

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ ЛЕГКИХ ИОНОВ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ НА УСКОРИТЕЛЯХ

*А. Г. Васильева^{a, 1}, М. Ю. Костин^a, В. А. Пикалов^a,
О. В. Суманеев^a, А. А. Янович^a*

^a Институт физики высоких энергий им. А. А. Логанова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, 142281, Россия

В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ предложена оригинальная методика абсолютной калибровки ионизационных камер измерения интенсивности выведенного пучка ионов углерода в диапазоне энергий 400–450 МэВ/нуклон активационными детекторами. Используются радиометрическая установка, работающая по принципу γ – γ -совпадений, активационный детектор из чистого углерода с естественной смесью изотопов и реакция $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$. Рассматриваются предпосылки разработки подобной методики, приводится ее общее описание, а также представлен процесс калибровки плоскопараллельной ионизационной камеры в ходе регулярной работы на экспериментальной установке «Радиобиологический стенд ускорительного комплекса У-70» в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

A novel technique for the absolute calibration of ionization chambers measuring the intensity of extracted carbon ion beams in the 400–450 MeV/nucleon energy range using activation detectors has been proposed at the NRC “Kurchatov Institute” – IHEP. A radiometric setup operating on the γ – γ coincidence principle, an activation detector made of pure carbon with a natural isotope mixture, and the $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ reaction are used. This paper examines the prerequisites for developing this technique, provides a general description, and also describes the process of a plane-parallel ionization chamber calibration during its regular operation at the experimental Radiobiological Stand of the U-70 Accelerator Complex at the NRC “Kurchatov Institute” – IHEP.

PACS: 41.75.Ak; 82.80.Jp; 81.05.U.–; 87.53.Bn; 29.40.Cs

ВВЕДЕНИЕ

Онкологические заболевания по сей день остаются одной из главных причин смерти в мире. Традиционные методы лечения онкологических заболеваний включают в себя хирургическое вмешательство, химиотерапию и лучевую терапию. Методы лучевой терапии с каждым годом становятся все более востребованными. Наиболее

¹E-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru

широко используется традиционная лучевая терапия — γ -квантами и ускоренными электронами. Лучевая терапия легкими ионами (протонами или ионами углерода — адронами) уже несколько десятилетий рассматривается как альтернатива традиционной лучевой терапии. Адронная терапия может обеспечить более конформное распределение дозы по объему опухоли и лучше сохранить окружающие опухоль здоровые ткани по сравнению с традиционной лучевой терапией. Кроме того, более тяжелые ионы, такие как углерод, обладают более высокой относительной биологической эффективностью, что делает терапию ионами углерода особенно успешной в лечении радиорезистентных опухолей [1–3].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ ведутся работы по созданию первого в России экспериментально-клинического центра ионно-лучевой терапии (ЭКЦ ИЛТ) на базе действующего ускорительного комплекса У-70. На У-70 освоен медленный вывод пучка ускоренных ионов углерода промежуточных энергий в экспериментальный зал 1БВ. Ведутся работы по разработке методики использования ионов углерода в медицинских целях [4].

В ионной лучевой терапии первостепенное значение имеет точное определение дозы облучения, поглощаемой как опухолью, так и окружающими здоровыми тканями. Для клинического применения необходимо, чтобы точность доставки дозы в целевой объем опухоли была не хуже 5% [5]. Поэтому необходимо как можно точнее знать параметры подводимого пучка. В качестве мониторов пучка наибольшее распространение в ионно-лучевой терапии получили ионизационные камеры. Поэтому достаточно приоритетным направлением в настоящее время является совершенствование методик абсолютной калибровки ионизационных камер с целью минимизации неопределенностей при измерении дозы и интенсивности. В этом плане методика калибровки ионизационных камер с применением активационных детекторов приобретает особую актуальность благодаря своей эффективности и технологической простоте в сравнении с прямыми измерениями, выполняемыми с помощью цилиндра Фарадея. Как известно [6], в случае пучков тяжелых ионов существуют практические ограничения, касающиеся использования цилиндров Фарадея из-за большого диапазона вторичных частиц, образующихся в ядерных реакциях и при фрагментации мишени.

