



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2026–5

Е.Н. Савицкая, Ю.В. Белецкая, В.А. Бумажнов, А.Г. Денисов,
А.А. Дурум, А.М. Мамаев, В.Н. Пелешко, И.Н. Пирязев,
Я.Н. Расцветалов, А.А. Янович

**Экспериментально-расчетное исследование спектра
нейтронного альbedo от мишени-конвертора**

Направлено в *ЯФИ*

Протвино 2026

Аннотация

Савицкая Е.Н., Белецкая Ю.В., Бумажнов В.А., Денисов А.Г., Дурум А.А., Мамаев А.М., Пелешко В.Н., Пирязев И.Н., Расцветалов Я.Н., Янович А.А. Экспериментально-расчетное исследование спектра нейтронного альbedo от мишени-конвертора: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2026–5. – Протвино, 2026. – 16 с., 7 рис., 2 табл., библиогр.: 12.

Работа посвящена исследованию с помощью активационных детекторов пространственного и энергетического распределения альбедного излучения от свинцовой мишени-конвертора на экспериментальном исследовательском стенде НЕЙТРОН протонного ускорительного комплекса У-70 НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. Изучалось влияние альбедного излучения на активацию monitorных алюминиевых фольг при градуировке штатных мониторов протонного пучка. Оценены условия применения monitorных нуклидов ^{22}Na , ^{24}Na и ^7Be для градуировки. Восстановлены спектры нейтронов, вылетающих из мишени под углом $\sim 160^\circ$ к пучку протонов энергией 50 и 60 ГэВ. Предложен приближенный метод оценки флюенсов нейтронов по удельным активностям в насыщении радионуклидов в активационных детекторах.

Abstract

Savitskaya E.N., Beletskaya Yu.V., Bumazhnov V.A., Denisov A.G., Durum A.A., Mamaev A.M., Peleshko V.N., Piryazev I.N., Rascvetalov Ya.N., Yanovich A.A. Experimental and computational study of the neutron albedo spectrum from a converter target: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2026–5. – Protvino, 2026. – p. 16, fig. 7, tables 2, refs.: 12.

This work is devoted to the investigation of the spatial and energy distribution of albedo radiation from a lead converter target using activation detectors at the NEUTRON experimental research bench of the U-70 proton accelerator at NRC “Kurchatov Institute” – IHEP. The influence of albedo radiation on the activation of monitor aluminum foils during the calibration of standard proton beam monitors was studied. The conditions for using the monitor nuclides ^{22}Na , ^{24}Na and ^7Be for calibration were assessed. The spectra of neutrons emitted from the target at an angle of $\sim 160^\circ$ to the 50 and 60 GeV proton beam were unfolded. An approximate method for estimating neutron fluences from specific activities at the saturation of radionuclides in activation detectors is proposed.

Введение

На экспериментальном исследовательском стенде (ЭИС) НЕЙТРОН [1] ускорительного комплекса У-70 ИФВЭ создан мощный источник нейтронов, спектр которых простирается до 1 ГэВ. Нейтроны образуются в результате взаимодействий пучков протонов с материалами мишеней. Первоначально использовалась свинцовая мишень-конвертор. Геометрия и размеры мишени подбирались с целью максимального выхода нейтронов из ее внешних поверхностей с помощью программы FLUKA [2]. Коллимированные пучки нейтронов для исследовательских целей из боковой поверхности мишени отводятся в канал под прямым углом к пучку. Выходящее из задней поверхности мишени альбедное (обратно рассеянное) излучение является отрицательным фактором при мониторингировании пучка протонов активационными фольгами. Расчеты показывают, что основной компонент альбедного излучения адронов – нейтроны с небольшой примесью протонов и пионов. Присутствует, конечно, достаточно интенсивное вторичное гамма излучение, но его исследование не входило в нашу задачу. Для измерений интегральных характеристик альбедо применены пороговые активационные детекторы (АД).

Зависимость интенсивности альбедного излучения от расстояния вдоль и поперек оси пучка, оценка оптимального расстояния для размещения штатных мониторов, а также фоновый вклад альбедо в погрешность определения числа протонов за экспозицию в настоящей работе исследуются по наведенной активности АД и мониторных фольг (алюминий, медь).

Расчетное исследование спектрального состава альбедо проводится с учетом результатов эксперимента и включает: модификацию программы восстановления спектра нейтронов, процедуру аппроксимации экспериментальных данных по сечениям реакций гладкими энергетическими зависимостями и расчет недостающих сечений реакций и функций чувствительности подходящего набора пороговых АД. Созданный вариант программы позволяет по активностям АД восстанавливать спектр нейтронов с энергиями более 0.35 МэВ. Программа может использоваться для спектрометра Боннера, дополненного набором АД для уточнения формы высокоэнергетической части спектра. В итоге работы представляются спектры нейтронов, вылетающих из свинцовой мишени под углом $\sim 160^\circ$ относительно направления пучка при энергии протонов 50 и 60 ГэВ.

Эксперимент

Эксперимент выполнен на быстро выведенном пучке протонов 50 ГэВ и 60 ГэВ.

Мишень-конвертор представляет собой свинцовый параллелепипед длиной 30 см квадратного сечения со стороной квадрата 5 см. Боковая поверхность мишени покрыта замедлителем из полиэтилена толщиной 4 см. Мишень размещена на оси пучка на высоте ~ 137 см от пола. Расстояние до бетонной защиты не менее 2-х м. Расстояние от выходного окна ионопровода до точки падения на задней плоскости мишени пучок протонов проходит по воздуху (~ 0.5 м).

