Оригинальная статья / Original article

УДК 539.1.074:543.42.062
https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-5-106-122

CC BY 4.0

Многодетекторный гамма-нейтронный спектрометр и результаты его макетирования

В.Э. Дрейзин[1], А.П. Кузьменко[1]✉, В.А. Пиккиев[1], Д.В. Левент[2], М.А. Пугачевский[1], А.В. Кочура[1], В.В. Родионов[1], И.Н. Лебедев[1], М.В. Нессонов[1]

[1] Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

[2] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
ул. 2-я Бауманская, д. 5/4, г. Москва 105005, Российская Федерация

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Резюме

Цель. *Разработка и исследование спектрометров нейтронного излучения реального времени с энергетическим диапазоном от тепловых до быстрых нейтронов.*

Методы. *В работе используются математическое моделирование, экспериментальные методы исследований, схемотехническое и конструкторское проектирование.*

Результаты. *Разработаны научные основы нового метода спектрометрии нейтронного излучения с произвольной формой энергетического спектра в диапазоне энергий от 0,001 эВ до 20 МэВ с восстановлением спектра измеряемого потока по откликам нескольких детекторов с различными спектральными характеристиками с помощью нейронной сети, обученной на выборке свыше 1000 спектров разнообразной формы.*

Разработана математическая модель нейтронного спектрометра и проведено её исследование с различными комбинациями детекторов. Определена оптимальная комбинация детекторов/измерительных каналов, обеспечивающая минимальную усреднённую по всем спектрам обучающей выборки ошибку восстановления спектров (~ 3%) при минимальном количестве используемых детекторов/измерительных каналов.

Разработана структура и математическое обеспечение автоматизированного испытательно-поверочного комплекса для проведения калибровки и поверки нейтронного спектрометра.

Разработан и изготовлен макетный образец гамма-нейтронного спектрометра-дозиметра с вторичной обработкой информации, получаемой от блока детектирования на ПК. Проведена настройка его измерительных каналов по радиационному фону радона и его продуктов распада и на нейтронной установке с плутоний-бериллиевым источником нейтронов в НИИ ЯФ МГУ.

Доказана работоспособность блока детектирования на высоте 20 км, получены графики зависимости скорости счёта всех измерительных каналов от высоты.

Заключение. *Проведенные экспериментальные исследования макетного образца многодетекторного гамма-нейтронного спектрометра-дозиметра подтвердили эффективность принятой концепции и справедливость положенных в ее основу теоретических положений, обосновывающих разработку промышленного образца.*

Ключевые слова: *нейтронное излучение; энергетический спектр; измерение; макет; настройка; радиационный фон.*

Финансирование: *Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (г/з 2020 № 0851–2020–0035), в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет–2030» (Соглашение № 075–15–2021–1213).*

© Дрейзин В.Э., Кузьменко А.П., Пиккиев В.А., Левент Д.В., Пугачевский М.А., Кочура А.В., Родионов В.В., Лебедев И.Н., Нессонов М.В., 2025

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Многодетекторный гамма-нейтронный спектрометр и результаты его макетирования / В.Э. Дрейзин, А.П. Кузьменко, В.А. Пиккиев, Д.В. Левент, М.А. Пугачевский, А.В. Кочура, В.В. Родионов, И.Н. Лебедев, М.В. Нессонов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 1. С. 106–122. https://doi.org/10.21869/ 2223-1528-2025-15-5-106-122.

Поступила в редакцию 25.12.2024 *Подписана в печать 30.01.2025* *Опубликована 20.03.2025*

Multidetector gamma-neutron spectrometer and results of its modeling

Valery E. Dreizin[1], Aleksander P. Kuzmenko[1] ✉, Valeryan A. Pikkiev[1], Denis V. Levent[2], Maksim A. Pugachevsky[1], Aleksey V. Kochura[1], Vladimir V. Rodionov[1], Ivan N. Lebedev[1], Mihail V. Nessonov[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

[2] Bauman Moscow State Technical University
2nd Baumanskaya Str., 5/4, Moscow 105005, Russian Federation

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Abstract

Purpose. *Development and study of real-time neutron radiation spectrometers with an energy range from thermal to fast neutrons.*
Methods. *The following methods are used in the work: mathematical modeling, experimental research methods, circuit and design engineering.*
Results. *The scientific basis for a new method of neutron radiation spectrometry with an arbitrary energy spectrum shape in the energy range from 0.001 eV to 20 MeV with the reconstruction of the measured flux spectrum based on the responses of several detectors with different spectral characteristics using a neural network trained on a sample of over 1000 spectrums of various shapes has been developed.*
A mathematical model of a neutron spectrometer has been developed and its study has been carried out with various combinations of detectors. An optimal combination of detectors/measuring channels has been determined, providing a minimum error in spectrum reconstruction averaged over all spectra of the training sample (~3%) with a minimum number of detectors/measuring channels used.
The structure and mathematical support for an automated test and verification complex for calibrating and verifying a neutron spectrometer have been developed.
A prototype of a gamma-neutron spectrometer-dosimeter with secondary processing of information received from the detection unit on a PC has been developed and manufactured. Its measuring channels have been adjusted for the radiation background of radon and its decay products and on a neutron setup with a plutonium-beryllium neutron source at the Research Institute of Nuclear Physics of Moscow State University.
The operability of the detection unit at an altitude of 20 km has been proven, graphs of the dependence of the count rate of all measuring channels on the altitude have been obtained.
Conclusion: *The conducted experimental studies of the prototype of the multi-detector gamma-neutron spectrometer-dosimeter confirmed the effectiveness of the adopted concept and the validity of the underlying theoretical principles justifying the development of the industrial prototype.*

Keywords: *neutron radiation; energy spectrum; measurement; prototype; setup; radiation background.*

Funding: *The study was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (g/z 2020 No. 0851–2020–0035), as part of the implementation of the strategic academic leadership program "Priority-2030" (Agreement No. 075–15–2021–1213).*

Conflict of interest: *The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Dreizin V.E., Kuzmenko A.P., Pikkiev V.A., Levent D.V., Pugachevsky M.A., Kochura A.V., Rodionov V.V., Lebedev I.N., Nessonov M.V. Multidetector gamma-neutron spectrometer and results of its modeling. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(1):106–122. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-106-122.

Received 25.12.2025 *Accepted 30.01.2025* *Published 20.03.2025*

***

Введение

Предлагаемая концепция создания многодетекторного гамма-нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени основана на восстановлении спектра измеряемого нейтронного потока по откликам нескольких детекторов с различными спектральными характеристиками с использованием заранее обученной на обширной выборке потоков со спектрами разнообразной формы нейронной сети [1]. В [2] описаны способы формирования спектральных характеристик детекторов и метод их расчёта. В [3] представлены в графическом виде результаты их расчёта.

