименте Double Chooz [28; 29], путем разложения спектра на основные компоненты [32].

На рис. 3 приведены экспериментальные спектры антинейтрино, выделенные процедурой [32] из измеренного спектра в эксперименте Double Chooz. Мы применили к этим спектрам наш комбинированный метод. Для этого составили  $\chi^2$  согласно процедуре минимизации. Обновлена уточненная база данных параметров бета-активных атомных ядер и на основе которой можно рассчитать спектры антинейтрино, которые дают сечения с наибольшей точностью.

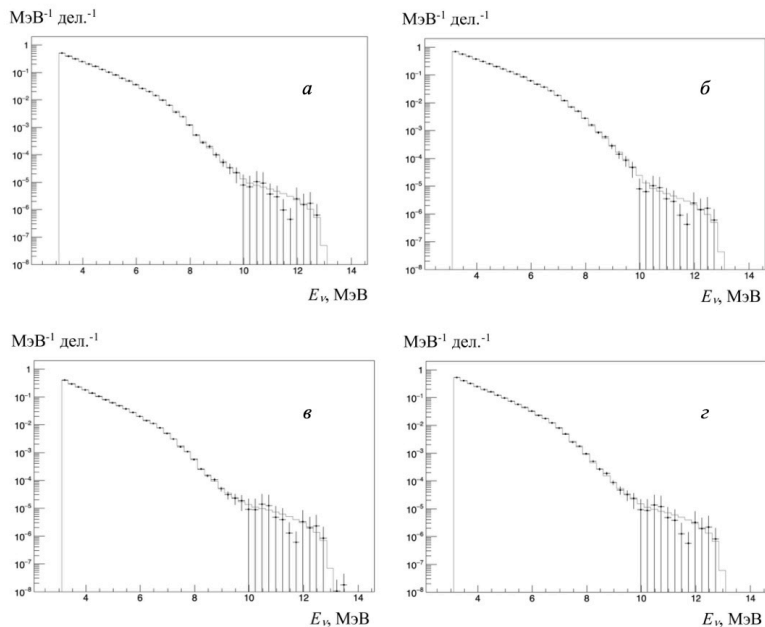


Рис. 3 — Сравнение экспериментальных и расчетных спектров антинейтрино делящихся изотопов урана и плутония. Черные точки с ошибкой - экспериментальный спектр, сплошная линия - расчетный спектр. На вкладках: а - спектр  $^{235}\text{U}$ , б - спектр  $^{238}\text{U}$ , в - спектр  $^{239}\text{Pu}$  и г - спектр  $^{241}\text{Pu}$ .

Для полученных расчетных спектров урана и плутония были рассчитаны полные сечения, которые сравнили с расчетными сечениями спектров для других авторов и экспериментальными сечениями измеренными с наилучшей точностью. В табл. 2 приведены расчетные сечения и сечения ряда авторов. Напомним, что наиболее точное сечение было получено в эксперименте Double ChoozI [29], которое составило  $\sigma_f = (5.71 \pm 0.06) \times 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление}$  при среднем составе ядерного топлива по числу делений.

Таблица 2 — Сечение реакции ОБР (1)  $\sigma_f \times 10^{-43}$  [ $\text{см}^2/\text{деление}$ ], рассчитанные со спектрами антинейтрино ряда авторов. Сечение  $\sigma_{DC}$  усредненное при среднем составе ядерного топлива

	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$	$\sigma_{DC}$
ИЯИ РАН [A2]	6.06	9.24	4.18	5.92	5.70
Vogel [35]	6.50	9.11	4.53	6.52	6.07
МИФИ [36]	6.40	9.21	4.39	6.48	5.98
Mueller [18]	6.68	10.12	4.39	6.08	6.18
ILL [33; 34]	6.43	8.93	4.20	5.80	5.87
НИЦ КИ [39; 40]	6.31	9.40	4.33	5.80	5.89

НИЦ КИ – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

На рис. 4 представлены расчетные спектры антинейтрино, удовлетворяющие спектрам из эксперимента Double Chooz.

