



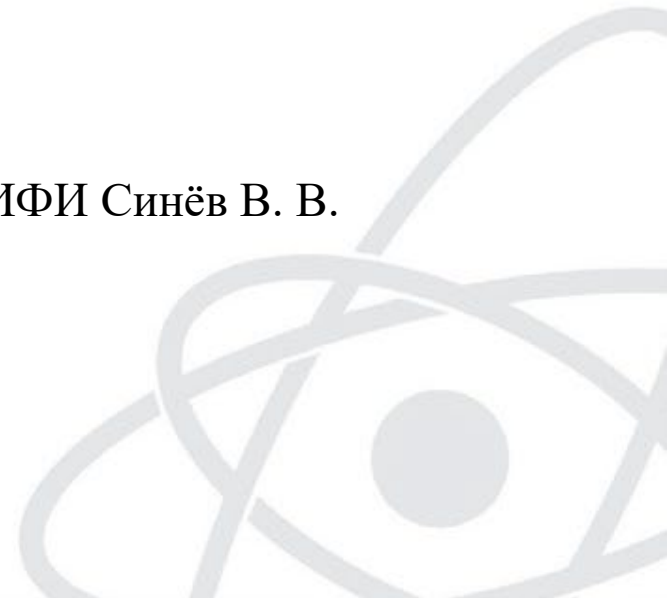
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Изучение стабильности периода полураспада ^{40}K при помощи сцинтилляционного спектрометра NaI(Tl)

Выполнил: студент гр. Б22-104 Исаичева П.В.

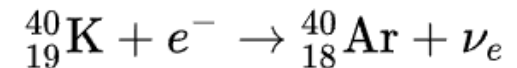
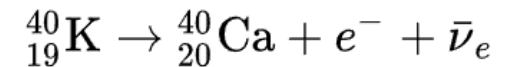
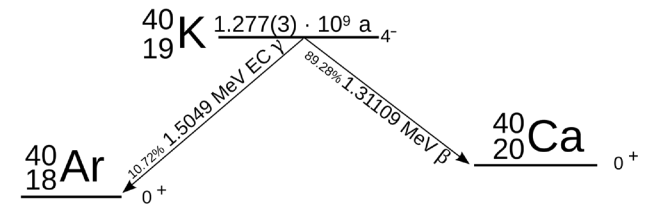
Научный руководитель: д.ф-м.н., доцент каф.11 НИЯУ МИФИ Синёв В. В.

Москва, 2026



Введение и актуальность

- Калий-40 (^{40}K) — ключевой природный радионуклид (геохронология, радиоэкология).
- Его период полураспада (~ 1.25 млрд лет) - фундаментальная константа.



Цель работы

Экспериментальное определение $T_{1/2}$ ^{40}K в КОН с использованием корреляционной спектromетрии и компьютерного моделирования.

Новизна:

- Корреляционные измерения на двух идентичных детекторах NaI(Tl) для минимизации систематики.
- Физически строгое вычитание фона с помощью образцов NaCl.
- Валидация методики полномасштабным моделированием в GEANT4.

Ключевые задачи:

- Проведение серийных измерений образцов KOH и фона (NaCl).
- Разработка ПО для анализа спектров в ROOT.
- Статистическая проверка и моделирование.
- Моделирование установки в GEANT4 для оценки фона.
- Расчёт $T_{1/2}$ и сравнение с литературой.
- Систематизация и представление результатов.

Экспериментальная установка и методика

- Два идентичных детектора NaI(Tl) ($\text{Ø}40 \times 63$ мм).
- Расположены ниже уровня земли, в свинцовой защите, разделены свинцовой перегородкой.
- **Геометрия:** Четыре пластиковых короба с KOH/NaCl, окружающих корпус детектора.
- Длительные измерения (декабрь 2025 — май 2026) для набора статистики.

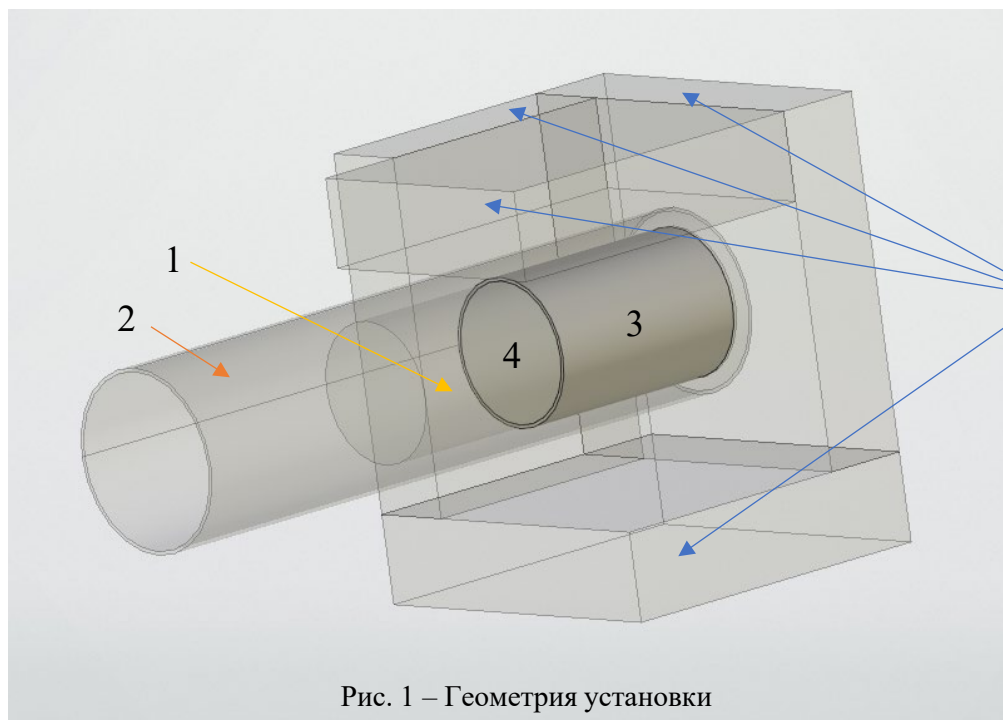
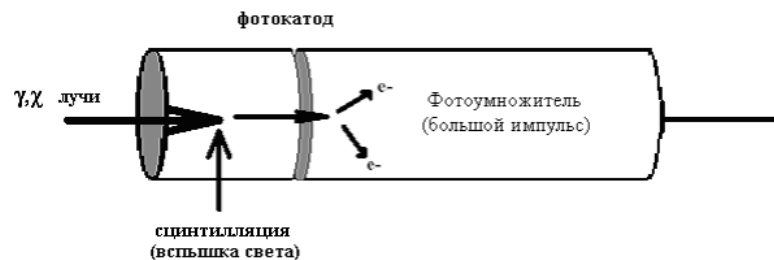