Между мишенью и ионопроводом в четырех положениях (3, 8, 16 и 31 см от мишени) перпендикулярно оси пучка размещались рамки с натянутыми алюминиевыми фольгами площадью 200×200 мм² и толщиной 184 мкм. На трех рамках по горизонтали прикреплены пороговые алюминиевые детекторы $\varnothing 40$ мм $\times$ 6 мм по обе стороны от оси пучка на расстояниях 6 и 11 см. В точке наибольшего удаления от мишени (рамка на 31 см), кроме алюминиевой, использовалась реперная медная фольга в виде круга $\varnothing 70$ мм $\times$ 0.101 мм, центр которой совпадает с осью пучка. Между медной и алюминиевой фольгами зажималась плексигласовая прокладка $\varnothing 70$ мм $\times$ 1 мм с целью предотвращения возможного переноса ионов между фольгами. В этой же рамке по окружности радиусом 11 см был прикреплен набор дополнительных пороговых АД для измерения входных

данных процедуры восстановления спектра альбедных нейтронов (набор реакций дополнительных АД указан ниже, в табл.1.).

Вклад альбедо в измеренные активности алюминиевых фольг по нуклидам мониторинговых реакций ^{22}Na , ^{24}Na и ^7Be

На ЭИС НЕЙТРОН штатными мониторами являются дельта-камера и токовый трансформатор. Мониторные фольги из алюминия и меди используются для их градуировки. В данном эксперименте проведены экспозиции указанных выше рамок с детекторами и мониторинговыми фольгами при энергиях протонов 50 и 60 ГэВ без штатных мониторов. Пучок в течение экспозиции проходил через центры всех мониторинговых фольг. А так как на пути пучка от выхода из ионопровода до падения на мишень-конвертор вещества мало ($\sim 0.3 \text{ г/см}^2$), то число протонов, прошедших через все рамки можно считать одинаковым.

Измерение активностей облученных фольг и АД проводилось на гамма-спектрометре СЕГ-1КП (ИФТП) с полупроводниковым кристаллом из сверхчистого германия с величиной относительной эффективности – 36% (к стандартному детектору NaI). Паспортное энергетическое разрешение: 0.792 кэВ и 1.760 кэВ для линий 122.06 и 1332.5, соответственно. Градуировка спектрометра проводилась с помощью образцовых источников гамма-излучения (ОСГИ).

Число протонов за экспозицию определялось по реперной реакции $^{nat}\text{Cu}(p,x)^{24}\text{Na}$ с сечением $3.56 \pm 0.07 \text{ мб}$ [3] в интервале от 30 до 150 ГэВ и порогом более 100 МэВ. Высокий порог позволяет пренебречь вкладами альбедного излучения и рассеянного поля от конструкций в активность ^{24}Na в медной фольге.

По числу прошедших рамки протонов можно вычленить вклад от протонов в каждое из показаний активностей промежуточных алюминиевых мониторов. Активности в насыщении ^{22}Na , ^{24}Na и ^7Be в алюминиевой фольге, создаваемые протонами пучка:

$$A^s(p + Al \rightarrow X) = A^s(p + Cu \rightarrow ^{24}\text{Na}) \frac{\rho_{Al} \overline{A}_{Cu} L_{Al}}{\rho_{Cu} A_{Al} L_{Cu}} \frac{\sigma_X}{\sigma_{Cu}}, X = ^{22}\text{Na}, ^{24}\text{Na}, ^7\text{Be}. \quad (1)$$

Здесь A^s – активности нуклидов в насыщении; ρ_{Al} и ρ_{Cu} – плотности алюминия и меди; A_{Al} и $\overline{A}_{Cu}$ – атомарные массы в а.е. алюминия и меди; L_{Al} и L_{Cu} – толщины фольг; σ_X –

сечения выходов нуклидов ^{22}Na , ^{24}Na и ^7Be в реакциях протонов с алюминием [4]; σ_{Cu} – сечение реакции $^{\text{nat}}\text{Cu}(p,x)^{24}\text{Na}$.

Отношения измеренных активностей нуклидов в Al-фольге к полученным по формуле (1) представлены на рис 1.

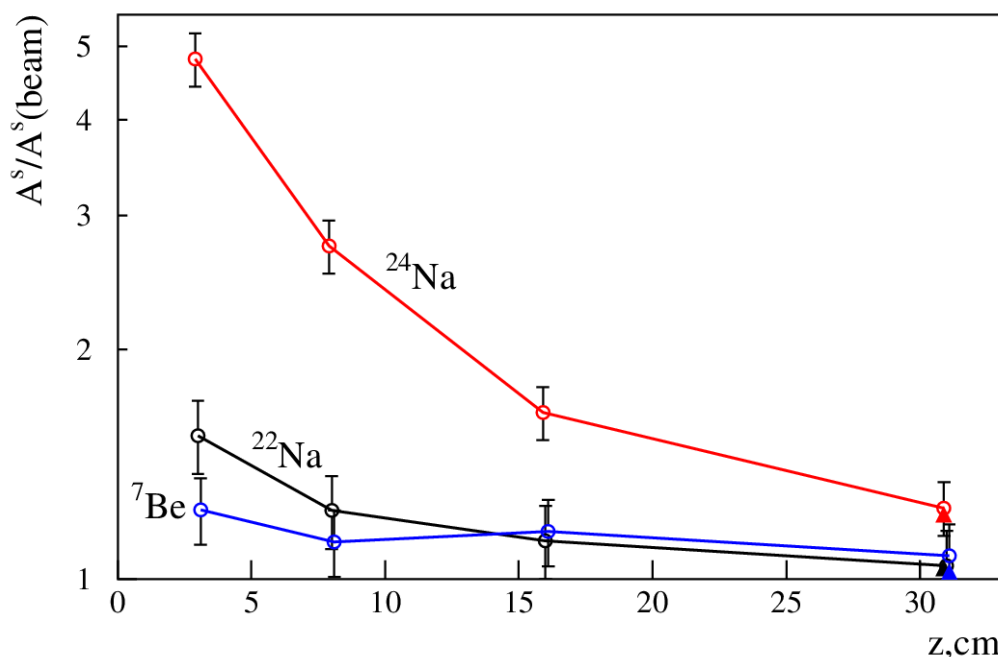


Рис. 1. Отношение измеренной активности в насыщении нуклидов ^{22}Na , ^{24}Na и ^7Be в мониторинговой алюминиевой фольге к активности в насыщении, создаваемой протонами пучка, в зависимости от расстояния между мишенью и фольгой: кружки – при энергии протонов пучка 60 ГэВ, треугольники – при энергии 50 ГэВ ($z=31$ см).