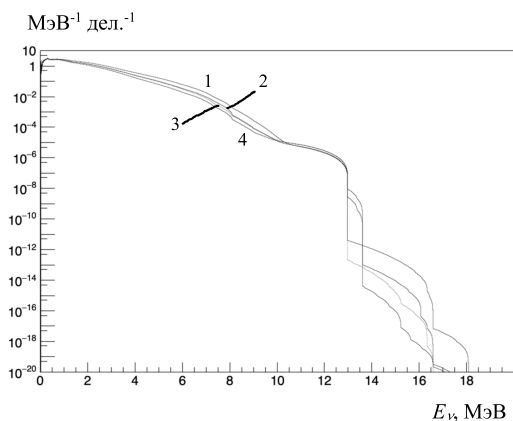


Рис. 4 — Расчетные энергетические спектры антинейтрино основных делящихся изотопов урана и плутония полученные в результате описания экспериментальных спектров Double Chooz.

В обновленной базе данных параметров бета-активных атомных ядер часть данных, полученных в ходе описания по оцененным осколкам, совпадает с имеющимися на сегодняшний день в существующих базах ядерных данных и часть данных различается. Количество оцененных ядер для эксперимента Double Chooz составило 211 из них количество ядер, у которых исходные данные не изменены программным кодом составило 45. Количество ядер, у которых схема известна и значение энергии бета-перехода с максимальной вероятностью, полученное в данной работе, совпадает с исходными данными, составило – 15. Ядра у которых схема ядра известна, но форма спектра изменилась, составило

151. Ядра, у которых отсутствуют экспериментальные данные о схемах распада и их количество составляет 329.

В **четвертой главе** исследуется точность восстановления спектра антинейтрино методом Монте–Карло с помощью комбинированного метода. Точность восстановления спектра антинейтрино подразумевает под собой полное сечение реакции ОБР (1). Поэтому в нашем анализе использовались данные четырех реакторных экспериментов, где измерялся спектр позитронов реакции ОБР, а именно: спектр из эксперимента Ровно [26] в диапазоне от 2 до 9 МэВ; спектр Double Chooz [29], полученный в диапазоне от 1.8 до 10 МэВ, который был получен из экспериментального спектра позитронов нашим методом с использованием функции отношения из Монте-Карло; спектр Daya Bay [30] с наибольшей статистикой, лежащий в диапазоне энергий от 1.8 до 12 МэВ с использованием метода SVD и спектр эксперимента RENO, также с использованием метода SVD [31].

Для описания экспериментальных спектров антинейтрино расчетными использовалась минимизация функционал  $\chi^2$  [41] с включением экспериментальных сечений. В результате минимизации мы получили расчетные спектры антинейтрино  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$ , которые описывают экспериментальные спектры в смеси с данным составом активной зоны. Рассчитанные по спектрам антинейтрино  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$  сечения лучше других спектров описывают экспериментальные сечения реакции ОБР приведены в табл. 3. По экспериментальным данным были восстановлены сечения  $^{235}\text{U}$ , которое находится в наилучшем согласии с сечением, рассчитанным по нашему спектру.

Таблица 3 — Экспериментальные сечения реакции ОБР (1) для экспериментов с большой статистикой,  $\sigma_f \times 10^{-43}$  [см<sup>2</sup>/деление] и расчет с использованием наших спектров урана и плутония. Также приведено сечение для спектра  $^{235}\text{U}$

Эксперимент	Состав активной зоны $\alpha_i$				${}^i\sigma_f$	${}^{INR}\sigma_f$	${}^5\sigma_f$
	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$			
Double Chooz	0.520	0.087	0.333	0.060	$5.71 \pm 0.06$	5.820	5.761
Daya Bay	0.561	0.076	0.307	0.056	$5.91 \pm 0.12$	5.804	5.978
RENO	0.571	0.073	0.300	0.056	$5.852 \pm 0.094$	5.801	5.924
Bugey-4	0.538	0.078	0.328	0.056	$5.752 \pm 0.081$	5.782	5.841

В табл. 4 представлены расчетные сечения, соответствующие расчетным спектрам антинейтрино для урана и плутония из минимизации [41].