Рис. 1 – Геометрия установки



- 1 – ФЭУ
- 2 – Алюминиевый корпус
- 3 – Оргстеклянная оболочка
- 4 – Сцинтилляционный кристалл NaI(Tl)
- 5 – Образцы KOH (NaCl)

Экспериментальная установка и методика

а



б

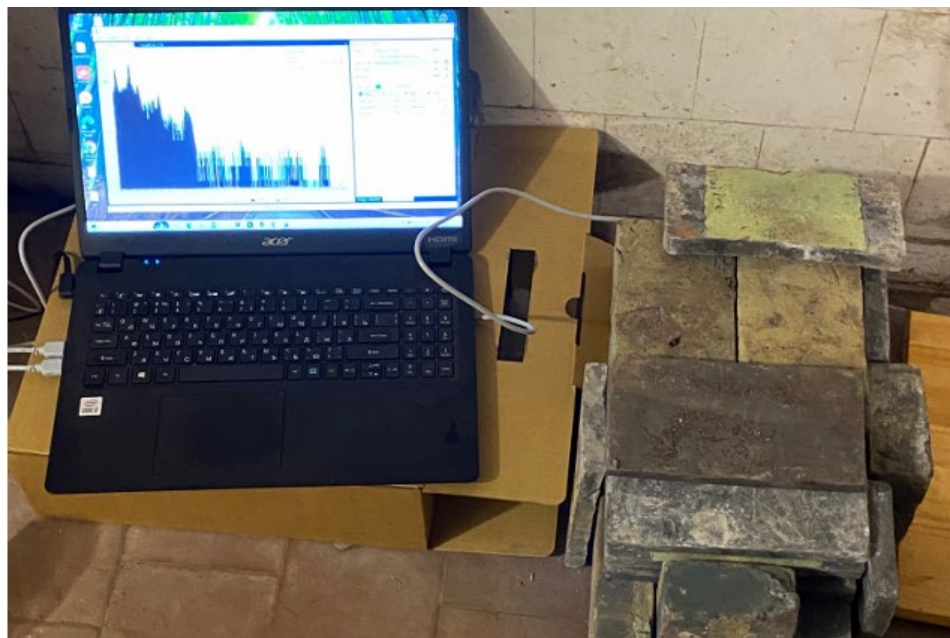


Рис. 2а,б – Фото реальной установки, а – ФЭУ и сцинтиллятор, б – детектор с изучаемыми образцами внутри свинцового короба