В [4] выполнено математическое моделирование многодетекторного нейтронного спектрометра с различными комбинациями детекторов/измерительных каналов и представлены результаты исследования математической модели нейтронного спектрометра с различными комбинациями детекторов/измерительных каналов с расчётом ошибок восстановления спектров разнообразной формы всех реализаций обширной (1400 реализаций) обучающей выборки, определена оптимальная комбинация, обеспечивающая минимальную ошибку восстановления спектров (порядка 3%), усреднённой по 13 энергетическим интервалам всех реализаций обучающей выборки спектров.

Поскольку нейронная сеть работает с нормированными (на интегральную плотность потока) спектрами, то и восстановленные ею спектры представлены в нормированном виде. Чтобы перейти от нормированных значений спектральной плотности к их абсолютным значениям, необходимо знать интегральную плотность измеряемого потока, но её нельзя непосредственно измерить, т. к. не существует нейтронных детекторов, имеющих постоянную чувствительность в столь широком энергетическом диапазоне (реально она изменяется в зависимости от энергии нейтронов в тысячи раз). Поэтому в [4] описан способ корректного определения абсолютных значений спектральной плотности по нормированным значениям путём измерения абсолютного значения спектральной плотности тепловой составляющей нейтронного потока с использованием двух идентичных детекторов, чувствительных к медленным нейтронам, один из которых снабжён кадмиевым экраном, поглощающим тепловую составляющую измеряемых потоков. Используя метод кадмиевой разности, определяется абсолютное значение плотности тепловой составляющей измеряемого потока нейтронов и сопоставляется с её нормированным значением, определяемым по выходам нейронной сети. На найденный таким путём коэффициент соответствия умножаются все нормированные спектральные составляющие измеряемого потока, а их сумма даёт абсолютное значение спектральной плотности потока, свободное от энергетической погрешности.

Все сцинтилляционные нейтронные детекторы чувствительны и к гамма-излучению, а все реальные нейтронные потоки сопровождаются и гамма-излучением

(хотя потоки гамма-излучения могут существовать и без нейтронной составляющей) [5]. Поэтому специально исследовались возможные способы подавления чувствительности полистирольных нейтронных детекторов к гамма-излучению [6]. Ни по амплитуде, ни по длительности выходных импульсов нейтронных детекторов разделить импульсы от нейтронов и гамма-квантов невозможно, различаются лишь скорости спада их задних фронтов, но лишь для стильбена (органический кристалл), сцинтилляции которого имеют быструю и медленную составляющие. Полистирольные сцинтилляторы не имеют медленной составляющей и формы импульсов от разных частиц различаться не будут. Исследование формы импульсов стильбеновых детекторов от протонов (нейтроны непосредственно не взаимодействуют с атомами сцинтиллятора, взаимодействия только с ядрами атомов и выбивают из атомов водорода сцинтиллятора «протоны отдачи», которые, будучи заряженными частицами, ионизируют и возбуждают атомы сцинтиллятора), альфа-частиц и электронов (свободные электроны появляются в сцинтилляторе при ионизации их атомов протонами отдачи и гамма-квантами) было проведено в [5], где было показано, что задние фронты импульсов от этих частиц спадают с разной скоростью. Эти результаты использованы при разработке аппаратного метода подавления импульсов от гамма-квантов [6]. Они использованы в программном методе [7] разделения импульсов от нейтронов и гамма-квантов путём оцифровки каждого импульса с помощью сверхбыстродействующего АЦП. Но и аппаратный, и программный способы анализа формы выходных импульсов нейтронных детекторов, помимо существенного усложнения измерительной аппаратуры, приводят к ограничению измеряемой плотности потока из-за ограниченной скорости обработки формы каждого импульса. К тому же стильбеновый сцинтиллятор невозможно допировать бором-10. Поэтому метод разделения импульсов от нейтронов и гамма-квантов по их форме в многодетекторном спектрометре использовать невозможно.

Для решения этой проблемы было проведено моделирование зависимости чувствительности нейтронных полистирольных детекторов различной толщины от энергии гамма-квантов при различных толщинах сцинтиллятора и порогах амплитудной дискриминации их выходных импульсов [8]. Это позволило определить условия полного подавления их чувствительности к гамма-излучению в диапазоне его энергий от 0,03 до 5 МэВ и выше. Эти условия выполнены при подборе детекторов многодетекторного нейтронного спектрометра.

Изучение существующего метрологического обеспечения нейтронной спектрометрии [9] показало его неудовлетворительное состояние. Даже в двух действующих государственных эталонах Российской Федерации нейтронного потока и его плотности, хранителями которых являются ВНИИМ им. Менделеева (ГОСТ 8.031-82 ГСИ) и ВНИИФТРИ (ГЭТ 51-2017), не аттестуют его по спектру, не говоря уже о поверочных установках (ГОСТ 8.521-84 ГСИ). Промышленность выпускает лишь нейтронные радиометры, поверяемые на установках (ГОСТ 8.355-79 ГСИ) с неаттестованным спектром генерируемого нейтронного потока и погрешности измеряемой плотности потока и мощности дозы определяются относительно этого потока. На реальных потоках с другой формой спектра (а они могут быть весьма разнообразными) погрешности будут превышать паспортные значения в разы и даже в десятки раз. Поэтому не менее важной задачей является разработка достоверного метрологического обеспечения нейтронной спектрометрии, новый подход к которому рассмотрен в

[10]. Калибровка нейтронных спектрометров осуществляется в процессе обучения нейронной сети по обширной выборке (объёмом 1400 реализаций) спектров нейтронных источников самой разнообразной формы, а поверка – на спроектированной установке, позволяющей от одного первичного радиоизотопного источника нейтронов получать несколько десятков опорных нейтронных полей с достоверно известными спектрами различной формы. Оригинальность изложенных основных решений создания многодетекторного нейтронного спектрометра и его метрологического обеспечения подтверждена патентами Российской Федерации на изобретения 2779952 [11], 2780339 [12], 2780688 [13], 2782684 [14].

Материалы и методы

Для экспериментального подтверждения теоретических положений и результатов математического моделирования многодетекторного нейтронного спектрометра, изложенных выше, был разработан и реализован макетный образец гамма-нейтронного спектрометра.

Макетный образец разрабатывался в виде конструктивно раздельных многодетекторного блока детектирования и блока вторичной обработки информации, получаемой от блока детектирования и восстановления энергетических спектров гамма- и нейтронной составляющих смешанного потока и их отображениям на персональном компьютере (ПК). Такая архитектура макетного образца наиболее удобна для проведения регулировочных работ и отладки программного обеспечения прибора, а также существенно удешевляет изготовление макетного образца, поскольку требуется изготавливать лишь блок детектирования, а все остальные функции реализуются специальным программным обеспечением ПК. Фото макетного образца и структурная схема блока детектирования представлены на рисунке 1.

Блок детектирования включает 4 нейтронных детектора Д1 – Д4 в виде четырех полистирольных сцинтилляторов с фотоматрицами и электронными предварительными усилителями ПУ1 – ПУ4 с операционными усилителями УД1 – УД4.