Активационная методика [7] базируется на том, что частицы пучка пересекают мишень (активационный детектор) и генерируют реакции расщепления $A(p, X)B$, где A — стабильный изотоп, из которого состоит мишень, B — радионуклид, полученный в мишени в результате реакции расщепления, активность которого определяется с помощью γ -спектрометрии или иным способом, а X представляет собой продукты реакции (одну или несколько частиц в зависимости от реакции), покидающие мишень.

1. ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА УСКОРИТЕЛЯХ И ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ

В настоящее время накоплен значительный опыт применения активационных детекторов на ускорителях. Использование активационного анализа для диагностики интенсивности пучков частиц на высокоэнергетических ускорителях в целом имеет ряд преимуществ перед другими методами [8]:

- линейность в широком диапазоне интенсивностей;
- отсутствие зависимости от временной структуры пучка;
- высокую радиационную стойкость активационных детекторов;
- изотропность детекторов;
- сравнительно несложную и недорогую аппаратуру для обработки детекторов.

К основному недостатку следует отнести требование высокой чистоты материала детекторов.

Активация алюминиевой фольги посредством реакции $^{27}\text{Al}(p, X)^{24}\text{Na}$ является хорошо зарекомендовавшим себя методом для измерения интенсивности пучков протонов высокой энергии и давно используется для абсолютной калибровки мониторов пучка [9–12]. Он особенно удобен для калибровки ионизационных камер, используемых для мониторингирования пучка в режиме реального времени. Например, данный метод применяется на испытательной площадке H4IRRAD в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) для калибровки ионизационной камеры, которая используется в качестве монитора пучка на установке CERF (CERN-EU Reference Field) [13, 14].

В экспериментах по ядерной физике [15] для определения числа протонов уже предлагались детектор из чистого углерода и реакция $^{12}\text{C}(p, pn)^{11}\text{C}$ как альтернатива реакции $^{27}\text{Al}(p, X)^{24}\text{Na}$. Сегодня интерес к реакции $^{12}\text{C}(p, pn)^{11}\text{C}$ также мотивирован ее потенциальным применением для мониторинга и верификации в протонной терапии. В работах [16, 17] продемонстрировано, что точная дозиметрия протонного пучка может быть выполнена с помощью активационной методики. В работе [17] дозиметрия в пучках протонов с использованием активированных графитовых фольг была предложена именно в качестве альтернативы референтной дозиметрии на основе ионизационной камеры. Отмечается, что метод активации углерода является довольно простым и недорогим в реализации по сравнению с использованием цилиндров Фарадея для абсолютной дозиметрии и обеспечивает при этом точность, сравнимую с точностью дозиметрии, проводимой с помощью ионизационной камеры. Хотя ни ионизационная камера, ни метод активации углерода не являются новыми в протонной дозиметрии, прямое сравнение этих методов в медицинском протонном пучке до появления работы [17] не проводилось. Полученные результаты [17] показывают, что калибровки по дозе с помощью ионизационной камеры и методом активации углерода, проведенные в монохроматическом пучке протонов с энергией 200 МэВ, хорошо согласуются.

Преимущество метода активационного измерения также заключается в том, что его можно использовать на медицинских синхротронах в импульсных пучках с высокой мощностью дозы [7].

2. ВЫБОР АКТИВАЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА И УСТАНОВКИ

При работе с пучками ускоренных ядер углерода оптимальным выбором является реакция $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ и, соответственно, активационный детектор из чистого углерода с естественным изотопным составом. Образующийся в этом случае в мишени изотоп ^{11}C имеет период полураспада 20,34 мин [18]. При высоких энергиях в мишени происходят несколько ядерных реакций с образованием радиоактивных изотопов (^{10}C , а также изотопы ядер Li, Be, B, He), однако они имеют очень короткие периоды

полураспада (19,3 с для ^{10}C и не более 10 мкс для остальных). Поэтому при измерении активности мишени спустя ~ 10 мин после окончания облучения можно считать, что кроме изотопа ^{11}C в мишени нет других радиоактивных ядер.