Как следует из рис.1 на расстоянии 3 см от мишени вклад альбедного излучения в активность ^{24}Na в алюминиевой мониторинговой фольге почти в четыре раза выше активности, создаваемой протонами пучка. Далее он быстро уменьшается и на расстоянии 31 см от мишени составляет ~22%. При мониторинговании по нуклиду ^{24}Na для уменьшения доли фона расстояние от мишени до фольги нужно увеличивать. Для нуклидов ^{22}Na и ^7Be на расстоянии 31 см вклад альбеда ~3%, что меньше или сопоставимо с погрешностью их измеренной активности. Поэтому алюминиевые фольги чаще всего используются с измерением мониторингового нуклида ^{22}Na (или ^7Be).

Пространственное распределение альбедного излучения

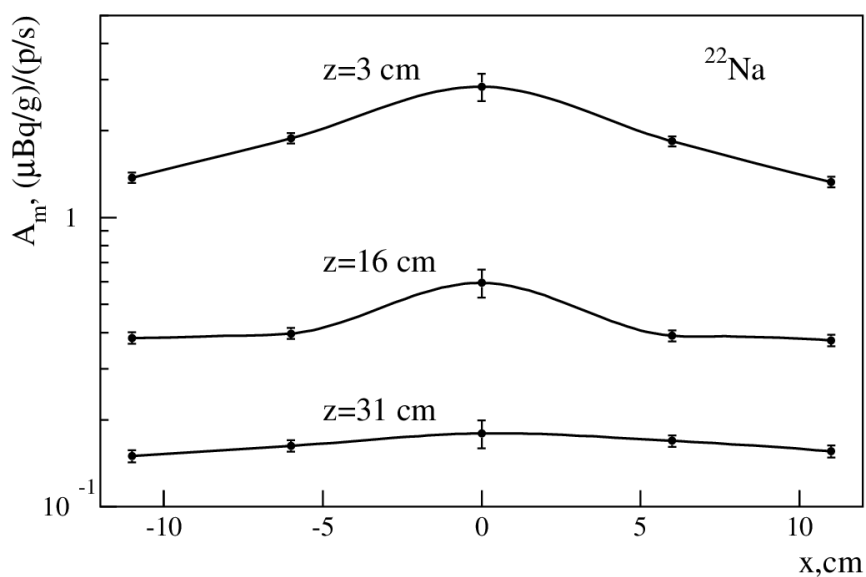


Рис. 2. Удельная активность в насыщении ^{22}Na в алюминии на расстояниях от мишени $z = 3$, 16 и 31 см.

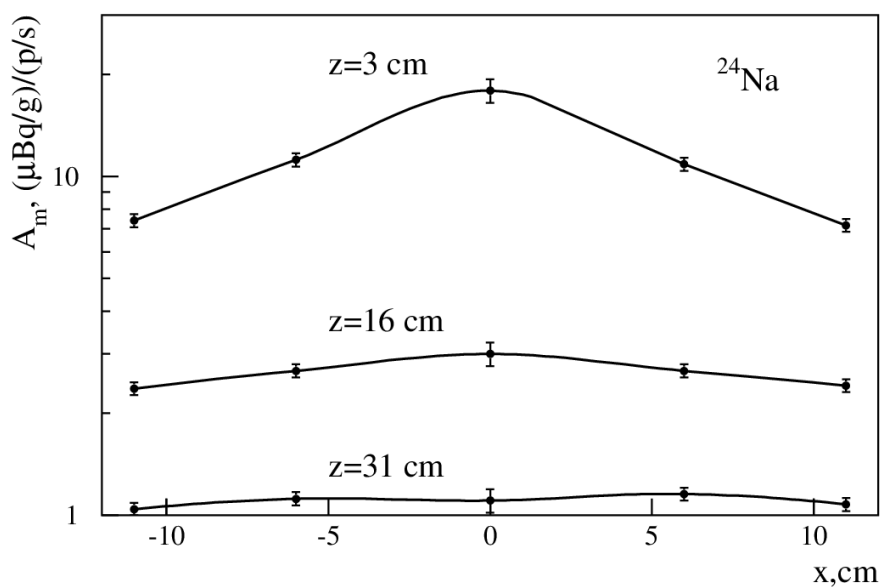


Рис. 3. Удельная активность в насыщении ^{24}Na в алюминии на расстояниях от мишени $z = 3$, 16 и 31 см.

На рис. 2 и 3 показаны распределения по горизонтали удельных активностей в насыщении ^{22}Na и ^{24}Na в алюминиевых детекторах $\text{Ø}40 \text{ мм} \times 6 \text{ мм}$ и центральных дисках

алюминиевых мониторинговых фольг $\varnothing 70 \text{ мм} \times 0.184 \text{ мм}$, наведенных альбедным излучением из мишени при энергии протонов 60 ГэВ. Из активностей центральных мониторинговых Al-фольг ($x=0$) вычтены активности, созданные протонами пучка. Нормировка на 1 протон в секунду.

Как будет показано ниже, представленные на рис. 2 и 3 активности $A_m(^{22}\text{Na})$ и $A_m(^{24}\text{Na})$ могут использоваться для оценки пространственных распределений флюенсов нейтронов с энергиями выше 36 МэВ и выше 7.8 МэВ соответственно.

Для получения более детальной информации о спектрах альбедных нейтронов при энергиях 50 и 60 ГэВ дополнительно использовались АД с порогами реакций от 0.35 МэВ до 83 МэВ. Эти детекторы закреплялись на рамке, находящейся на расстоянии 31 см от мишени, на радиусе 11 см от оси пучка. В табл. 1 приведены, в порядке возрастания пороговых энергий реакций, экспериментально полученные удельные активности в насыщении нуклидов, нормированные на 1 протон в секунду.

