

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКОГО ИЗОТОПА ^{155}Tb НА ЦИКЛОТРОНЕ C18/18

Р.В. АВETИСЯН, А.Г. БАРСЕГЯН, Ю.А. ГАРИБЯН, А.В. ГЮРДЖИНЯН,
И.А. КЕРОБЯН, А.А. МКРТЧЯН*, А.Ю. ПЕТРОСЯН

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

*e-mail: haykuhi.mkrtchyan@yerphi.am

(Поступила в редакцию 16 февраля 2024 г.)

Представлены результаты исследований возможности производства изотопа ^{155}Tb , используемого в диагностике и терапии онкологических заболеваний на протонном пучке медицинского циклотрона C18/18. Измерения наведенной активности были выполнены активационным методом с последующим спектрметрическим анализом. В качестве основной мишени использовался природный гадолиний. Для реакций $^{nat}\text{Gd}(p,xn)^{155}\text{Tb}$ были выполнены вычисления функций возбуждения посредством теоретических ядерных кодов TALYS 1.96 и EMPIRE 3.2. Измеренные значения поперечных сечений были сравнены как с результатами теоретических вычислений, так и с экспериментальными данными других работ. Полученное в ходе эксперимента значение интегральной активности радионуклида ^{155}Tb было сравнено с результатом, полученным с использованием кода TALYS 1.96, а также с опубликованными данными.

1. Введение

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ–SPECT) представляет собой мощное средство для диагностики и мониторинга злокачественных образований, дополняющее другие методы создания изображений, такие как КТ (компьютерная томография) и МРТ (магнитно-резонансная томография). Она позволяет получать информацию о функциональных характеристиках и метаболизме опухолей, что играет важную роль в оптимизации лечения и улучшении результатов у пациентов.

ОФЭКТ остается основной методикой в клинической онкологии, несмотря на то, что позитронная эмиссионная томография (ПЭТ–PET) предоставляет более высокую чувствительность и разрешение [1]. Это обусловлено относительно низкой стоимостью оборудования для ОФЭКТ по сравнению с ПЭТ-сканерами, а также простотой и доступностью широко используемых радионуклидов, излучающих γ -кванты [1, 2].

Изотоп ^{155}Tb (период полураспада $T_{1/2} = 5.3$ дня) является долгоживущим аналогом технеция $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (период полураспада $T_{1/2} = 6.0067$ ч), благодаря чему применим в ОФЭКТ. В процессе распада, излучая четыре основных γ -кванта с энергиями 86.5 кэВ ($I = 32.0\%$), 105.3 кэВ ($I = 25\%$), 180.1 кэВ ($I = 7.45\%$) и 262.3 кэВ ($I = 5.29\%$), он превращается в стабильный ^{155}Gd . Эти излучения можно легко обнаружить при использовании метода γ -спектроскопии.

Вместе с тем, высокая вероятность излучения Оже-электронов (119%) [3], открывает новые возможности для его потенциального применения в терапии. ^{155}Tb излучает конверсионные и Оже-электроны с низкой энергией, в среднем 2 электрона (с энергией выше 4 кэВ) за распад. И с этой точки зрения ^{155}Tb рассматривается как перспективный радионуклид [4].

В связи с этим, было проведено множество исследований, направленных на создание тераностического изотопа ^{155}Tb с использованием различных каналов реакций. Эти реакции включают в себя облучение изотопов гадолиния протонами [5–7] и дейтронами [8–10], а также облучение альфа-частицами [7, 11, 12] изотопов европия, природного гадолиния [13, 14] и диспрозия [15]. Кроме того, существуют косвенные методы получения ^{155}Tb с использованием облучения протонами высоких энергий изотопов ^{159}Tb [6] или диспрозия [16, 17], что приводит к образованию ^{155}Ho или ^{155}Dy , продуктами распада которых является ^{155}Tb . Во всех этих случаях после химического разделения можно достичь низкого уровня радиоактивных примесей, однако доступность дейтронных- и альфа-пучков ограничена, что делает эти процессы непригодными для запуска клинических испытаний.

Один из наиболее простых и эффективных способов получения нуклида ^{155}Tb для медицинских целей заключается в использовании реакции $^{155}\text{Gd}(p,n)$.

Ранее была опубликована работа [18] по исследованию функций возбуждения протон-индуцированных реакций на природном гадолинии посредством различных моделей кодов TALYS 1.96 [19] и EMPIRE 3.2 [20] и проведено сравнение с данными работ [21–25].

Целью настоящего исследования является оценка возможности получения тераностического нуклида ^{155}Tb посредством ядерных реакций $^{nat}\text{Gd}(p,xn)$ при использовании выведенного протонного пучка медицинского циклотрона C18/18, расположенного на территории Национальной Научной Лаборатории им. А.И. Алиханяна (ННЛА, Ереванский Физический Институт).

2. Экспериментальная методика и техника

Для оценки эффективности метода производства ^{155}Tb в форме без носителя была измерена функция возбуждения $^{nat}\text{Gd}(p,xn)^{155}\text{Tb}$ в области энергии протонов от порога реакции до 18 МэВ. Для достижения этой цели был использован активационный метод стопок. Толщина стопки определяется из условия полной остановки протонов в мишени. Стопка состояла из 11 чередующихся комплектов фольг. Каждый комплект включал в себя в роли основной мишени фольгу из натурального гадолиния Gd (толщина 25.4 мкм, чистота 99.9%), из натуральной меди Cu (20 мкм, 97.96%) в роли монитора протонного пучка и алюминиевую фольгу Al (50 мкм, 98.24%) в роли замедлителя пучка.