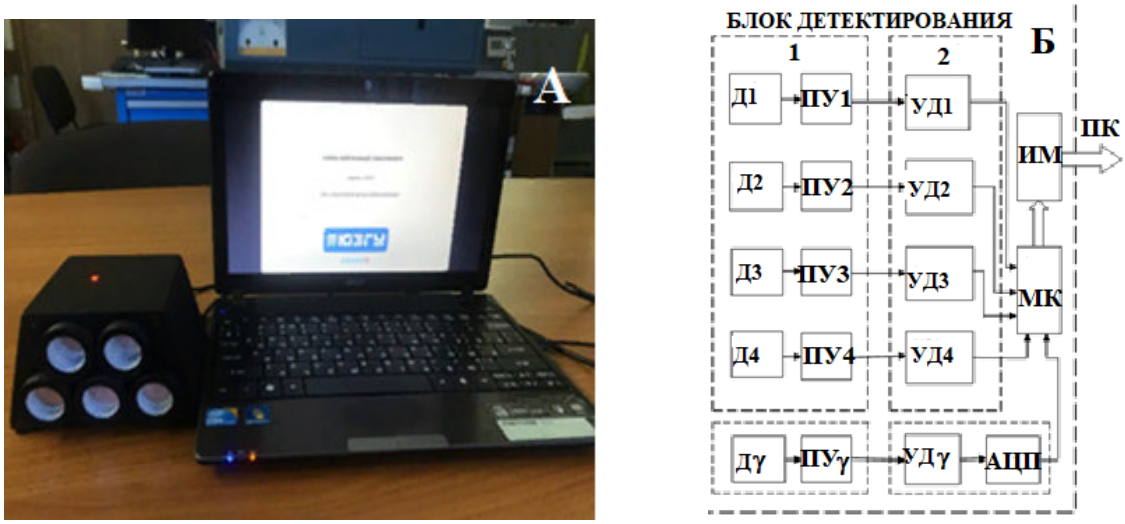

Рис. 1. Макетный образец многодетекторного γ-*n*-спектрометра: А – фотография макетного образца γ-*n*-спектрометра-дозиметра с ПК; Б – структурно-функциональная схема блока детектирования

Fig. 1. Model of a multi-detector γ-*n* spectrometer: A – photograph of a model of a γ-*n* spectrometer-dosimeter with a PC; B – structural and functional diagram of the detection unit

Детекторы Д1 и Д2 идентичны, имеют толщину 5 мм и допированы B-10, т. е. чувствительны к низкоэнергетическим нейтронам. Один из них закрыт кадмиевым экраном, исключающим воздействия тепловых нейтронов. Третий детектор, также допированный бором-10, имеет толщину 3 мм, а четвёртый толщиной 5 мм без допирования, за счёт чего они обладают различными спектральными характеристиками. Кроме того, блок детектирования снабжён детектором гамма-излучения с высокоскоростным АЦП, позволяющим определять распределение амплитуд импульсов от гамма-квантов, по которому восстанавливается спектр гамма-составляющей измеряемого смешанного потока. В детекторе гамма-излучения использован сцинтиллятор CsI(Tl).

Детектор без кадмиевого экрана имеет 4 порога амплитудной дискриминации выходных импульсов с порогами $0{,}1U_{\text{m}}$, $0{,}2U_{\text{m}}$, $0{,}3U_{\text{m}}$ и $0{,}4U_{\text{m}}$, где U_{m} – максимальная амплитуда импульсов данного измерительного канала. Таким образом, на этом детекторе сформированы четыре измерительных канала с различными спектральными характеристиками. Все остальные нейтронные детекторы имеют один порог амплитудной дискриминации, составляющий $0{,}1U_{\text{m}}$ в каждом канале. Соответственно, второй детектор будет иметь такую же спектральную характеристику, как первый детектор с порогом дискриминации $0{,}1U_{\text{m}}$, но с нулевой чувствительностью к тепловым нейтронам в диапазоне энергий 0,001–0,5 эВ. В третьем детекторе (толщиной 3 мм) уменьшена чувствительность к быстрым нейтронам, а четвёртый детектор (толщиной 5 мм, но без добавления в него бора-10) будет чувствителен лишь к быстрым нейтронам в диапазоне энергий 0,2–20 МэВ. Фактически реализованы 7 измерительных каналов на 4-х детекторах.

Выходы всех измерительных каналов (включая и измерительный канал γ-спектрометра) поступают на микроконтроллер (МК), который измеряет скорость счета (среднее за время измерения количество зарегистрированных импульсов) каждого измерительного канала.

Измеренные скорости счета всех 7 каналов поступают на входы нейронной сети, программно реализованной на базе ПК. Абсолютное значение плотности потока тепловых нейтронов в измеряемом потоке определяется в ПК путем вычитания скорости счета второго детектора из скорости счета идентичного канала первого детектора с учётом эффективностей регистрации тепловых нейтронов и площадей сцинтилляторов в них. Оно сопоставляется с ее нормированным значением, определенным нейронной сетью. По полученному коэффициенту соответствия определяются абсолютные значения всех остальных спектральных составляющих. Их сумма дает абсолютное значение интегральной плотности измеряемого потока с полностью исключённой энергетической погрешностью.

Измерительный канал γ-излучения уже в контроллере блока детектирования обеспечивает, помимо измерения скорости счёта импульсов от гамма-квантов, построение амплитудного распределения импульсов, которое в блоке вторичной обработки преобразуется в распределение по энергии, т. е. в энергетический спектр измеренного гамма-потока. Из-за небольшой толщины сцинтиллятора (10 мм) калибровочная характеристика может быть нелинейной в области энергий выше 1 МэВ, поэтому она должна быть измерена заранее и введена в память ПК. Калибровка гамма-канала по энергии производится на образцовых радиоизотопных источниках гамма-излучений с точно известными энергиями гамма-линий.

Результаты и их обсуждение

Калибровка и поверка нейтронного спектрометра должна осуществляться на спроектированном нами испытательно-поверочном комплексе [14]. На нём можно получить свыше 50 расчётных нормированных спектров нейтронных полей, формируемых за счёт использования дисков-замедлителей нейтронов разной толщины, устанавливаемых в толстостенный коллиматор из полиэтилена с образцовым радиоизотопным источником нейтронов. Из них выбрано 30 наиболее разнообразных по форме спектров и в дополнение к ним из литературы взяты 40 достоверно известных спектров различных реальных нейтронных источников. По каждому из этих 70 базовых спектров были синтезированы 30 модельных спектров путем задания в каждом энергетическом интервале случайной составляющей со среднеквадратическим отклонением спектральной плотности потока в этом интервале в 10%. По 20 из них создана обучающая выборка, а по 10 оставшимся сформирована контрольная выборка. Таким образом, объём обучающей выборки для обучения нейронной сети составил 1400 нормированных спектров, а её проверка на адекватность осуществлялась по 700 спектрам контрольной выборки. Достигнутая среднеквадратическая погрешность определения спектральных плотностей не превышала 3% и по обучающей, и по контрольной выборкам.