Таблица 1. Удельные активности в насыщении $A_m((\text{мкБк/г})/(\text{п./с}))$ детекторов при энергии протонов пучка 50 и 60 ГэВ. p_n – расчетный нейтронный вклад в альбедо.

Реакция	$A_m(50 \text{ ГэВ})$	$A_m(60 \text{ ГэВ})$	$A_m(50)/A_m(60)$	p_n
$\text{In} \rightarrow ^{115\text{m}}\text{In}$	$3.10 \pm 4.9\%$	$4.22 \pm 4.4\%$	0.74	1.00
$^{nat}\text{Cu} \rightarrow ^{65}\text{Ni}$	$0.0289 \pm 5.8\%$	–	–	1.00
$\text{Al} \rightarrow ^{24}\text{Na}$	$0.888 \pm 4.8\%$	$1.02 \pm 4.4\%$	0.87	0.991
$\text{Nb} \rightarrow ^{92\text{m}}\text{Nb}$	$0.881 \pm 5.2\%$	$1.01 \pm 4.5\%$	0.87	0.993
$\text{Bi} \rightarrow ^{206}\text{Bi}$	$0.521 \pm 4.4\%$	$0.534 \pm 4.2\%$	0.99	0.954
$^{nat}\text{Cu} \rightarrow ^{58}\text{Co}$	$0.193 \pm 4.0\%$	–	–	0.921
$\text{Al} \rightarrow ^{22}\text{Na}$	$0.137 \pm 6.9\%$	$0.150 \pm 4.7\%$	0.92	0.904
$\text{C} \rightarrow ^7\text{Be}$	$0.0880 \pm 6.4\%$	$0.0987 \pm 4.8\%$	0.89	0.741
$\text{Bi} \rightarrow ^{205}\text{Bi}$	$0.334 \pm 5.8\%$	$0.342 \pm 4.8\%$	0.98	0.890
$\text{Bi} \rightarrow ^{204}\text{Bi}$	$0.179 \pm 4.5\%$	$0.150 \pm 4.5\%$	1.19	0.843
$\text{Bi} \rightarrow ^{203}\text{Bi}$	$0.117 \pm 5.3\%$	$0.117 \pm 4.1\%$	1.00	0.841
$\text{Bi} \rightarrow ^{200}\text{Bi}$	$0.0235 \pm 5.6\%$	–	–	0.786

Основной проблемой в подготовке исходных данных для восстановления нейтронных спектров по выбранным реакциям была аппроксимация гладкими зависимостями экспериментальных сечений, часто имеющих значительный разброс и большие погрешности. Вторая проблема – отделить нейтронный вклад в активности (p_n в таблице 1) от вклада заряженных адронов.

Относительные вклады нейтронов, протонов и пионов в активности нуклидов вычислялись с использованием спектров, рассчитанных по программе FLUKA, и сечений из библиотеки экспериментальных данных по ядерным реакциям EXFOR [5], а где их не хватает – по сечениям, рассчитанным по программе HADRON [6]. При этом учитывалось замедление p и $\pi^\pm$ в детекторах вследствие ионизационных потерь. Учитывались также реакции с образованием и распадом изотопов полония: $p(\pi^+) + \text{Bi} \rightarrow \text{Po} \rightarrow \text{Bi}$.

В табл. 1 приведены расчетные доли нейтронов p_n в активности нуклидов. Вклад заряженных адронов составляет от 0 до 26% для нашей геометрии эксперимента. Наиболее чувствительной к присутствию p и $\pi^\pm$ является реакция $\text{C} \rightarrow {}^7\text{Be}$.

Вклад p и $\pi^\pm$ в активности изотопов висмута меньше и понижается с ростом атомного веса нуклида.

Алгоритм восстановления спектров

В работах [7, 8] описывалось применение спектрометра Боннера (СБ), дополненного углеродным активационным детектором (УАД), для измерения нейтронных спектров в широком диапазоне энергий – от тепловых до высокоэнергетических (~ 1 ГэВ). СБ отвечает за спектр ниже 20 МэВ, а УАД – за высокоэнергетический диапазон. По откликам этого спектрометра (СБ+УАД) хорошо восстанавливаются гладкие спектры за защитами ускорителей и других установок, являющихся источниками нейтронного излучения. Основным ограничением для его использования является большие размеры замедлителей (максимальный диаметр равен 30.5 см). Поэтому СБ не подходит для измерений вблизи мишеней и в полях с большим градиентом. Кроме того, спектр нейтронов выше 20 МэВ определяется только активацией УАД. Т.е. делается предположение о форме спектра, а УАД позволяет получить нормировочный коэффициент к нему.

Программа BON95 [9, 10], написанная Санниковым А.В. для СБ+УАД, была модифицирована для более детального восстановления нейтронных спектров в высокоэнергетическом диапазоне по удельным активностям АД из табл. 1.

Нижняя граница восстанавливаемого спектра определяется наименьшим порогом реакции имеющихся детекторов. В нашей работе – это $^{115\text{m}}\text{In}$. Минимальная энергия его выхода равна 0.35 МэВ.

На первом этапе проводится параметризация спектра нейтронов в виде суммы испарительного и каскадного пиков:

$$E\varphi_0(E) = a_1 \frac{X_1^{c_1}}{1+X_1^{c_2}} + a_2 X_2^{c_3} \exp(-X_2), \quad X_{1,2} = E/T_{1,2}. \quad (2)$$

В программе BON95 свободные параметры начального спектра a_1 , a_2 , c_1 и T_1 определяются из условия наилучшего согласия с экспериментальными откликами детекторов, остальные зафиксированы: $c_2 = c_1 + 1.3$, $c_3 = 1.7$ и $T_2 = 55$ МэВ. Затем итерационным методом направленного расхождения спектр корректируется с целью уменьшения разницы между расчетными и экспериментальными удельными активностями в насыщении. $\varphi(E)$ – восстановленный спектр после итерационной процедуры.