Таблица 4 — Расчетные сечения реакции ОБР для спектров антинейтрино основных делящихся изотопов,  ${}^i\sigma \times 10^{-43}$  [см<sup>2</sup>/деление]

	${}^5\sigma$	${}^8\sigma$	${}^9\sigma$	${}^1\sigma$
Double Chooz	5.872	10.64	4.356	6.506

Если расчетные спектры антинейтрино верны, это означает, что они наиболее близки к реально существующим в природе, тогда значение для  ${}^5\sigma_f$  по результатам экспериментальных измерений должно быть близко к значению, рассчитанному по этому спектру. На рис. 5 показаны экспериментальные сечения реакторного спектра и вычисленные сечения  ${}^{235}\text{U}$ . Видно, что найденные значения сечений  ${}^{235}\text{U}$  ложатся в полосу средней экспериментальной погрешности за исключением значения Double Chooz.

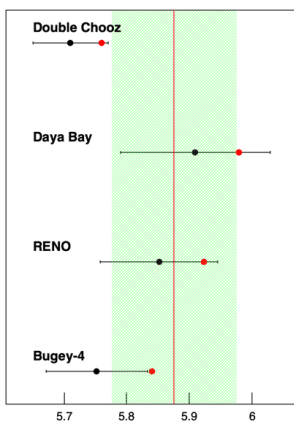


Рис. 5 — Экспериментальные сечения реакции ОБР.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Разработана комбинированная методика расчета спектра антинейтрино от ядерного реактора с использованием метода прямого суммирования и силовой функции позволяет получить энергетические спектры антинейтрино основных делящихся изотопов, входящих в состав ядерного топлива:  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}^{241}\text{Pu}$ .
2. В уточненной базе ядерных данных для осколков с неизвестными схемами распадов применялась силовая функция для описания вероятностей бета-переходов ядра. Силовая функция подбиралась для наилучшего описания энергетического спектра антинейтрино, полученного из ранее проеденных экспериментов РОНС и Double Chooz.
3. Получена уточненная база данных параметров распада бета-активных атомных ядер, которая может быть применена для получения расчетных энергетических спектров антинейтрино изотопов урана и плутония, и других делящихся ядер. Уточненная база данных может быть использована для получения спектра антинейтрино любого ядерного реактора,

что полезно для анализа данных экспериментов, ведущихся в потоке антинейтрино ядерного реактора.

4. Впервые получены энергетические спектры антинейтрино отдельных делящихся изотопов, формирующих состав ядерного топлива:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$  с использованием комбинированного метода расчета, из экспериментальных данных Ровенского и Double Chooz экспериментов.
5. Получен энергетический спектр антинейтрино от ядерного реактора при среднем составе ядерного топлива по числу делений за время измерения. В рамках комбинированного метода устранено несоответствие формы спектра антинейтрино в области 6 МэВ.

## Публикации автора по теме диссертации

- A1. New Antineutrino Spectra of Nuclear-Reactor Fissile Isotopes: Experiment and Calculations / S. V. Silaeva [et al.] // Phys. Atom. Nucl. — 2022. — Vol. 85, no. 6. — P. 690—700. — DOI: [10.1134/S1063778823010611](https://doi.org/10.1134/S1063778823010611). — arXiv: [2210.00836](https://arxiv.org/abs/2210.00836) [nucl-ex].
- A2. Antineutrino Spectra of  $^{235,238}\text{U}$  and  $^{239,241}\text{Pu}$  Taken from the Double Chooz Experiment / S. V. Ingerman [et al.] // Phys. Atom. Nucl. — 2023. — Vol. 86, no. 6. — P. 1178—1188. — DOI: [10.1134/S1063778824010599](https://doi.org/10.1134/S1063778824010599).
- A3. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Формирование энергетического спектра антинейтрино от реактора (AnuReactorSpectrum) [Text]* / В. В. Синев, С. В. Ингерман (Российская Федерация) ; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук. — No. 2025685416 ; 11/09/2025 ; Бюл. № 10, 2025684069 (Российская Федерация). — URL: <https://fips.ru/EGD/af3421f6-2ba6-4d35-8efc-68b72104ffd1>.
- A4. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Распределение вероятностей ветвей бета-переходов бета-активных ядер для двух баз ядерных данных (Probability\_view) [Text]* / В. В. Синев, С. В. Ингерман (Российская Федерация) ; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук. — No. 2025685395 ; 11/09/2025 ; Бюл. № 10, 2025684067 (Российская Федерация). — URL: <https://fips.ru/EGD/d1fd19b1-4a3c-4a97-84ae-e6040522aa24>.
- A5. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Отображение спектров антинейтрино продуктов деления с учетом всех ветвей бета-распада (Chain\_view) [Text]* / В. В. Синев, С. В. Ингерман (Российская Федерация) ; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук. — No. 2025685415 ; Бюл. № 10 ; 11/09/2025, 2025683946 (Российская

Федерация). — URL: <https://fips.ru/EGD/f948f02c-a08b-42ed-87f1-3a2d4ae2289d>.