Экспериментальная установка и методика

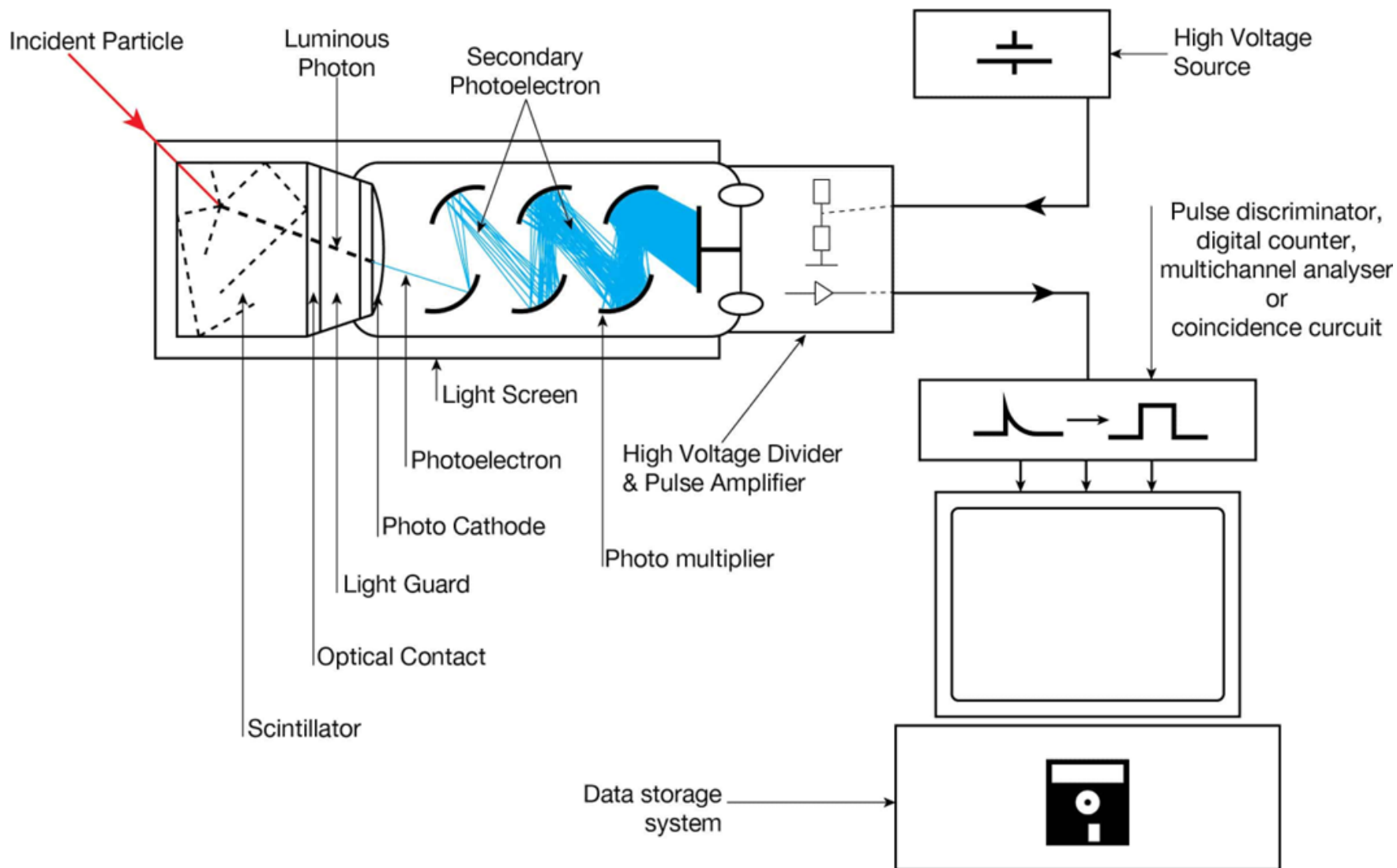


Рис. 3 – Схема сцинтилляционного спектрометра

Объект исследования и методика

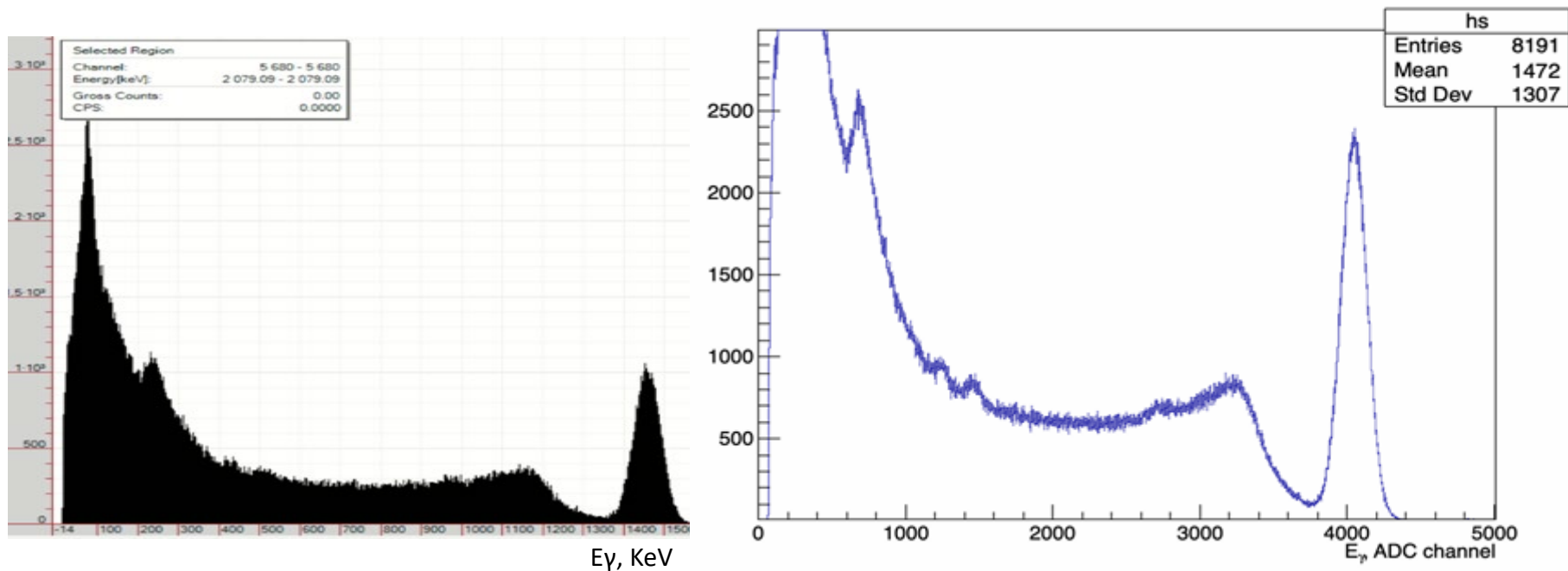


Рис. 4 – Полученные спектры ^{40}K , реальный со спектрометра (слева), прошедший программную обработку (справа)

Программный анализ данных

- Разработан макрос на C++ с реализацией в ROOT для обработки спектров.
- Модель фитирования пика 1460.8 КэВ: Гаусс + асимметричные компоненты для учёта реальной формы отклика NaI(Tl).
- Учёт фона - вычитание смоделированного вклада фонового ^{40}K из NaCl и конструкции.
- Цель - точно определить чистую скорость счета от целевого образца.