Расчетные значения A_m получаются сверткой спектра $\varphi(E)$ с функциями чувствительности (ФЧ) $R(E)$ детекторов. Для тонких активационных детекторов нейтронные ФЧ пропорциональны сечениям реакций:

$$R_k(E) = c_k \cdot \sigma_k(E), \quad c_k = \frac{w_j}{\sum w_j A_j} N_A \cdot 10^{-27} = 6.022 \cdot 10^{-4} \frac{w_j}{\sum w_j A_j}, \quad (3)$$

где сечение выражено в миллибарнах, w_j – доля атомов j -того типа с атомарной массой A_j в материале детектора, k – номер реакции.

Сечения получены аппроксимацией экспериментальных данных, взятых из библиотеки EXFOR. Точность полученных аппроксимаций нейтронных сечений для отдельных реакций трудно установить, т.к. экспериментальные данные по ним порой различаются на десятки процентов. Поэтому представленным на рис. 4 ФЧ приписана погрешность равная 15%.

Нуклиды ^{201}Bi и ^{202}Bi исключены из рассмотрения:

- ^{201}Bi имеет метастабильное состояние (первый уровень возбуждения) с периодом полураспада 58.5 минут, который с вероятностью 88.7% распадается в ^{201}Pb , как и основное состояние ^{201}Bi , с излучение тех же фотонов. В 11.3% происходит переход

метастабильного состояния в основное, у которого $T_{1/2}=103$ мин. Таким образом, сложная схема распада не позволяет надежно определить его активность в насыщении.

- ^{202}Bi ($T_{1/2}=1.71$ ч) распадается в ^{202}Pb с метастабильным уровнем ($T_{1/2}=3.54$ ч), при переходе с которого излучаются гамма-кванты характерные для распада ^{202}Bi . То есть нет возможности разделить реакции $\text{Bi} \rightarrow ^{202}\text{Bi}$ и $\text{Bi} \rightarrow ^{202m}\text{Pb}$.

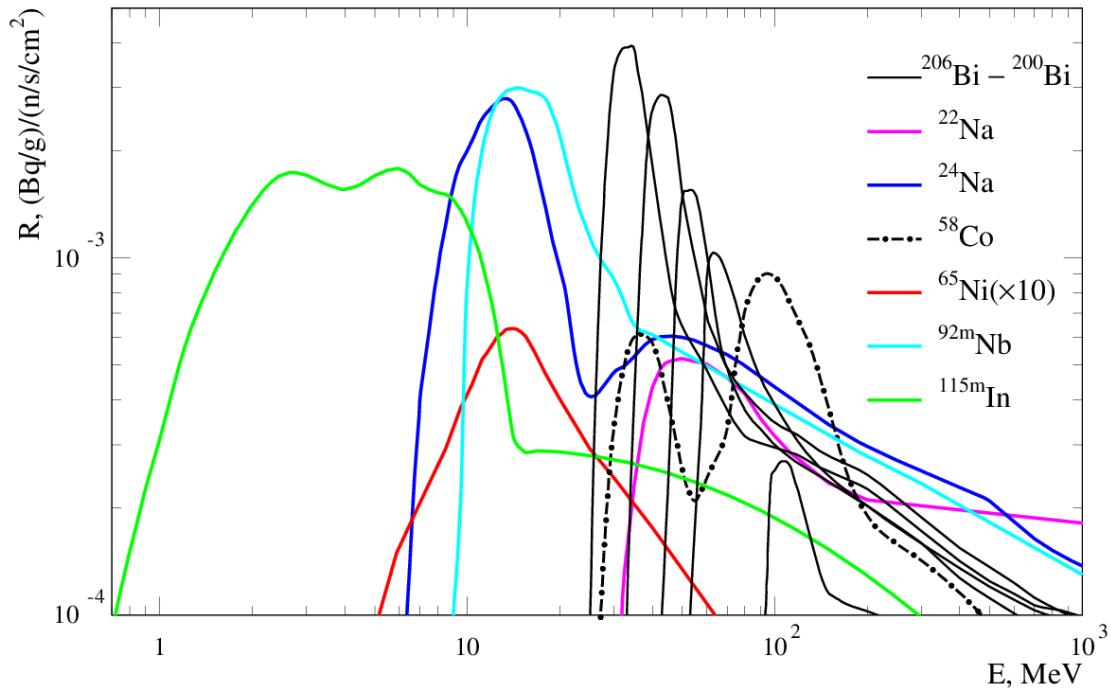


Рис. 4. Нейтронные функции чувствительности детекторов.

Испарительный пик (ИП), первое слагаемое в формуле (2), в нейтронных спектрах имеет максимум в диапазоне 0.5–2 МэВ. В нашем наборе детекторов ИП дает наибольший вклад (~94%) в активность ^{115m}In и существенный вклад (~55–70%) в активность ^{92m}Nb , ^{24}Na и ^{65}Ni . Активность остальных нуклидов создается в основном каскадными нейтронами, спектр которых описывается вторым слагаемым в выражении (2). Свободными параметрами оставлены a_1 , a_2 , c_1 , c_3 , T_1 и T_2 , зафиксирован параметр $c_2 = c_1 + 1.3$. В эксперименте при энергии протонов 60 ГэВ медный детектор не использовался. В этом случае для параметризации ИП информации недостаточно, поэтому необходимо зафиксировать как минимум один из параметров ИП, например, энергию его максимума E_m . Тогда T_1 определяется энергией E_m и величиной c_1 : $T_1 = E_m(1.3/c_1)^{1/c_2}$.

Параметризованный спектр (2) является начальным для итерационной процедуры направленного расхождения, при которой проводится перенормировка спектра в каждом энергетическом интервале для минимизации отклонений расчетных удельных активностей от экспериментальных. Итерационный процесс завершается, когда разница расчетного и экспериментального значений A_m становится меньше погрешности измерения для всех нуклидов.

Вместо параметризованного спектра в качестве начального можно использовать расчетный спектр или измеренный другим способом. В нашем случае использовались параметризованный и расчетный нейтронный спектр от Рb-мишени, полученный по программе FLUKA для энергии протонов пучка 50 ГэВ.