Однако поскольку реализовать испытательно-поверочный комплекс в условиях нашего вуза невозможно (требуются специальные помещения и лицензии для работы с мощными источниками ионизирующих излучений, не говоря уже о солидной стоимости такого комплекса), то настройка коэффициентов усиления и порогов амплитудной дискриминации измерительных каналов нейтронных детекторов в рамках настоящей работы была осуществлена по радиационному фону от радона, при распаде которого излучаются высокоэнергичные альфа- и бета-частицы. Настройка происходила в бетонном помещении, а бетон является достаточно сильным источником радона. Коэффициенты усиления нейтронных измерительных каналов настраивались таким образом, чтобы импульсы максимальной амплитуды каждого канала не ограничивались, а уровень собственных шумов ФЭУ был бы не менее чем на порядок ниже нижнего порога амплитудной дискриминации, который составлял 0,1 от максимальной амплитуды импульсов данного канала.

Для подтверждения возможности использования импульсов от альфа- и бета-частиц вместо импульсов от нейтронов было проведено моделирование в пакете GEANT-4 процессов высвечивания в полистирольных сцинтилляторах с толщиной до 10 мм. Оказалось, что длительность световых импульсов в сцинтилляторе не превышает долей наносекунды и состоит из нескольких пачек фотонов, возбуждаемых α-частицами и протонами отдачи, а также высокоэнергичными электронами, выбиваемыми из электронных оболочек атомов углерода высокоэнергичными протонами отдачи и электронами. Временные диаграммы образования фотонов от 10 нейтронов с энергиями 0,5 МэВ и 2 МэВ приведены на рисунках 2, а и б.

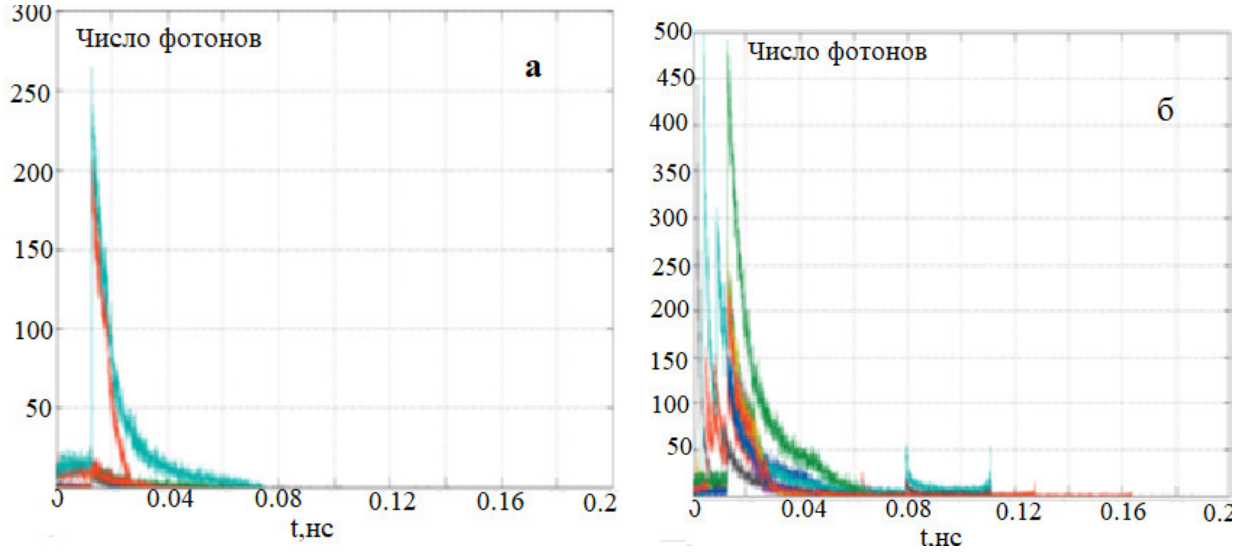

Рис. 2. Временная зависимость числа фотонов сцинтилляций при взаимодействии с нейтронами: а – с энергиями 0,5 МэВ; б – 2,0 МэВ

Fig. 2. Time dependence of the number of scintillation photons during interaction with neutrons: a – with energies of 0.5 MeV; б – 2.0 MeV

Нулевое время на этих рисунках соответствует моменту попадания нейтрона в сцинтиллятор. Из этого рисунка следует, что из 10 нейтронов с энергией 0,5 МэВ лишь два провзаимодействовали с ядрами B-10 с вылетом α-частицы, которая и порождает мощные сцинтилляции. Но почти все нейтроны с энергией 2 МэВ вызывали мощные вспышки, несмотря на малое сечение реакции их поглощения ядром атома B-10 (с ростом энергии нейтронов сечение реакции их взаимодействия ядрами B-10 падает, соответственно уменьшается и количество выбиваемых α-частиц), а это значит, что эти сцинтилляции порождены не α-частицами, а выбитыми из атомов водорода высокоэнергичными протонами отдачи и высокоэнергичными электронами, выбиваемыми протонами отдачи из атомов углерода. Это подтверждается анализом трассировки этих расчётов.

Теперь рассмотрим сцинтилляции, возбуждаемые высокоэнергичными α- и β-частицами радона и его ДПР. При нормальных условиях в воздухе средний пробег α-частиц с энергией от 2 до 10 МэВ составляет 3–9 см, а для β-излучения с энергией от 0,5 до 5 МэВ максимальный пробег составляет от 1 до 15 м. В твердом веществе они на несколько порядков меньше. В закрытое помещение ни α, ни β-частицы, как космического, так и земного происхождения, не проникают. Тем не менее в закрытом бетонном помещении нейтронные измерительные каналы нашего блока детектирования фиксировали импульсы высокой амплитуды со скоростью счёта 0,2–0,5 имп/с (соответствующая плотность потока 0,55–1,4 ч/(см^2·с)). Они могут порождаться только высокоэнергичными α- и β-частицами, излучаемыми при распаде радона, выделяющегося из бетона.

Два изотопа радона ^{222}Rn и ^{220}Rn являются продуктами распада ^{226}Ra и ^{224}Ra, которые, в свою очередь, являются продуктами распада естественных радиоизотопов ^{238}U и ^{232}Th. Уран и торий рассеяны по всей земной коре и содержатся во многих минералах и горных породах и вместе с ними попадают практически во все строи-

тельные материалы. Исследования различных жилых, служебных и производственных помещений на объёмную активность (ОА) и эквивалентную равновесную активность (ЭРОА) этих газов с их дочерними продуктами распада (ДПР), проводимые с нарастающей интенсивностью в последние три десятилетия (примером может служить [15]), показали, что в закрытых плохо проветриваемых помещениях эти показатели существенно превышают те же показатели на открытом воздухе в той же местности, причём в бетонных помещениях они в 3 раза выше, чем в кирпичных, а в кирпичных в 2 раза выше, чем в деревянных, где радон накапливается только из подстилающего грунта. Изотоп ^{220}Rn – продукт распада тория – получил название торон. Отметим, что радон и торон представляют до 50% суммарной дозы годового радиационного облучения населения, что в последние три десятилетия стимулировало исследования по измерению ОА и ЭРОА радона и торона в помещениях и защите населения от его излучений.