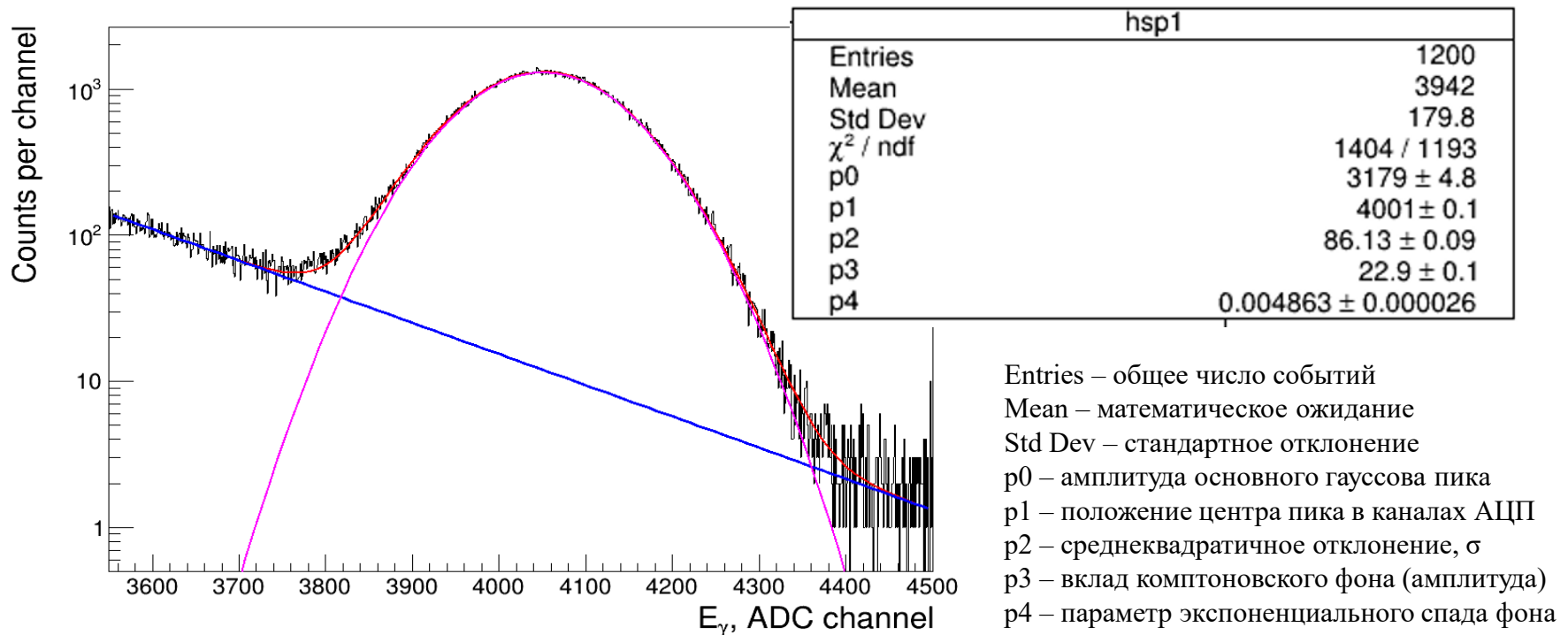
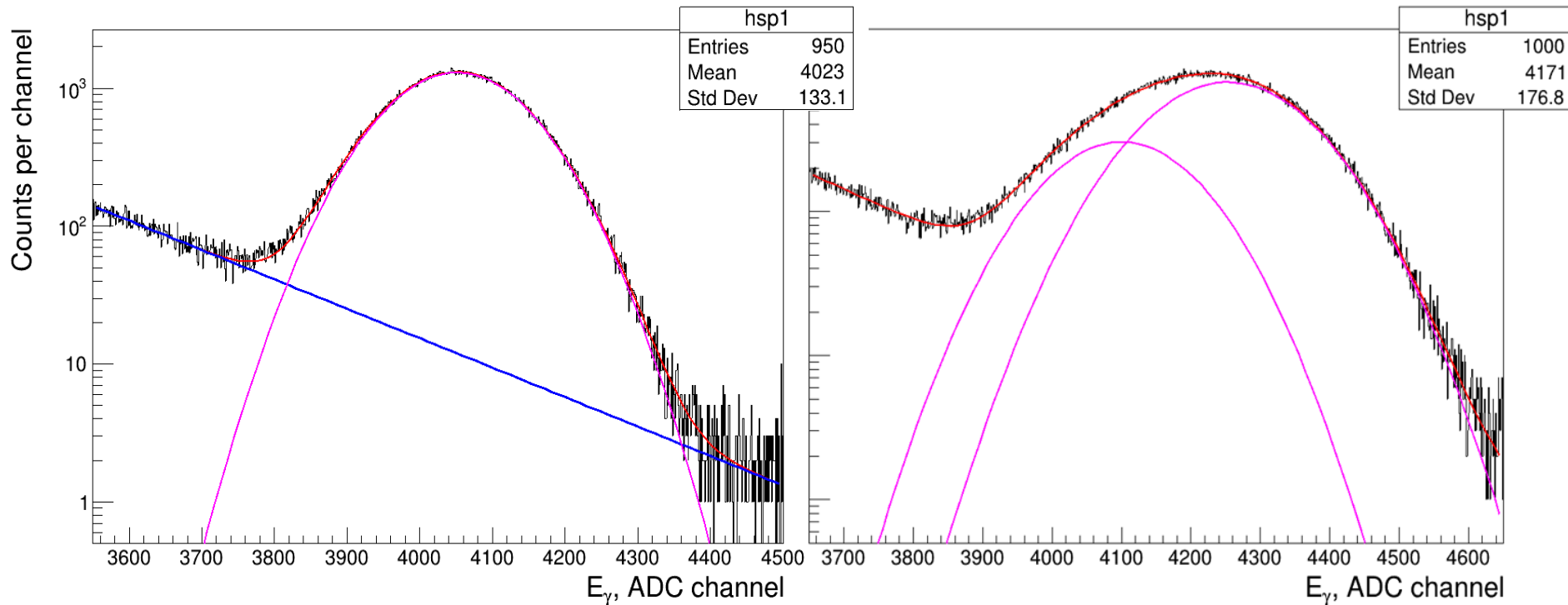