Восстановленные спектры

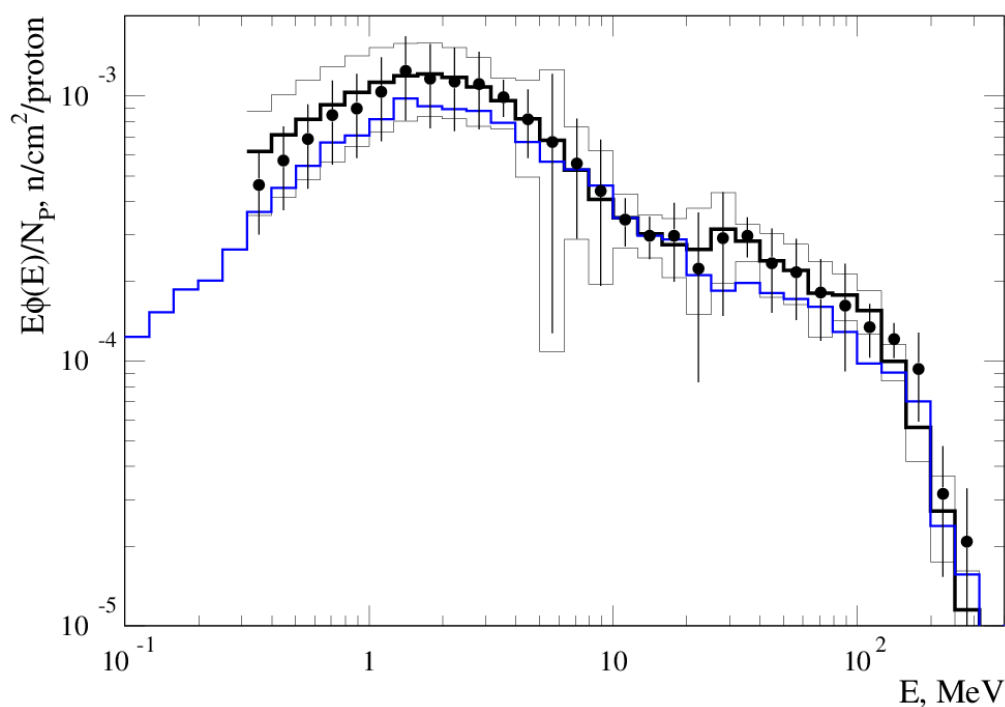


Рис. 5. Спектр нейтронов, вылетающих из свинцовой мишени под углом $\sim 160^\circ$ к пучку протонов энергией 50 ГэВ: черная линия с коридором ошибок (тонкие линии) – с начальным параметризованным спектром, точки – с начальным расчетным спектром, синяя линия – расчет по FLUKA.

По экспериментальным данным из табл. 1 восстановлены спектры нейтронов, вылетающих из свинцовой мишени под углом $\sim 160^\circ$ к пучку протонов, при энергии протонов 50 и 60 ГэВ. На рис. 5 и 6 представлены результаты восстановления для двух вариантов начального спектра – параметризация и расчет. На рис. 5 приведен также расчетный спектр, полученный с помощью программы FLUKA для энергии протонов 50 ГэВ.

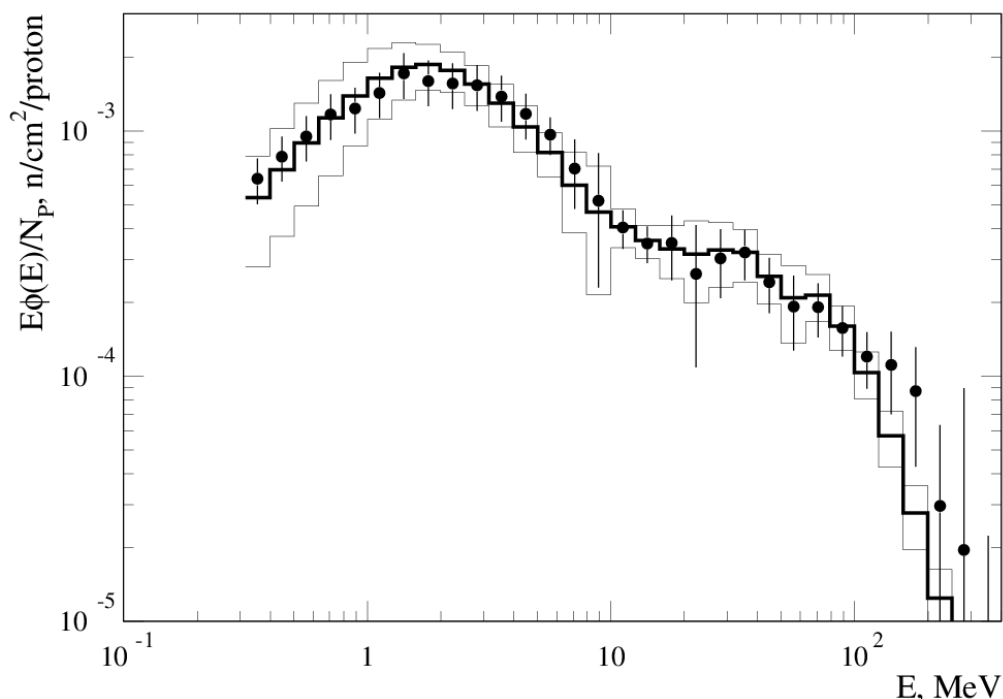


Рис. 6. Спектр нейтронов, вылетающих из свинцовой мишени под углом $\sim 160^\circ$ к пучку протонов энергией 60 ГэВ: линия с коридором ошибок (тонкие линии) – с начальным параметризованным спектром, точки – с начальным расчетным спектром.