## Список литературы

1. *Pontecorvo, B.* Inverse  $\beta$ -Decay / B. Pontecorvo // Chalk River Laboratory. — 1946.
2. Detection of the free neutrino: A Confirmation / C. L. Cowan [et al.] // *Science*. — 1956. — Vol. 124. — P. 103—104. — DOI: [10.1126/science.124.3212.103](https://doi.org/10.1126/science.124.3212.103).
3. *Bilen'kii, S. M.* Lepton mixing and neutrino oscillations / S. M. Bilen'kii, B. Pontecorvo // *Usp. Fiz. Nauk*. — 1977. — Vol. 123, no. 10. — P. 181—215. — DOI: [10.3367/UFNr.0123.197710b.0181](https://doi.org/10.3367/UFNr.0123.197710b.0181). — URL: <https://ufn.ru/ru/articles/1977/10/b/>.
4. *Bilen'kii, S. M.* Neutrino masses, mixing and oscillations / S. M. Bilen'kii // *Usp. Fiz. Nauk*. — 2003. — Vol. 173, no. 11. — P. 1171—1186. — DOI: [10.3367/UFNr.0173.200311b.1171](https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200311b.1171). — URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2003/11/b/>.
5. Search for neutrino oscillations at a fission reactor / H. Kwon [et al.] // *Phys. Rev. D*. — 1981. — Sept. — Vol. 24, issue 5. — P. 1097—1111. — DOI: [10.1103/PhysRevD.24.1097](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.24.1097). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.24.1097>.
6. Study of reactor anti-neutrino interaction with proton at Bugey nuclear power plant / Y. Declais [et al.] // *Phys. Lett. B*. — 1994. — Vol. 338. — P. 383—389. — DOI: [10.1016/0370-2693\(94\)91394-3](https://doi.org/10.1016/0370-2693(94)91394-3).
7. A study of the reaction  $\tilde{u} e + p \rightarrow e^{++} n$  on a nuclear reactor / A. Afonin [et al.] // *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 1988. — Vol. 67, no. 2. — P. 213.
8. Neutrino-oscillation experiments at the Gösigen nuclear power reactor / G. Zacek [et al.] // *Phys. Rev. D*. — 1986. — Nov. — Vol. 34, issue 9. — P. 2621—2636. — DOI: [10.1103/PhysRevD.34.2621](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.2621). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.34.2621>.
9. Search for Neutrino Oscillations at the Palo Verde Nuclear Reactors / F. Boehm [et al.] // *Phys. Rev. Lett*. — 2000. — Apr. — Vol. 84, issue 17. — P. 3764—3767. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.84.3764](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.3764). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.3764>.
10. *Mikaelyan, L. A.* Neutrino Laboratory in the Atomic Plant (fundamental) and applied research / L. A. Mikaelyan // *Proceedings of the International Conference “Neutrino-77”*. — 1978. — Vol. 2. — P. 383—387.
11. *Боровой, А. А.* О нейтринной диагностике внутриреакторных процессов / А. А. Боровой, Л. А. Микаэлян // *Препринт ИАЭ*. — 1975. — No. 2546.