Рис. 5 – Визуализация фитирования спектра

Программный анализ данных

Функционал макроса:

- Чтение ключевых параметров пика из XML-файла (живое время измерения, дату и время старта, массив счётчиков по каналам АЦП и пр.)
- Модель фитирования: экспоненциальная функция, описывающая комптоновский фон, аппроксимация ППП с помощью функции(й) Гаусса.
- Автоматический расчёт интегральной площади под пиком полного поглощения с вычитанием фона.
- Вычисление скорости счёта в ППП.

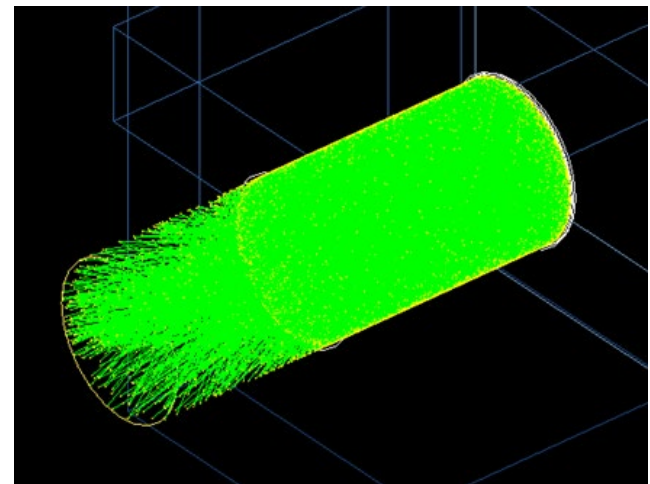
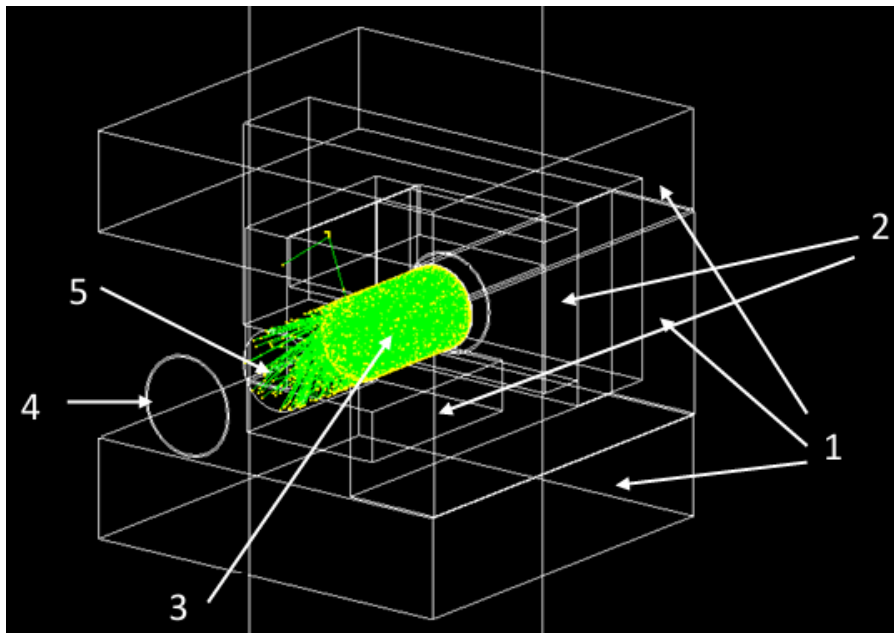


Компьютерное моделирование в GEANT4

Создана детализированная модель всей установки: кристаллы NaI(Tl) со сцинтилляционными свойствами, отражающие оболочки, корпуса, ФЭУ, образцы KOH/NaCl.

Цели моделирования:

- Независимый расчет геометрической эффективности регистрации γ -квантов 1460.8 кэВ.
- Количественная оценка вклада фонового ^{40}K из окружающих материалов (верификация процедуры вычитания).