Для 50 ГэВ восстановление по параметризации и по расчету дает близкие результаты. Расчетный спектр немного ниже восстановленных, но находится в их коридорах неопределенностей. Для 60 ГэВ параметризация занижает выход нейтронов с энергиями выше 100 МэВ по сравнению с восстановлением по расчетному спектру. Это объясняется отсутствием в этих измерениях короткоживущего нуклида ^{200}Bi с наибольшим порогом реакции. На рис. 7 представлено итоговое восстановление по параметризации спектров от свинцовой мишени для энергии протонов 50 и 60 ГэВ. Рост энергии протонов пучка приводит к существенному увеличению количества нейтронов с энергиями ниже 10 МэВ.

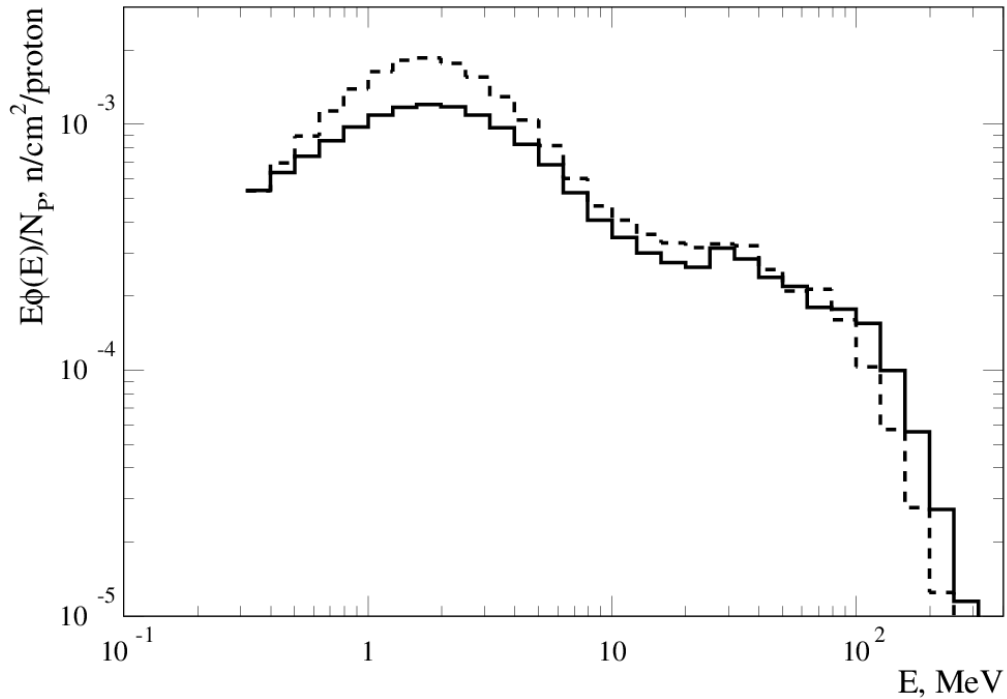


Рис. 7. Спектр нейтронов, вылетающих из свинцовой мишени под углом $\sim 160^\circ$ к пучку протонов: сплошная линия – энергия протонов 50 ГэВ, пунктирная – 60 ГэВ.

Оценка флюенса нейтронов по активностям

В нашей работе [11] был предложен способ оценки флюенса нейтронов с энергией выше эффективной пороговой (E_b) по скорости реакции и среднему сечению реакции. Используя экспериментальные данные по удельной активности в насыщении (A_m) получаем следующее выражение для оценки флюенса нейтронов:

$$\Phi(E > E_b) = \frac{A_m}{c_k \bar{\sigma}} p_n. \quad (4)$$

Здесь c_k совпадает с коэффициентом перехода от сечения к ФЧ в формуле (3), среднее сечение $\bar{\sigma}$ выражено в миллибарнах, флюенс – в нейтрон/см², A_m – в Бк/г, p_n – относительный вклад нейтронов в активность нуклида.

В качестве E_b в работе [11] бралась энергия, при которой сечение реакции достигает 10% от максимального значения. В этой работе E_b определена как средняя граница 5% от свертки ФЧ с десятью расчетными спектрами нейтронов с высокоэнергетическим компонентом, т.е.

$$\int_0^{E_b} \varphi(E)R(E)dE = 0.05 \int_0^{E_{max}} \varphi(E)R(E)dE.$$

Использовались рассчитанные по программам FLUKA, HADRON и MARS [12] спектры нейтронов в разных точках относительно свинцовой мишени при энергиях протонов пучка 10 и 50 ГэВ.

В табл. 2 представлены флюенсы нейтронов выше эффективных пороговых энергий, полученные по восстановленным спектрам и по формуле (4). Относительные вклады нейтронов в активность (p_n) получены по спектрам вылетающих и мишени частиц, рассчитанных по программе FLUKA для энергии протонов пучка 50 ГэВ.

Таблица 2. Флюенсы (10^{-6} н/см²) нейтронов с энергиями выше эффективных пороговых E_b : $\Phi_{\text{вос}}$ – полученные по восстановленным спектрам, Φ_A – оцененные по удельной активности и среднему сечению реакции. Нормировка на 1 протон.

Реакция	E_b , МэВ	$\bar{\sigma}$, мб	p_n	$E_p=50$ ГэВ		$E_p=60$ ГэВ	
				$\Phi_{\text{вос}}(E>E_b)$	$\Phi_A(E>E_b)$	$\Phi_{\text{вос}}(E>E_b)$	$\Phi_A(E>E_b)$
In→ ^{115m} In	1.1	213	1.00	2694	2900	3534	3947
^{nat} Cu→ ⁶⁵ Ni	5.1	9.7	1.00	1044	1020	1192	–
Al→ ²⁴ Na	7.8	52	0.991	788	759	856	872
Nb→ ^{92m} Nb	11	218	0.993	647	619	715	710
Bi→ ²⁰⁶ Bi	28	382	0.921	382	451	397	463
^{nat} Cu→ ⁵⁸ Co	31	51	0.954	352	368	372	–
C→ ⁷ Be	35	4.9	0.741	317	287	332	322
Al→ ²² Na	36	18	0.904	309	309	321	338
Bi→ ²⁰⁵ Bi	37	319	0.890	300	323	311	331
Bi→ ²⁰⁴ Bi	48	194	0.843	235	270	238	226
Bi→ ²⁰³ Bi	59	168	0.841	190	203	205	203
Bi→ ²⁰⁰ Bi	93	56	0.786	106	114	121	–
$\Phi_{\text{вос}}(E>0.35 \text{ МэВ})$				3589		4796	
$\Phi_{\text{вос}}(E>20 \text{ МэВ})$				463		490	

Для большинства реакций оценка флюенса по формуле (4) в пределах 10% согласуется с флюенсом, полученным по восстановленным спектрам. Это означает, что формула (4) может быть полезна на практике. Например, она может быть использована для получения пространственного распределения флюенса альбедных нейтронов с энергиями выше 36 и 7.8 МэВ по удельным активностям ^{22}Na и ^{24}Na , представленным на рис. 2 и 3 соответственно.