Изотоп углерода ^{11}C представляет собой практически 100%-й β^+ -излучатель, только 0,23 % распадов приходится на электронный захват [19]. Позитроны, испускаемые при радиоактивном распаде, аннигилируют с электронами вещества детектора или окружающей среды. Как известно, в этом случае в результате аннигиляции образуются два γ -кванта с энергией 511 кэВ, разлетающихся в строго противоположных направлениях. Поскольку в момент измерения в образце присутствует лишь один радиоизотоп, активность облученных детекторов целесообразно регистрировать на установке, работающей по схеме γ - γ -совпадений. Такие установки характеризуются низким собственным фоном и позволяют проводить измерения без применения дорогостоящей радиационной защиты [8, 15].

Подобная установка ранее была разработана в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ [20]. Блок-схема установки приведена на рис. 1.

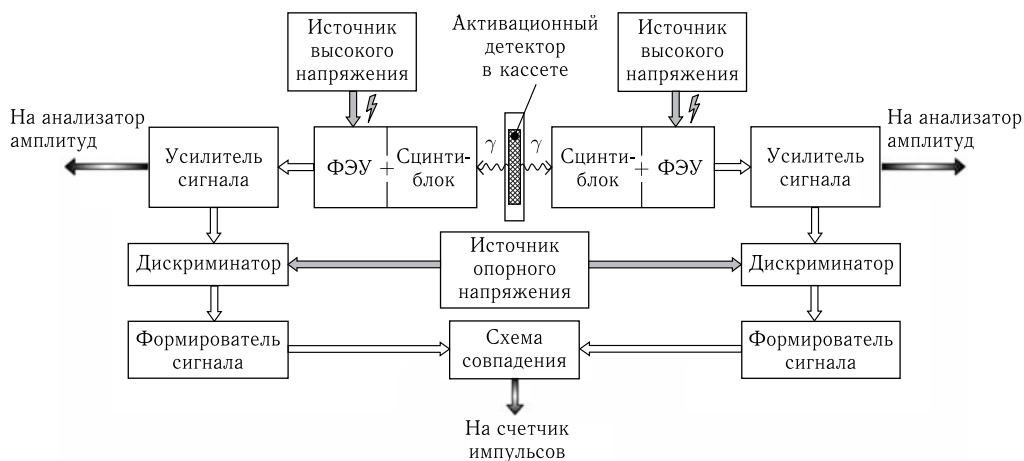


Рис. 1. Блок-схема радиометрической установки [20]

С помощью счетчика импульсов регистрируется скорость счета совпадений на выбранных временных интервалах (секунды – десятки секунд). На основе полученных данных восстанавливается кривая радиоактивного распада, и с учетом известного периода полураспада и момента окончания облучения рассчитывается активность наработанного изотопа ^{11}C , накопленная за время облучения.

3. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Определив активность детектора на момент окончания облучения, можно вычислить число частиц I , прошедших через мишень, — ключевой параметр для калибровки ионизационных камер и датчиков системы обратной связи. При условии, что время экспозиции значительно короче периода полураспада образующегося радионуклида,

расчет можно выполнить, применяя следующую формулу:

$$I = \frac{C_0 \tau}{N_{\text{я}} d \sigma \varepsilon}, \quad (1)$$

где C_0 — активность изотопа мишени на момент конца облучения (Бк); d — толщина мишени (см); σ — сечение ядерной реакции (см²); ε — эффективность регистрации радиометрической установки.

Величина τ — постоянная распада (с), рассчитываемая по формуле

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}, \quad (2)$$

где $T_{1/2}$ — период полураспада изотопа мишени (с).

$N_{\text{я}}$ — число ядер в единице объема мишени (см⁻³), которое находится как

$$N_{\text{я}} = \left(\frac{\rho}{A} \right) N_A, \quad (3)$$

где ρ , A — плотность (г/см³) и атомная масса (а.е.м.) материала мишени соответственно, а N_A — число Авогадро (моль⁻¹).

4. КАЛИБРОВКА ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ НА УСТАНОВКЕ РБС

По предложенной методике с помощью разработанной установки [20] в течение нескольких сеансов работы У-70 на установке «Радиобиологический стенд ускорительного комплекса У-70» (РБС) проводилась калибровка плоскопараллельной ионизационной камеры измерения интенсивности, находящейся в кольцевом зале ускорителя У-70.