- 1 – свинцовая оболочка, 2 – изучаемые образцы,
3 – кристалл NaI(Tl), 4 – алюминиевый корпус,
5 – ФЭУ

Рис. 6 – Модель установки

Сопоставление полученных данных с результатами моделирования

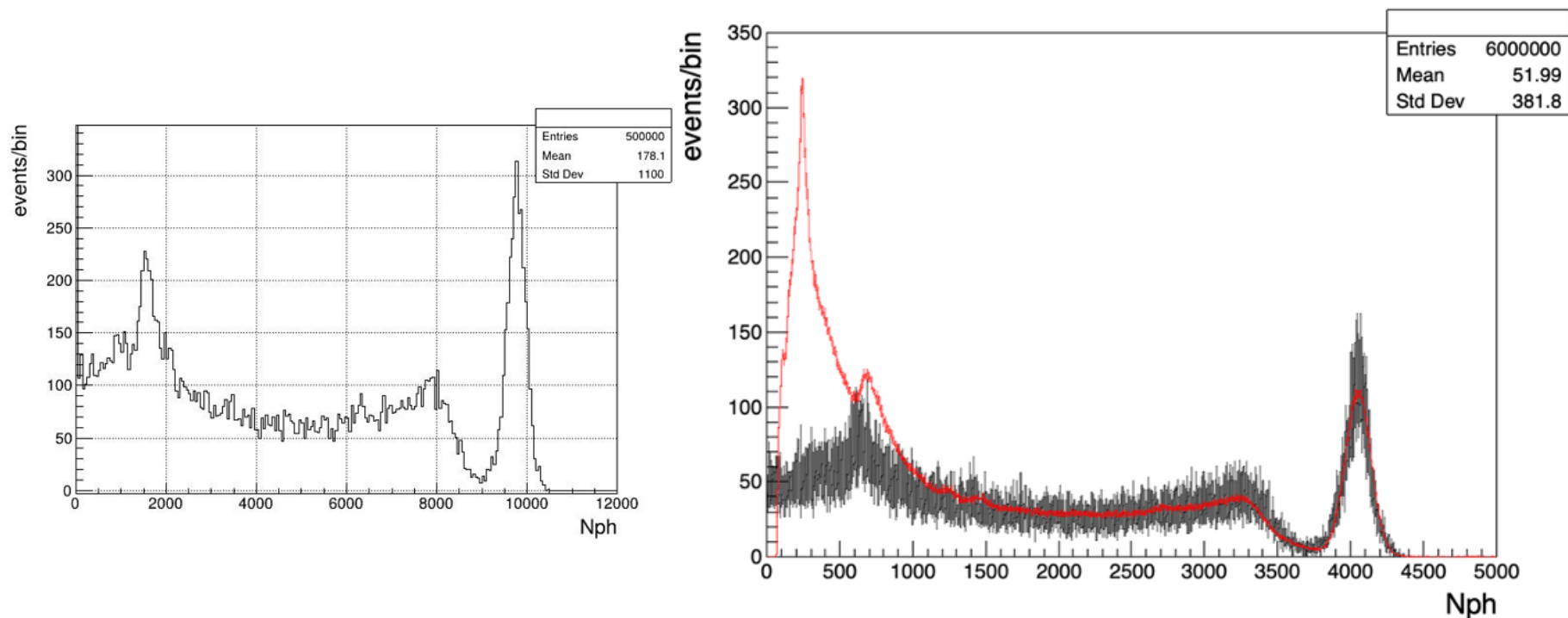


Рис. 7 – Наложение смоделированного спектра 40К (чёрный) и измеренного (красный)

Nph - количество фотоэлектронов, выбитых из фотокатода ФЭУ при регистрации одного события

Полученные результаты

На основе скорости счёта в пике полного поглощения 1460.8 кэВ, полученной в результате обработки спектров разработанным макросом, был рассчитан период полураспада ^{40}K для каждого месяца измерений.