Мощность сцинтилляционных вспышек от α-частиц, вылетающих при распаде радона и торона, сравнима с мощностью вспышек от нейтронов той же энергии, т. е. применима для настройки коэффициентов усиления нейтронных измерительных каналов и порогов амплитудной дискриминации выходных импульсов детекторов. Основные характеристики распада этих радиоизотопов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные ядерно-физические характеристики распада радона, торона и их дочерних продуктов распада

Table 1. The principal nuclear physical properties of the decay process of radon, thoron, and their daughter products

Изотоп	$T_{1/2}$	Вид излучения	Энергия излучения, МэВ, (выход на 1 распад)	Пробег в воздухе, см
^{222}Rn	3,823 дн	α	5,490 (0,999)	3,8
^{218}Po	3,05 мин	α	6,003 (1)	4,4
^{214}Pb	23,8 мин	β (max) γ	1,024 (1,663) 0,352 (0,371), 0,295 (0,192)	307
^{214}Bi	19,9 мин	β (max) γ	3,270 (0,987) 1,765 (0,159), 1,120 (0,150), 0,609 (0,461)	1200
^{214}Po	164 мкс	α	7,687 (1)	6,3
^{220}Rn	55,6 с	α	6,288 (0,999)	5,0
^{216}Po	0,15 с	α	6,779 (1)	4,8
^{212}Pb	10,64 ч	β (max) γ	0,573 (1,775) 0,239 (0,446), 0,077 (0,179), 0,075 (0,107)	127
^{212}Bi	60,55 мин	α β	6,051 (0,359) 2,246 (1,057)	4,5 800
^{212}Po	0,3 мкс	α	8,785 (1)	7,2
^{208}Tl	3,07 мин	β (max) γ	1,795 (0,994) 2,615 (0,998), 0,860 (0,120), 0,583 (0,858), 0,511 (0,216)	680

Из неё следует, что энергии излучаемых радоном и его ДПР α-частиц лежат в диапазоне от 5,5 до 8,8 МэВ (энергия α-частиц всех изотопов, подверженных α-распаду, характеризуется дискретным спектром, индивидуальным для каждого радиоизотопа), тогда как β-излучение характеризуется непрерывным энергетическим спектром, поскольку энергия распада случайным образом распределяется между вылетающими бета-частицей (электроном или позитроном) и нейтрино. Индивидуальной характеристикой для каждого радиоизотопа при β-распаде является энергия β-переходов, соответствующая максимальной энергии β-частиц, которая для радона и его ДПР лежит в диапазоне 0,5–3,3 МэВ (в скобках в таблице 1 указаны выходы соответствующих реакций α-распада и β-переходов (в % к полной энергии соответствующего распада).

Лабораторные испытания многодетекторного γ-*n*-спектрометра были выполнены с помощью запоминающего осциллографа с полосой пропускания до 500 МГц. Фотодиодные матрицы MICROFC-60035-SMT-TR1, C-SERIES 6MM 35U MLP, выполняющие функции ФЭУ, включались по нормальному выходу. На рисунке 3, *а* представлены осциллограммы выходных сигналов одного из измерительных каналов при развёртке 200 мкс/дел. На сплошном фоне от самой фотоматрицы на уровне 50 мВ видны импульсы от регистрируемых частиц. На рисунке 3, *б* приведена осциллограмма ограниченного по амплитуде импульса при чрезмерно высоком коэффициенте усиления канала. Ограничение по уровню 3,3 В определяется напряжением питания операционных усилителей УД1 – УД4, используемых в каналах блока детектирования. На рисунке 3, *в* показан импульс с нормальным коэффициентом усиления. Наибольший интерес представляют редко встречающиеся сдвоенные импульсы (с двумя вершинами) (рис. 3, г). Предположительно, это импульсы от распада изотопа ^{212}Bi, который распадается по двум ветвям: α-распада с энергией 6,051 МэВ и выходом 0,359 МэВ и β-распада с 2,246 МэВ и выходом 1,057. При одновременном α- и β-распаде этого изотопа β-частица имеет крутой передний фронт импульса и большую амплитуду (т. к. длина пробега таких β-частиц в воздухе почти в 200 раз больше, чем α-частиц. Таким образом, обнаружено запаздывание α-частицы со значительно уменьшенной энергией (за счет торможения в воздухе), характеризуемое суммарным импульсом с менее крутым передним фронтом и весьма пологим задним фронтом.

Проверка настройки всех нейтронных измерительных каналов многодетекторного γ-*n*-спектрометра на частицах, излучаемых при распаде радона и торона и их ДПР, была выполнена на нейтронной испытательной установке НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова с плутоний-бериллиевым источником, подтвердившая ее применимость для предварительной настройки нейтронных измерительных каналов.

Многодетекторный γ-*n*-спектрометр при подъеме на высоту до 20 км на стратостате подтвердил работоспособность и надежность работы в режиме непрерывной регистрации скорости счёта по всем измерительным каналам. На рисунке 4 продемонстрированы некоторые результаты этих измерений. Регистрировались как сами импульсы, так и скорости счёта. На рисунке 4, а представлены измерения детектором Д1 со сцинтиллятором с добавлением B-10 с чувствительностью и к медленным, и к быстрым нейтронам с наибольшей скоростью счёта. Скорость счета детектора со сцинтиллятором без добавления B-10, чувствительного только к быстрым нейтронам (рис. 4, б), как и следовало ожидать, оказалась меньшей. Для детектора с добавлением B-10 со сцинтиллятором, закрытым кадмиевым

экраном, поглощающим тепловые нейтроны с энергией менее 0,5 эВ, данные приведены на рисунке 4, в. Из сравнения спектров, приведенных на рисунках 4, а и в, следует, что пиковые значения скорости счета на высотах 1 и 6 км обусловлены именно тепловыми нейтронами (на представленных спектрах использовались разные масштабы скорости счета). На рисунке 4, б с данными только по быстрым нейтронам пики скорости счета на высотах 1 и 6 км отсутствовали.