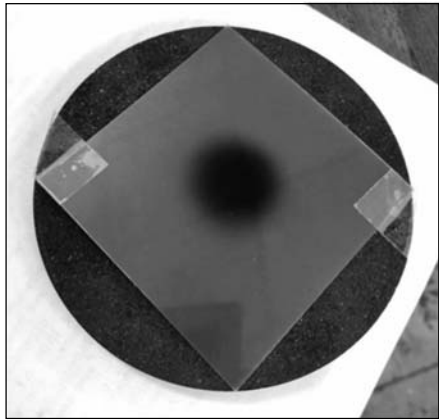


Рис. 2. Активационный детектор с радиохромной пленкой ЕВТЗ сразу после облучения

В качестве мишени (активационного детектора) использовался диск из графита высокой чистоты (99,99%) диаметром 120 мм и толщиной 5,37 мм. Плотность данного графита составляет 1,719 г/см³. Активационный детектор вместе с радиохромной пленкой Gaichromic EBT3 (Ashland, США), прикрепленной поверх детектора (рис. 2) для контроля положения пучка, размещался после линзы Q7 в зоне вывода пучка из ускорителя У-70 в 25-й канал (рис. 3) на установку РБС. Медленный вывод пучка ионов углерода из ускорителя У-70 в канал № 25 производится импульсами до 900 мс через каждые 9 с [4]. Чтобы не учитывать распад изотопа ¹¹C между им-

пульсами, облучение активационного детектора проводилось только одним сгустком ионов углерода с энергией 400 МэВ/нуклон, что удовлетворяет условиям применения



Рис. 3. Зона вывода пучка из ускорителя У-70 в 25-й канал. Активационный детектор размещен после линзы Q7

формулы (1). В момент окончания облучения включался секундомер «Агат СОПр-2а-3-000» (ПАО «ЗЧЗ», Златоуст). Показания секундомера были использованы при начале обсчета активационного детектора на радиометрической установке и для вычисления активности изотопа ^{11}C в мишени на момент окончания облучения.

После облучения активационный детектор изымался из места облучения и помещался в кассету радиометрической установки. Радиометрическая установка перед измерениями включалась на прогрев, измерялся собственный фон установки. Эффективность регистрации установки ϵ определялась контрольным источником ^{22}Na из набора образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ). В качестве амплитудного анализатора и счетчика импульсов использовался анализатор АЦП-USB-8К-П производства «Аспект» (Дубна). Длительность интервала составляла 20 с, набор — 105 временных интервалов (35 мин). Непосредственно процесс измерения скорости счета инициировался через 15 мин после окончания облучения, чтобы с небольшим запасом выдержать время, необходимое для распада посторонних изотопов.

На рис. 4 представлен график зависимости скорости счета от времени выдержки после окончания облучения активационного детектора ионами углерода. В качестве примера приведены данные ускорительного комплекса У-70 зимнего сеанса 2022 г. Обработка результатов измерений выполнялась с использованием программного пакета ROOT [21]. Кривая радиоактивного распада ^{11}C аппроксимировалась экспоненциальной функцией