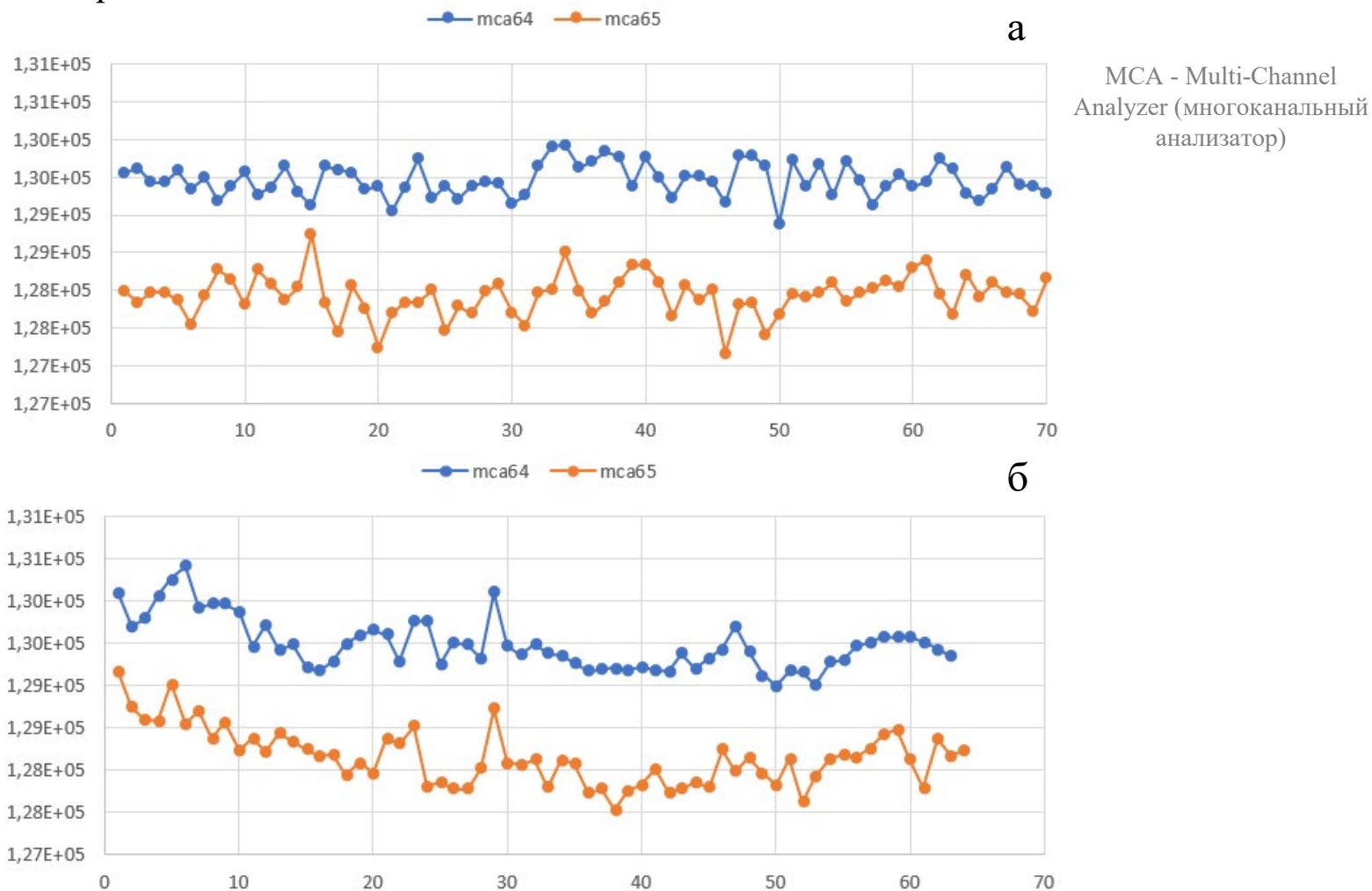
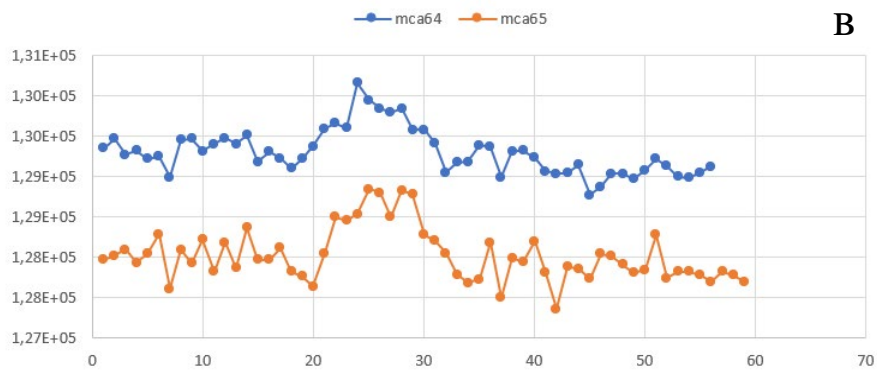
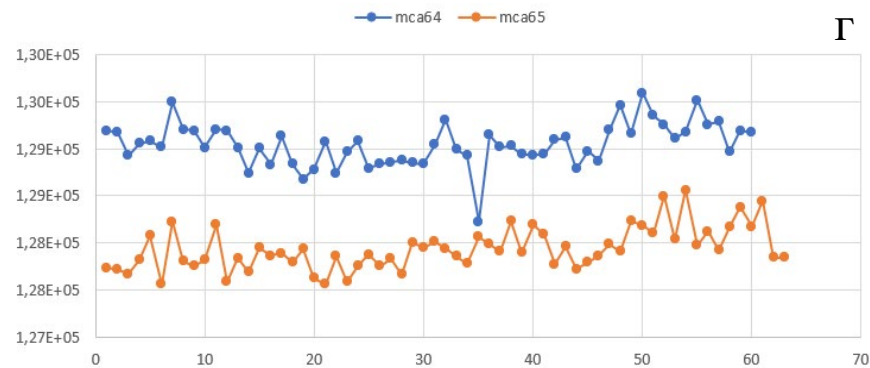


Рис. 8а,б – Результаты приведённых измерений за декабрь 2025 года (а) и январь 2026 года (б).