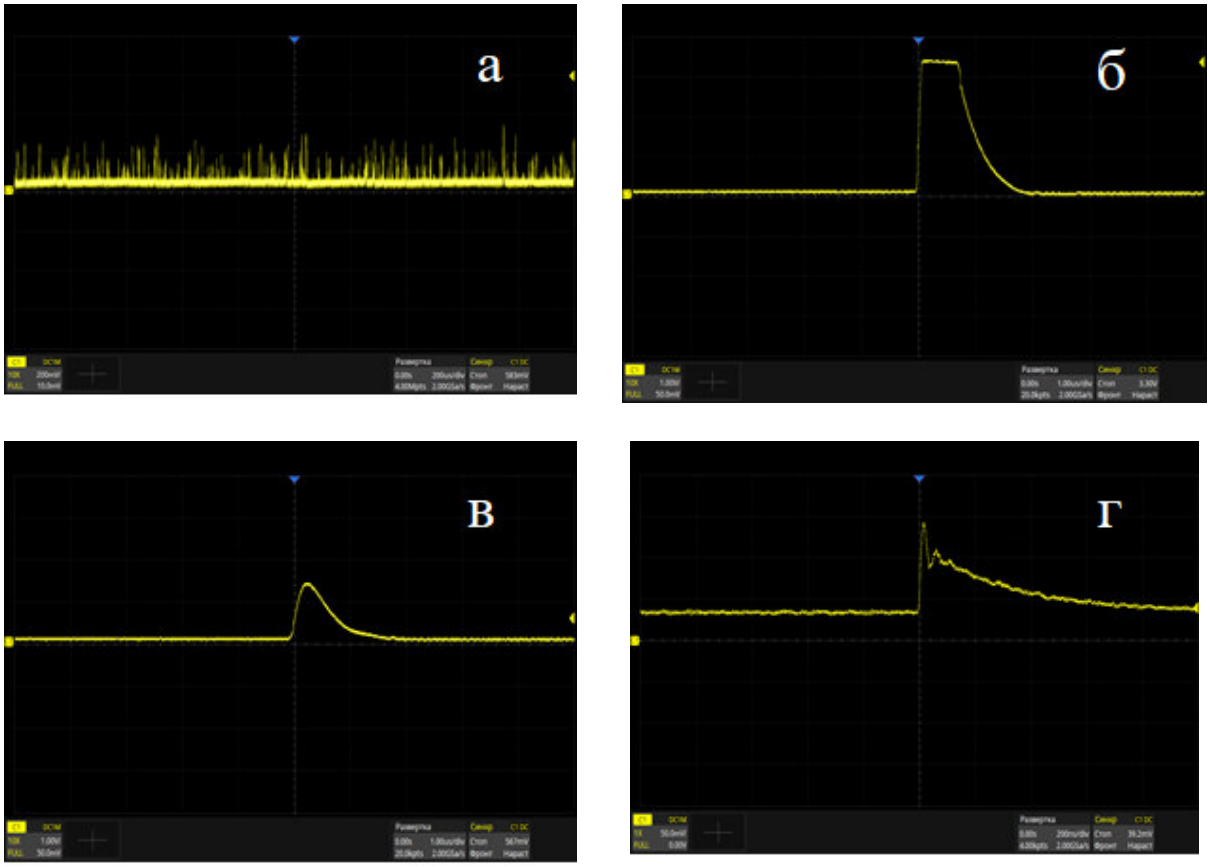

Рис. 3. Осциллограммы регистрируемых импульсов от РдФ: а – РдФ, развёртка 200 мкс/дел; б, в – импульсы с большим и пониженным коэффициентом усиления при развёртке 1 мкс/дел; г – сдвоенный импульс при развёртке 200 нс/дел

Fig. 3. Oscillograms of the recorded pulses from the RDF: a – RDF, sweep 200 μs/div; б, в – pulses with high and low gain at a sweep of 1 μs/div; г – double pulse at a sweep of 200 ns/div

Габариты многодетекторного γ-*n*-спектрометра-дозиметра допускают его размещение на стандартном наноспутнике CubeSat объёмом в 1 дм^3, т. е. перспективно его использование для исследований нейтронных и гамма-полей в верхних слоях атмосферы на высотах 150–500 км с помощью наноспутников. Получаемая при этом информация, транслируемая на землю, может обрабатываться с помощью наземной аппаратуры, производящей те же операции, которые реализованы в ПК данного макетного образца.

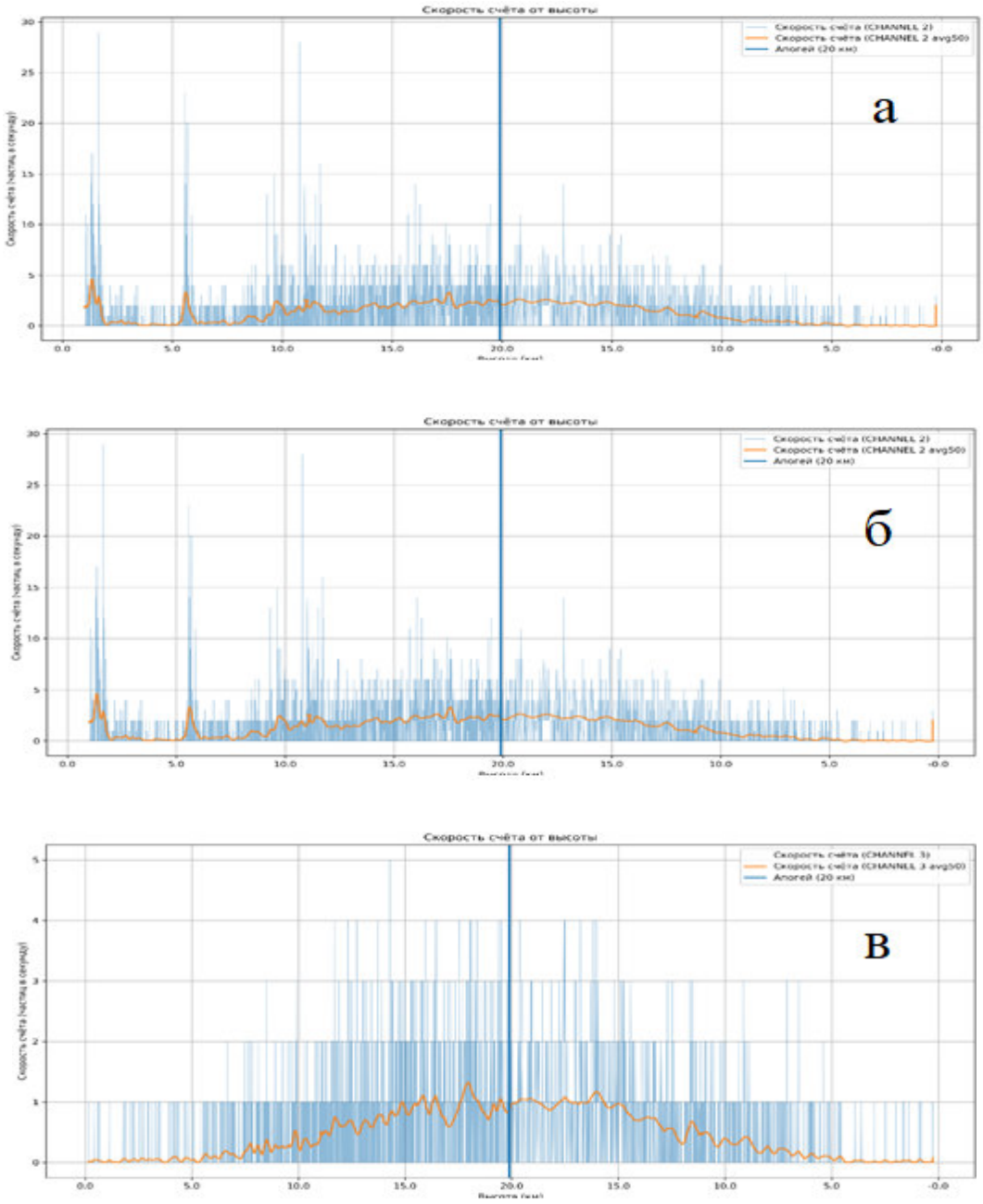

Рис. 4. Скорость счёта некоторых нейтронных каналов спектрометра при подъёме на аэростате в стратосферу на высоту 20 км

Fig. 4. The neutron channel counting rate of the spectrometer during the balloon ascent to the stratosphere

Выводы

1. Разработаны научные основы создания первого в мире нейтронного спектрометра реального времени с энергетическим диапазоном измеряемых потоков нейтронов от 0,001 эВ до 20 МэВ, перекрывающим весь возможный диапазон энергии реальных нейтронных потоков в атомной отрасли.