12. *Боровой, А. А.* О возможности практического использования нейтрино / А. А. Боровой, Л. А. Микаэлян // Атомная энергия. — 1978. — Vol. 44, issue 6. — P. 508—511.
13. Измерение выгорания ядерного топлива в реакторе по нейтринному излучению / В. А. Коровкин [et al.] // Атомная энергия. — 1984. — Vol. 56. — P. 214—218.
14. Измерение энерговыработки энергетического реактора методом регистрации нейтрино / В. А. Коровкин [et al.] // Атомная энергия. — 1988. — Vol. 65, issue 3. — P. 169—173.
15. Дистанционное мониторингирование энерговыработки реактора по его нейтринному излучению, как возможное средство контроля ядерных материалов на РАЭС / С. Н. Кетов, И. В. Коннов, В. И. Копейкин, [et al.] // IAEA-SM-293. — Вена, 1986. — P. 124—126.
16. Nuclear Security Applications of Antineutrino Detectors: Current Capabilities and Future Prospects / A. Bernstein [et al.] // Sci. Global Secur. — 2010. — Vol. 18. — P. 127—192. — DOI: [10.1080/08929882.2010.529785](https://doi.org/10.1080/08929882.2010.529785). — arXiv: [0908.4338](https://arxiv.org/abs/0908.4338) [nucl-ex].
17. Neutrino Control of Reactors for the Implementation of the IAEA Safeguards Regarding Floating Nuclear Power Units / E. P. Velikhov [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2022. — Vol. 85. — P. 1380—1382. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:257498762>.
18. Improved predictions of reactor antineutrino spectra / T. A. Mueller [et al.] // Phys. Rev. C. — 2011. — May. — Vol. 83, issue 5. — P. 054615. — DOI: [10.1103/PhysRevC.83.054615](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.83.054615). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.83.054615>.
19. *Huber, P.* Determination of antineutrino spectra from nuclear reactors / P. Huber // Phys. Rev. C. — 2011. — Aug. — Vol. 84, issue 2. — P. 024617. — DOI: [10.1103/PhysRevC.84.024617](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.84.024617). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.84.024617>.
20. Reactor antineutrino anomaly / G. Mention [et al.] // Phys. Rev. D. — 2011. — Apr. — Vol. 83, issue 7. — P. 073006. — DOI: [10.1103/PhysRevD.83.073006](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.073006). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.83.073006>.
21. *Eroshenko, Y. N.* Physics news on the Internet (based on electronic preprints) / Y. N. Eroshenko // Phys. Usp. — 2023. — Vol. 66, no. 2. — P. 219—220. — DOI: [10.3367/UFNe.2023.01.039315](https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.01.039315). — URL: <https://ufn.ru/en/articles/2023/2/i/>.
22. Evolution of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2017. — June. — Vol. 118, issue 25. — P. 251801. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.118.251801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.251801). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.118.251801>.