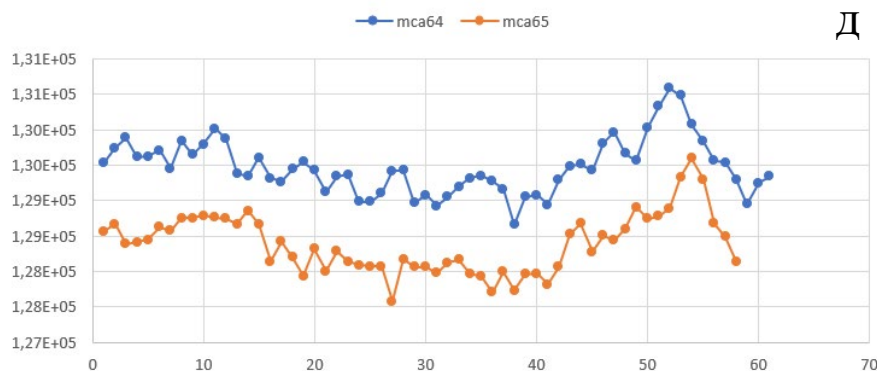
Полученные результаты



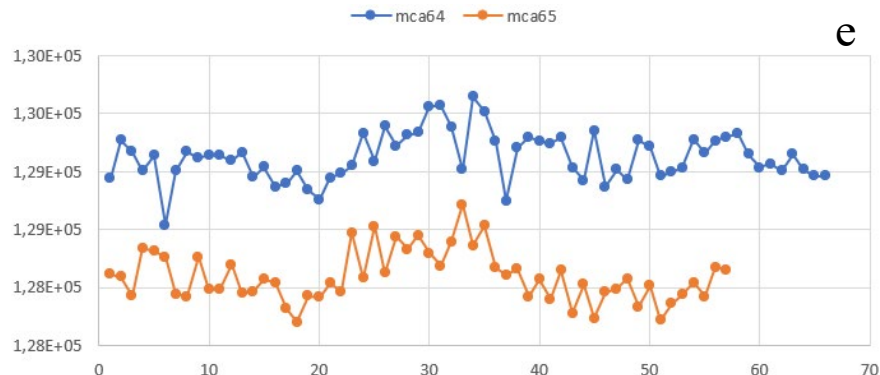
В



Г



Д



е

Рис. 8в,г,д,е – Результаты приведённых измерений за февраль(в), март(г), апрель(д) и май(е) 2026 года.

Полученные результаты

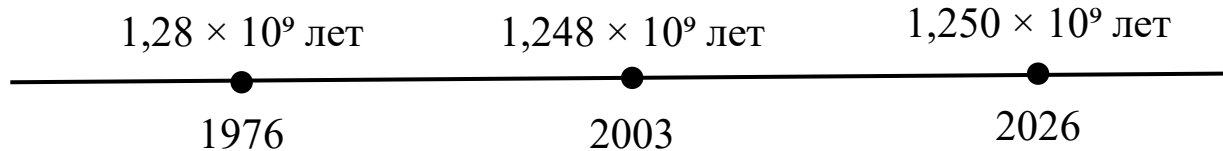
$$T_{1/2} = \frac{N_{40}}{dN/dt} \cdot \frac{1}{3.1557 \cdot 10^7}$$

$\frac{dN}{dt} = R \ln 2$, R – скорость счёта в ППП, R=A k ε Ω

Период	МСА64, $T_{1/2} \times 10^9$ лет	МСА65, $T_{1/2} \times 10^9$ лет
Декабрь 2025	1,2498	1,2465
Январь 2026	1,2506	1,2459
Февраль 2026	1,2515	1,2463
Март 2026	1,2530	1,2476
Апрель 2026	1,2545	1,2486
Май 2026	1,2554	1,2494
Среднее за период	1,2525	1,2474

$$T_{1/2} = (1.250 \pm 0.037) \times 10^9, \quad \delta = 3\%$$

Сравнение экспериментально определённого периода полураспада ^{40}K с литературными данными



- Полученное значение $(1,250 \pm 0,037) \times 10^9$ лет согласуется с опорным значением NUBASE $(1,248 \pm 0,003) \times 10^9$ лет в пределах погрешности.
- Расхождение с более ранними справочными данными ($1,28 \times 10^9$ лет) укладывается в доверительный интервал.
- Разница между двумя независимыми детекторами составляет $0,005 \times 10^9$ лет ($\sim 0,4\%$), что подтверждает воспроизводимость методики.

Итоги

- Создан полностью функциональный методический комплекс для прецизионного определения периода полураспада долгоживущих изотопов.
- Комплекс включает уникальное сочетание аппаратных (корреляционные измерения), программных (ROOT) и имитационных (GEANT4) методов.
- Проведённая работа формирует прочную основу для получения научно значимого результата, вносящего вклад в уточнение фундаментальной ядерной константы.

Спасибо за внимание

Источники

- GEANT4 Collaboration. GEANT4 – A Simulation Toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Vol. 506, № 3. – P. 250–303.
- Кораблева, С. А., Чеглоков, А. А. Изучение явления радиоактивности и определение периода полураспада радиоактивного изотопа: методические указания. — Северск : Издательство СТИ НИЯУ МИФИ, 2014. — 11 с.
- Федоров, А. Н. Основы регистрации ядерного излучения: учебное пособие / А. Н. Федоров. — М.: МИФИ, 2007. — 144 с.
- Бушуев, Е. В. Экспериментальная ядерная физика : учебное пособие / Е. В. Бушуев. – 2008. – С. 41–43.
- Бурлаков, Л. А. Сцинтилляционные спектрометры и их применение / Л. А. Бурлаков. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 224 с.
- Gilmore, G. Practical Gamma-Ray Spectrometry / G. Gilmore. — 2nd ed. — Chichester: Wiley, 2008. — 408 p.
- Бердников А.А., Кобелев В.С., Коломенский Э.А. Моделирование в ядерной физике и технике: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 326 с.
- Масликов, А. А. Общий физический практикум: физика атомного ядра и элементарных частиц : практикум / А. А. Масликов. – Дубна : Университет «Дубна», 2021. – С. 80–85.
- Кикоин И. К., ред. Таблицы физических величин : справочник. — М. : Атомиздат, 1976. — 1008 с.
- Knoll, G. F. Radiation Detection and Measurement / Glenn F. Knoll. — 4th ed. — Hoboken: Wiley, 2010. — 860 p.
- Audi, G., Bersillon, O., Blachot, J., & Wapstra, A. H. (2003). The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear Physics A*, 729, 3–128. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001