$$C = e^{(p^0 - (1/\tau)t)}. \quad (4)$$

Активность изотопа в секунду на момент конца облучения будет равна

$$C_0 = e^{p^0}/20. \quad (5)$$

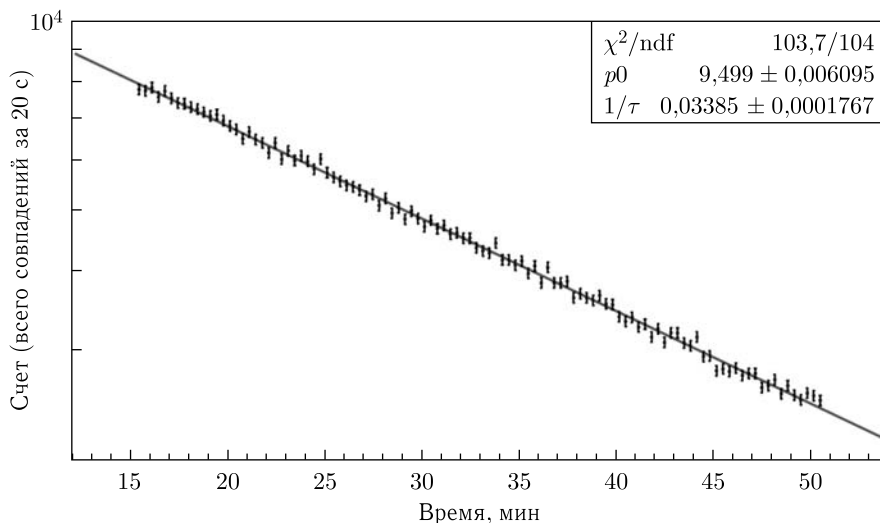


Рис. 4. Зависимость скорости счета от времени выдержки после окончания облучения активационного детектора ионами углерода: точки — результат измерений; линия — аппроксимирующая кривая

Число ядер углерода, прошедших через мишень, определялось по формуле (1). В качестве величины сечения ядерной реакции σ использовалось измеренное в работе [22] сечение реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ для энергии ядер углерода 400 МэВ/нуклон, равное $\sigma = (63,5 \pm 0,5)$ мб.

Для учета фоновых событий, вызванных образованием ядер ^{11}C вторичными высокоэнергетическими частицами, произведен расчет с использованием библиотеки gQMD-2.4 для программного обеспечения моделирования методом Монте-Карло в области физики частиц FLUKA 4-4.1 [23]. При расчете использовались геометрия и параметры реального активационного детектора. Итоговый поправочный коэффициент для расчетов по формуле (1) составил 0,972.

Соответственно, по значению, полученному с применением формулы (1), и поправочного коэффициента, определенного выше, производилась калибровка ионизационной камеры, и по результатам калибровки для нее вводился калибровочный коэффициент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ разработана методика калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода клинически значимых энергий активационными детекторами. Указанная методика позволяет реализовать калибровку ионизационных камер для измерения интенсивности пучка ионов углерода в диапазоне энергий 150–450 МэВ/нуклон. Используются низкофоновая радиометрическая установка, работающая по принципу γ – γ -совпадений, активационный детектор из чистого углерода с естественной смесью изотопов и реакция $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$.

Для отработки методики в течение нескольких сеансов работы ускорительного комплекса У-70 проведена калибровка плоскопараллельной ионизационной камеры измерения интенсивности пучка на канале № 25 (установка РБС).

Подобная методика в перспективе позволит уменьшить неопределенность в измерении величины поглощенной объемом облучаемой опухоли дозы до 5 % и менее, что необходимо для медицинского применения. Однако для повышения точности активационной методики критически важно как можно точнее знать сечение реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ в диапазоне энергий 150–450 МэВ/нуклон, востребованных в клинической практике. И, несмотря на длительную историю применения ионных ускорителей в экспериментальной физике, сечения реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ экспериментально измерены лишь для ограниченного набора фиксированных энергий. При этом существует значительная разница как между экспериментальными данными по сечениям [22, 24–27], так и этими же данными и компьютерным моделированием [28, 29]. Экспериментальное определение таких сечений с хорошей точностью в диапазоне медицинских энергий — одна из приоритетных задач будущих исследований.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института физики высоких энергий им. А. А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schardt D., Elsasser T., Schulz-Ertner D. // *Rev. Mod. Phys.* 2010. V. 82. P. 383–425.
2. Schlaff C., Krauze A., Belard A., O'Connell J., Camphausen K. // *Radiat. Oncol.* 2014. V. 9. P. 88.
3. Durante M., Orecchia R., Loeffler J. S. // *Nat. Rev. Clin. Oncol.* 2017. V. 14. P. 483–495.
4. Antipov Yu. M., Vasilyeva A. G., Vasiliev D. A., Kalinin V. A., Koshelev A. V., Makonin S. V., Maximov A. V., Parmenova E. V., Pikalov V. A., Polkovnikov M. K., Soldatov A. P., Koryakina E. V., Koryakin S. N., Saburov V. O., Solovov A. N., Troshina M. V., Perevezentsev A. A., Shtemberg A. S., Sirota N. P., Smirnova E. N., Rozanova O. M., Belyakova T. A. // *Instrum. Exp. Tech.* 2024. V. 67, No. 2. P. S300–S304.
5. IAEA Technical Reports Series No. 398. Vienna, 2024. 302 p.
6. Luoni F., Weber U., Boscolo D., Durante M., Reidel C.-A., Schuy C., Zink K., Horst F. // *Front. Phys.* 2024. V. 8. 568145.
7. Karger C. P., Jakel O., Palmans H., Kanai T. // *Phys. Med. Biol.* 2010. V. 55. P. R193–R234.
8. Крупный Г. И., Стеценко Г. Н., Янович А. А. Препринт ИФВЭ 2000-30. Протвино, 2000. 14 с.
9. Michel R., Bodemann R., Busemann H., Daunke R., Gloris M., Lange H.-J., Klug B., Krins A., Leya I., Lüpke M., Neumann S., Reinhardt H., Schnatz-Büttgen M., Herpers U., Schiekel Th., Sudbrock F., Holmqvist B., Condé H., Malmberg P., Suter M., Dittrich-Hannen B., Kubik P.-W., Synal H.-A., Filges D. // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1997. V. 129. P. 153–193.
10. Cumming J. B., Agoritsas V., Witkov R. // *Nucl. Instr. Meth.* 1981. V. 180. P. 37–44.
11. Schwerer O., Okamoto K. IAEA Status Report INDC(NDS)-218. Vienna, 1989. P. 19–25.
12. Ferrari A., La Torre F. P., Manessi G. P., Pozzi F., Silari M. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2014. V. 763. P. 177–183.