2. Разработан новый подход к метрологическому обеспечению нейтронной спектрометрии, обеспечивающий полное исключение энергетических погрешностей при любых формах энергетических

спектров измеряемых нейтронных потоков, базирующийся на проведении калибровки спектрометра по множеству (свыше тысячи) нейтронных полей с разнообразными формами энергетических спектров.

3. Разработан проект испытательно-поверочного комплекса для проведения калибровки и поверки нейтронных спектрометров и проведен расчёт создаваемых им опорных нейтронных полей с различными формами энергетических спектров.

4. Оригинальность технических решений этих задач подтверждена четырьмя патентами на изобретения.

5. Разработан и изготовлен макетный образец гамма-нейтронного спектрометра, проведены его лабораторные испытания, показана возможность настройки измерительных каналов нейтронного спектрометра по высокоэнергичному α- и β-излучению радона и его ДПР, позволяющая проводить её в обычных помещениях без использования специальных источников нейтронного излучения.

6. Выполнено испытание макетного образца для измерения нейтронных и γ-полей в стратосфере на высотах до 20 км путём установки блока детектирования на стратостате, показавшее надёжную работу всех его измерительных каналов.

Список литературы

1. Dreyzin V.E., Grimov A.A., Logvinov D.I. Real time multidetectors neutron spectrometer // Journal of applied spectroscopy. 2016. Vol. 83, no. 3. P. 454-459.

2. Dreyzin V.E., Grimov A.A., Logvinov D.I. Scintillation neutron detectors with different spectral characteristics // Journal of Applied Spectroscopy. 2017. Vol. 83, no. 6. P. 1001-1006.

3. Формирование и расчёт спектральных характеристик сцинтилляционных нейтронных детекторов / В.Э. Дрейзин, Д.И. Логвинов, А.А. Гримов, А.П. Кузьменко // АНРИ. 2022. № 3 (110). С. 21–31.

4. Моделирование и оптимизация состава детекторов в многодетекторном нейтронном спектрометре реального времени / В.Э. Дрейзин, Д.И. Логвинов, А.А. Гримов, А.П. Кузьменко // АНРИ. 2022. №4 (111). С. 33–43.

5. Райлли Д. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. Ч. 1 / под ред. Д. Райлли, Н. Энскина, Х. Смита, С. Крайнера. М.: ВНИИА, 2007. 436 с.

6. Колеватов В.И., Семёнов В.П., Трыков Л.А. Спектрометрия нейтронов и γ-излучения в радиационной физике. М.: Энергоатомиздат, 1991. 296 с.

7. Моисеев Н.Н., Дидык А.В. Исследование сцинтилляционного спектрометра-дозиметра γ-квантов и быстрых *n* // АНРИ. 2016. № 4. С. 24–30.

8. Исследование и подавление чувствительности нейтронных сцинтилляционных детекторов к гамма-излучению / В.Э. Дрейзин, Д.И. Логвинов, А.А. Гримов, А.П. Кузьменко // АНРИ. 2022. № 4 (111). С. 22–32.

9. Брегадзе Ю.И., Степанов Э.К., Ярына В.П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1990. 264 с.

10. Обеспечение достоверности измерений параметров нейтронного излучения / В.Э. Дрейзин, Д.И. Логвинов, А.А. Гримов, В.В. Варганов // Измерительная техника. 2021. № 5. С. 53–60.

11. Способ и устройство формирования спектральных характеристик измерительных каналов нейтронных детекторов: патент 2780688 Российская Федерация / Дрейзин В. Э., Логвинов Д. И., Гримов А. А., Кузьменко А. П. № 2021136421; заявл. 10.12.2021; опубл. 29.09.2022, Бюл. № 28. 12 с.

12. Способ измерения энергетического спектра и дозовых характеристик нейтронного излучения в реальном времени и устройство его реализации детекторов: патент 2780339 Российская Федерация / Дрейзин В. Э., Логвинов Д. И., Гримов А. А., Кузьменко А. П.; № 20211364331; заявл. 10.12.2021; опубл. 21.09.2022. Бюл. № 27. 19 с.: ил.

13. Способ калибровки многодетекторных нейтронных спектрометров-дозиметров с вычислительным восстановлением энергетических спектров измеряемых потоков: патент 2779952 Российская Федерация / Дрейзин В. Э., Логвинов Д. И., Гримов А. А., Кузьменко А. П. № 2021136429; заявл. 10.12.2021; опубл. 21.09.2022. Бюл. № 26. 9 с.

14. Способ и устройство поверки нейтронных спектрометров-дозиметров в опорных нейтронных полях с различной формой спектров: патент 2782684 Российская Федерация / Дрейзин В. Э., Логвинов Д. И., Гримов А. А., Кузьменко А. П. № 2021136426; заявл. 10.12.2021; опубл. 21.09.2022. Бюл. № 31. 21 с.

15. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 231 с.

16. Mustonen R. Method for evaluation of radiation from building materials. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 1984. Vol. 7, no. 1-4. P. 235-238.

17. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 118 с.

18. Радиологическая защита от облучения радоном. Перевод публикации 126 МКРЗ. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБФ России», 2015. 92 с.

19. Onischenko A.D., Zhukovsky M.V., Izgagin V.S. A pilot study of indoor thoron and 212Pb concentrations in residential building in Ekaterinburg, Russia // *I. Radional. Nucl. Chem*. 2022. Vol. 331. P. 851-858.

20. A multi-detector NaI(Tl) gamma-ray spectrometry system for investigation of neutron induced capture and fission reactions / I. Ruskov, Yu.N. Kopach, V. Skoy, F-J. Hambsch, S. Oberstedt // Physics Procedia. 2014. Vol. 59. P. 107-113.

21. Arnqvist E. Utilizing measurements of induced radioactivity in elements for neutron spectrum unfolding. Uppsala Universitet, 2024. 55 p.