Заключение

Проведено исследование альбедного излучения из мишени. Для мониторингирования протонов по активностям ^{22}Na и ^7Be в алюминиевой фольге расстояние между свинцовой мишенью и фольгой должно быть не меньше 31 см, при котором вклад излучения из мишени в их активности можно считать допустимым для градуировки штатных мониторов (составляет около 3%). Для мониторингирования по ^{24}Na расстояние должно быть существенно увеличено.

Программа BON95 модифицирована для параметризации и восстановления спектров нейтронов по показаниям активационных детекторов в диапазоне энергий выше 0.35 МэВ.

На основе экспериментальных (а где их нет, расчетных) данных получены нейтронные функции чувствительности детекторов.

Восстановлены спектры альбедных нейтронов, вылетающих из свинцовой мишени под углом $\sim 160^\circ$ относительно направления пучка протонов с энергиями 50 и 60 ГэВ. Показано, что приближенный метод оценки флюенса нейтронов выше эффективных порогов реакции по удельным активностям в насыщении дает результаты, согласующиеся с восстановленными альбедными спектрами в пределах 15%.

В перспективе АД могут использоваться в дополнение к СБ+УАД для уточнения формы спектров выше 20 МэВ. Но в менее интенсивных нейтронных полях их размеры должны быть увеличены, а ФЧ рассчитаны с учетом возможных многократных взаимодействий частиц с атомами детекторов.

Список литературы

- [1] Бабинцев В.В., Белецкая Ю.В., Денисов А.Г., Дурум А.А., Мамаев А.М., Пелешко В.Н., Пирязев И.Н., Расцветалов Я.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Сухарев М.М., Сухих С.Э., Янович А.А. *Измерение спектра нейтронов на стенде «Нейтрон» спектрометром Боннера с активационными детекторами*. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2022-4. – Протвино, 2022.
- [2] Ferrari A., Sala P.R., Fasso A., Ranft J. *FLUKA: a Multi-Particle Transport Code*. CERN-2005-10, 2005.
- [3] Baker S.I., Allen R.A., Yurista P., Agoritss V., Cumming J.B., *Cu(p,X)²⁴Na Cross Section from 30 to 800 GeV*. Phys. Rev. C. 1991. V. 43. P. 2862.
- [4] Savitskaya E.N., Beletskaya Yu.V., Denisov A.G., Durum A.A., Mamaev A.M., Maslov M.A., Peleshko V.N., Piryazev I.N., Rascvetalov Ya.N., Yanovich A.A. *Cross-Sections of Proton Reactions ²⁷Al(p,x)²²Na, ²⁷Al(p,x)²⁴Na and ²⁷Al(p,x)⁷Be at 50 GeV*. Physics of Atomic Nuclei, 2025, Vol. 88, No. 12, pp. 2540-2544.
- [5] <https://nds.iaea.org/exfor/>
- [6] Sannikov A.V., Savitskaya E.N. *Physics of the HADRON Code: Recent Status and Comparison with Experiment*. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., 2000, v. A450, p. 127–137.
- [7] Крупный Г.И., Расцветалов Я.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В. *Многошаровой спектрометр нейтронов с активационным детектором тепловых нейтронов на основе реакции ¹¹⁵In(n,γ)^{116m}In*. Тезисы докл. IX Рос. научной конф. «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», 2006, с. 121—123.
- [8] Крупный Г.И., Пелешко В.Н., Расцветалов Я.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В. *Высокоэнергетическое опорное поле нейтронного излучения*. Атомная энергия, 2009, т. 107, с. 159—165.
- [9] Sannikov A.V. *BON95, a Universal User-Independent Unfolding Code for Low Informative Neutron Spectrometers*. GSF report. Munich, 1995.
- [10] Санников А.В. *Развитие методов спектрометрии нейтронного излучения на больших протонных ускорителях*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Протвино, 2006.

- [11] Rascvetalov Ya.N., Beletskaya Yu.V., Denisov A.G., Durum A.A., Ilyukin V.L., Mamaev A.M., Peleshko V.N., Piryazev I.N., Savitskaya E.N., Sukharev M.M., Sukhikh S.E., Yanovich A.A. *Measurement of Neutron Field Functionals Around a Neutron Converter of 50 GeV Protons*, JACoW Publishing (Joint Accelerator Conferences Website), XXVII Russian Particle Accelerators Conference (RuPAC 2021), 26 September – 2 October 2021.
- [12] Azhgirey I. L. and Talanov V.V., “*Status of MARS program complex*” in Proc. of XVIII Workshop on the Charged Particle Accelerators, Protvino, Russia, 2000, v. 2, p. 184.

Рукопись поступила 23 июля 2026 г.

Е.Н. Савицкая, Ю.В. Белецкая, В.А. Бумажнов, А.Г. Денисов, А.А. Дурум, А.М. Мамаев,
В.Н. Пелешко, И.Н. Пирязев, Я.Н. Расцветалов, А.А. Янович

Экспериментально-расчетное исследование спектра нейтронного альbedo от мишени-конвер-
тора.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	29.07.2026	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.
Печ.л. 1, 25.	Уч.– изд.л. 1, 73	Тираж 68.	Заказ 15.
			Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, дом 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2026-5,
НИИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2026