13. *Calviani M., Cerutti F., La Torre F. P., Manessi G. P., Pozzi F., Severino C. T., Silari M.* // Prog. Nucl. Sci. Technol. 2014. V. 4. P. 358–362.
14. *Curioni A., Froeschl R., Glaser M., Iliopoulou E., La Torre F. P.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2017. V. 858. P. 101–105.
15. *Cumming J. B.* // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1963. V. 13. P. 261–286.
16. *Larsson B., Sarby B.* // Acta Oncol. 1987. V. 26. P. 143–158.
17. *Nichiporov D.* // Med. Phys. 2003. V. 30, No. 5. P. 972–978.
18. *Kondev F. G., Wang M., Huang W. J., Naimi S., Audi G.* // Chin. Phys. C. 2021. V. 45, No. 3. 030001.
19. *Campbell J. L., Leiper W., Ledingham K. W. D., Drever R. W. P.* // Nucl. Phys. A. 1967. V. 96, No. 2. P. 279–287.
20. *Васильева А.Г., Костин М.Ю., Пикалов В.А., Янович А.А.* // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2025. №2. 2520201.
21. ROOT Data Analysis Framework. <https://root.cern.ch/>.
22. *Smith A. R., McCaslin J. B., Geaga J. V., Hill J. C., Vary J. P.* // Phys. Rev. C. 1983. V. 28. P. 1614–1617.
23. The Official CERN FLUKA Website. <https://fluka.cern>.
24. *Yashima H., Uwamino Y., Iwase H., Sugita H., Nakamura T., Ito S., Fukumura A.* // Radiochim. Acta. 2003. V. 91. P. 689–696.
25. *Yashima H., Uwamino Y., Iwase H., Sugita H., Nakamura T., Ito S., Fukumura A.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2004. V. 226. P. 243–263.
26. *Salvador S., Colin J., Cussol D., Divay C., Fontbonne J.-M., Labalme M.* // Phys. Rev. C. 2017. V. 95, No. 4. 044607.
27. *Horst F., Adi W., Arico G., Brinkmann K.-T., Durante M., Reidel C.-A., Rovituso M., Weber U., Zaunick H.-G., Zink K., Schuy C.* // Phys. Med. Biol. 2019. V. 64. P. 205012–205028.
28. *Pshenichnov I. A., Larionov A., Mishustin I. N., Greiner W.* // Phys. Med. Biol. 2007. V. 52. P. 7295–7312.
29. *Arico G., Battistoni G., Cerutti F., Horst F., Mairani A., Schuy C., Weber U., Ferrari A.* // Eur. Phys. J. Web Conf. 2020. V. 239. 24001.

Получено 25 марта 2026 г.