23. Fuel-Composition Dependent Reactor Antineutrino Yield at RENO / G. Bak [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2019. — June. — Vol. 122, issue 23. — P. 232501. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.122.232501](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.232501). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.232501>.
24. *Mikaelyan, L.* Searches for sterile neutrinos at reactor / L. Mikaelyan, V. Sinev // Phys. Atom. Nucl. / ed. by Y. G. Abov. — 1999. — Vol. 62. — P. 2008—2012. — arXiv: [hep-ph/9811228](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9811228).
25. *Naumov, V. A.* Reactor Antineutrino Anomaly Reanalysis in Context of Inverse-Square Law Violation / V. A. Naumov, D. S. Shkirmanov // Universe. — 2021. — Vol. 7, no. 7. — DOI: [10.3390/universe7070246](https://doi.org/10.3390/universe7070246). — URL: <https://www.mdpi.com/2218-1997/7/7/246>.
26. *Kopeikin, V. I.* Spectrum of electronic reactor anti-neutrinos / V. I. Kopeikin, L. A. Mikaelyan, V. V. Sinev // Phys. Atom. Nucl. — 1997. — Vol. 60. — P. 172—176.
27. Measurement of the electron anti-neutrino spectrum of a nuclear reactor / Y. V. Klimov [et al.] // Sov. J. Nucl. Phys. — 1990. — Vol. 52. — P. 994—998.
28. Double Chooz project: Status of a reactor experiment aimed at searches for neutrino oscillations / V. I. Kopeikin [et al.] // Phys. Atom. Nucl. — 2009. — Vol. 72. — P. 279—285. — DOI: [10.1134/S1063778809020124](https://doi.org/10.1134/S1063778809020124).
29. Double Chooz  $\theta_{13}$  measurement via total neutron capture detection / H. de Kerret [et al.] // Nature Phys. — 2020. — Vol. 16, no. 5. — P. 558—564. — DOI: [10.1038/s41567-020-0831-y](https://doi.org/10.1038/s41567-020-0831-y). — arXiv: [1901.09445](https://arxiv.org/abs/1901.09445) [[hep-ex](https://arxiv.org/abs/hep-ex)].
30. Improved Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Chin. Phys. C. — 2017. — Vol. 41, no. 1. — P. 013002. — DOI: [10.1088/1674-1137/41/1/013002](https://doi.org/10.1088/1674-1137/41/1/013002). — arXiv: [1607.05378](https://arxiv.org/abs/1607.05378) [[hep-ex](https://arxiv.org/abs/hep-ex)].
31. Measurement of reactor antineutrino flux and spectrum at RENO / S. G. Yoon [et al.] // Phys. Rev. D. — 2021. — Vol. 104, no. 11. — P. L111301. — DOI: [10.1103/PhysRevD.104.L111301](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.L111301). — arXiv: [2010.14989](https://arxiv.org/abs/2010.14989) [[hep-ex](https://arxiv.org/abs/hep-ex)].
32. *Sinev, V. V.* Experimental spectrum of reactor antineutrinos and spectra of main fissile isotopes / V. V. Sinev // Phys. Atom. Nucl. — 2013. — Vol. 76. — P. 537—543. — DOI: [10.1134/S106377881304011X](https://doi.org/10.1134/S106377881304011X).
33. Determination of the antineutrino spectrum from  $^{235}\text{U}$  thermal neutron fission products up to 9.5 MeV / K. Schreckenbach [et al.] // Physics Letters B. — 1985. — Vol. 160, no. 4. — P. 325—330. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(85\)91337-1](https://doi.org/10.1016/0370-2693(85)91337-1). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269385913371>.
34. Antineutrino spectra from  $^{241}\text{Pu}$  and  $^{239}\text{Pu}$  thermal neutron fission products / A. A. Hahn [et al.] // Physics Letters B. — 1989. — Vol. 218. — P. 365—368. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:116898839>.

35. Reactor antineutrino spectra and their application to antineutrino-induced reactions II / P. Vogel [et al.] // Phys. Rev. C. — 1981. — Vol. 24, no. 4. — P. 1543—1553.
36. Спектр и сечение взаимодействия антинейтрино, излучаемых ядерным реактором / П. М. Рубцов [et al.] // Ядерная физика. — 1987. — Vol. 46, issue 4, no. 10. — P. 1028—1037.
37. Копейкин, В. И. Спектры электронов и антинейтрино от осколков деления  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  тепловыми и  $^{238}\text{U}$  быстрыми нейтронами / В. И. Копейкин // Ядерная физика. — 1980. — Vol. 32, issue 6, no. 12. — P. 1507—1513.
38. Live Chart of Nuclides. — URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.
39. Popov, D. V. Model for the Conversion of Beta Spectra from Fission Products of Uranium and Plutonium Isotopes into Antineutrino Spectra / D. V. Popov, M. D. Skorokhvatov // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2023. — Vol. 20, no. 1. — P. 1—9. — DOI: [10.1134/S1547477123010089](https://doi.org/10.1134/S1547477123010089).
40. Kopeikin, V. Reevaluating reactor antineutrino spectra with new measurements of the ratio between U235 and Pu239  $\beta$  spectra / V. Kopeikin, M. Skorokhvatov, O. Titov // Phys. Rev. D. — 2021. — Vol. 104, no. 7. — P. L071301. — DOI: [10.1103/PhysRevD.104.L071301](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.L071301). — arXiv: [2103.01684](https://arxiv.org/abs/2103.01684) [nucl-ex].
41. Uranium and Plutonium antineutrino spectra taken by summation method used to fit experimentally measured reactor antineutrino spectrum / V. Sinev [et al.]. — 2025. — May. — arXiv: [2505.11513](https://arxiv.org/abs/2505.11513) [nucl-ex].

Ингерман Светлана Владимировна  
Энергетические спектры антинейтрино  
продуктов деления  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$  в ядерном реакторе,  
рассчитанные с использованием экспериментальных данных

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 04.06.2026  
Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,2 Зак. № 026/26 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел  
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а