22. TANGRA multidetector systems for investigation of neutron-nuclear reactions at the JINR Frank Laboratory of Neutron Physics / I. Ruskov, Y. Kopach, V. Bystritsky, V. Skoy, D. Grozdanov, N. Fedorov [et al.] // EPJ Web of Conferences. 2021. Vol. 256. P. 00014.

References

1. Dreyzin V.E., Grimov A.A., Logvinov D.I. Real time multidetectors neutron spectrometer. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2016;83(3):454-459. (In Russ.)

2. Dreyzin V.E., Grimov A.A., Logvinov D.I. Scintillation neutron detectors with different spectral characteristics. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2017;83(6):1001-1006. (In Russ.)

3. Dreizin V.E., Logvinov D.I., Grimov A.A., Kuzmenko A.P. Formation and calculation of spectral characteristics of scintillation neutron detectors. *ANRI*. 2022;(3):21-31. (In Russ.)

4. Dreizin V.E., Logvinov D.I., Grimov A.A., Kuzmenko A.P. Modeling and optimization of the composition of detectors in a multi-detector real-time neutron spectrometer. *ANRI*. 2022;(4):33-43. (In Russ.)

5. Reilly D. Passive non-destructive analysis of nuclear materials. Part 1. Moscow: VNIIA; 2007. 436 p. (In Russ.)

6. Kolevatov V.I., Semenov V.P., Trykov L.A. Spectrometry of neutrons and γ-radiation in radiation physics. Moscow: Energoatomizdat; 1991. 296 p. (In Russ.)

7. Moiseev N.N., Didyk A.V. Study of a scintillation spectrometer-dosimeter of γ-quanta and fast n. *ANRI*. 2016;(4): 24-30. (In Russ.)

8. Dreizin V.E., Logvinov D.I., Grimov A.A., Kuzmenko A.P. Research and inhibiion of the sensitivity of neutron scintillation detectors to gamma radiation. *ANRI*. 2022;(4):22-32. (In Russ.)

9. Bregadze Yu.I., Stepanov E.K., Yaryna V.P. Applied metrology of ionizing radiation. Moscow: Energoatomizdat; 1990. 264 p. (In Russ.)

10. Dreizin V.E., Logvinov D.I., Grimov A.A., Varganov V.V. Ensuring the reliability of neutron radiation parameter measurements. *Measuring Equipment*. 2021;(5):53-60. (In Russ.)

11. Dreizin V.E., Logvinov D.I., Grimov A.A., Kuzmenko A.P. Method and device for generating spectral characteristics of measuring channels of neutron detectors. Russian Federation patent 2780688. 29 September 2022. (In Russ.)

12. Dreizin V.E., Logvinov D.I., Grimov A.A., Kuzmenko A.P. Method for measuring the energy spectrum and dose characteristics of neutron radiation in real time and a device for implementing it in detectors. Russian Federation patent 2780339. 21 September 2022. (In Russ.)

13. Dreizin V.E., Logvinov D.I., Grimov A.A., Kuzmenko A.P. Method for calibrating multidetector neutron spectrometers-dosimeters with computational reconstruction of energy spectra of measured fluxes. Russian Federation patent 277952. 21 September 2022. (In Russ.)

14. Dreizin V.E., Logvinov D.I., Grimov A.A., Kuzmenko A.P. Method and device for verifying neutron spectrometers-dosimeters in reference neutron fields with different spectral shapes. Patent Russian Federation 2782684. 21 September 2022. (In Russ.)

15. Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V. Radon: measurement, doses, risk assessment. Ekaterinburg: URO RAN; 1997. 231 p. (In Russ.)

16. Mustonen R. Method for evaluation of radiation from building materials. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 1984;7(1-4):235-238.

17. Krisyuk E.M. Radiation background of premises. Moscow: Energoatomizdat; 1989. 118 p.

18. Radiological protection against radon exposure. Translation of ICRP publication 126. Moscow: Izd-vo "FGBU GNTS FMBTS im. A. I. Burnazyana FMBF Rossii"; 2015. 92 p.

19. Onischenko A.D., Zhukovsky M.V., Izgagin V.S. A pilot study of indoor thoron and 212Pb concentrations in a residential building in Ekaterinburg, Russia. *I. Radional. Nucl. Chem*. 2022; 331:851-858.

20. Ruskov I., Kopach Yu.N., Skoy V., Hambsch F-J., Oberstedt S. A multi-detector NaI(Tl) gamma-ray spectrometry system for investigation of neutron induced capture and fission reactions. *Physics Procedia*. 2014;59:107-113.

21. Arnqvist E. Utilizing measurements of induced radioactivity in elements for neutron spectrum unfolding. Uppsala University; 2024. 55 p.

22. Ruskov I., Kopach Y., Bystritsky V., Skoy V., Grozdanov D., Fedorov N., et al. TANGRA multidetector systems for investigation of neutron-nuclear reactions at the JINR Frank Laboratory of Neutron Physics. *EPJ Web of Conferences*. 2021;256:00014.

Информация об авторах / Information about the Authors

Дрейзин Валерий Элезарович, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: drejzin-ve@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-4818-565X

Valery E. Dreyzin, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: drejzin-ve@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-4818-565X

Кузьменко Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: apk3527@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-7089-0692

Alexander P. Kuzmenko, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: apk3527@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-7089-0692

Пиккиев Валериан Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: rw3ww@mail.ru,
ORCID: 0009-0001-4407-2853

Valeryan A. Pikkiev, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Computer Science, Southwest State University, Russian Federation,
e-mail: rw3ww@mail.ru ,
ORCID: 0009-0001-4407-2853

Левент Денис Вейсиевич, студент, Московсикй государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: dlevent@list.ru,
ORCID: 0009-0006-2404-5029

Denis V. Levent, Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation,
e-mail: dlevent@list.ru,
ORCID: 0009-0006-2404-5029

Пугачевский Максим Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, директор Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: pmaximal@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-5004-0823

Maksim A. Pugachevskii, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor at the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Director of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: pmaximal@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-5004-0823

Кочура Алексей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: akochura@mail.ru,
ORCiD 0000-0002-7941-8404

Aleksey V. Kochura, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Deputy Director of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: akochura@mail.ru,
ORCID 0000-0002-7941-8404

Родионов Владимир Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: vovarodionov2009@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-1893-1941

Vladimir V. Rodionov, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: vovarodionov2009@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-1893-1941

Лебедев Иван Николаевич, студент кафедры нанотехнологий, микропроцессорной техники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: inlebedewlebedev@yandex.ru,
ORCID: 0009-0006-2616-6908

Нессонов Михаил Владимирович, студент кафедры нанотехнологий, микропроцессорной техники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: mihailnessonov@yandex.ru,
ORCID: 0009-0007-7000-9616

Ivan N. Lebedev, Student of the Department of Nanotechnology, Microprocessor Technology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: inlebedewlebedev@yandex.ru,
ORCID: 0009-0006-2616-6908

Mihail V. Nessonov, Student of the Department of Nanotechnology, Microprocessor Technology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: mihailnessonov@yandex.ru,
ORCID: 0009-0007-7000-9616