Схематический вид стопки представлен на рис.1. Пластина из титана Ti толщиной 50 мкм представляет собой технологическое окно, предназначенное для изоляции вакуума пучкопровода от окружающей среды.

Натуральный гадолиний состоит из семи изотопов (^{152}Gd – 0.2%, ^{154}Gd – 2.18%, ^{155}Gd – 14.8%, ^{156}Gd – 20.47%, ^{157}Gd – 15.65%, ^{158}Gd – 24.84%, ^{160}Gd – 21.86%), из которых образование нуклида ^{155}Tb при энергии пучка протонов 18 МэВ возможно только на изотопах ^{155}Gd и ^{156}Gd .

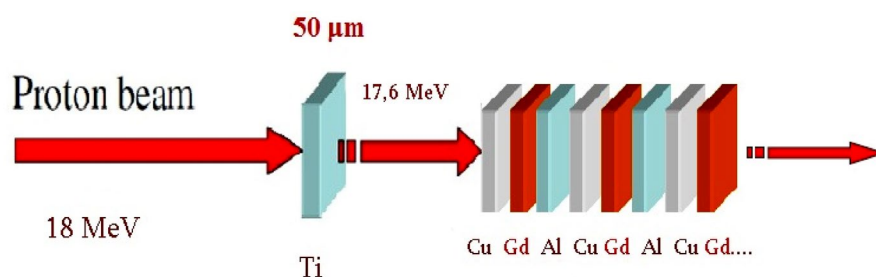


Рис.1. Общий вид стопки.

Табл.1 содержит информацию относительно порогов реакций и распадных характеристик нуклидов, образованных в результате реакций облучения изучаемой мишени и монитора. Распадные характеристики нуклидов взяты из базы NuDat 3 [3].

Табл.1. Пороги реакций и распадные характеристики образованных нуклидов

Нуклиды	Канал реакции	Порог реакции, МэВ	Период полураспада $T_{1/2}$	Тип распада	E_γ , кэВ	I_γ , %
^{155}Tb	$^{154}\text{Gd}(p,\gamma)$	4.83	5.32 дня	$\beta^+(100\%)$	86.5	32
	$^{155}\text{Gd}(p,n)$	1.61			105.31	25.1
	$^{156}\text{Gd}(p,2n)$	10.2			180.08	7.5
^{63}Zn	$^{\text{nat}}\text{Cu}(p,xn)$	4.21	38.47 мин	$\beta^+(100\%)$	262.3	5.29
					669.62	8.2
					962.06	6.5

Энергетическое распределение протонов в каждой фольге было определено методом Монте-Карло посредством программного пакета SRIM/TRIM [26].

Стопка, состоящая из чередующихся фольг гадолиния, меди и алюминия, была облучена в течение 10 минут на выведенном пучке циклотрона С18/18 с энергией протонов 18 МэВ и током пучка 1 мкА. Через час после облучения стопка была разобрана. Спектрометрические измерения каждой из фольг основной Gd и мониторинной Cu мишеней проводились с использованием высокочувствительного германиевого детектора HPGe компании CANBERRA. Последующий анализ спектров был выполнен посредством программы GENIE 2000 [27].

Для определения эффективности детектора использовались стандартные источники, излучавшие следующие γ -линии: 86.5 кэВ (^{155}Eu), 105.3 кэВ (^{155}Eu), 122.06 кэВ (^{57}Co), 136.47 кэВ (^{57}Co), 511 кэВ (^{22}Na) и 1274.6 кэВ (^{22}Na). Эффективность детектора оценивалась путем измерений при различных расстояниях между детектором и источниками в интервале от 0 до 50 см.

Поперечное сечение реакции на i -ом образце в стопке для реакции $^{\text{nat}}\text{Gd}(p,xn)^{155}\text{Tb}$ было вычислено с использованием известной формулы [28]:

$$\sigma = \frac{\lambda_{CA}}{\varepsilon I_{\gamma} N_A t \rho \Phi_i (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_c} (1 - e^{-\lambda t_m})} \quad (1)$$

где λ – постоянная распада, $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ (ч^{-1}); C – число событий под фотопиком; A – атомный номер ядра мишени; ε – эффективность детектора при данной γ -линии; I_γ – интенсивность излученной γ -линии; N_A – число Авогадро (6.02214×10^{23} г/моль); l – толщина мишени (см); ρ – плотность вещества мишени (г/см³); Φ_i – интенсивность протонов в i -ом образце (частиц/ч); t_i – длительность облучения (ч); t_c – время от конца облучения до начала измерения (ч); t_m – время измерения (ч).

Интенсивность протонного пучка Φ_i для каждой энергии определялась посредством мониторинга фольги из меди, предшествующей i -ой фольге гадолиния. В качестве мониторинга рассматривалась реакция $^{nat}\text{Cu}(p,x)^{63}\text{Zn}$, для которой рекомендованные со стороны МАГАТЭ значения сечений были взяты из [29]. Таким образом, интенсивность протонного пучка определяется по формуле:

$$\Phi_i = \frac{\lambda C A}{\varepsilon I_\gamma N_A l \rho \sigma (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_c} (1 - e^{-\lambda t_m})}. \quad (2)$$

Обозначения те же, что и в формуле (1). Принимая во внимание малую толщину мишеней Gd и Cu, полагаем, что поток протонов от мониторинга фольги из меди к последующей фольге с гадолинием остается неизменным. Правомочность использования в качестве мониторинга реакции $^{nat}\text{Cu}(p,x)^{63}\text{Zn}$ во всем диапазоне исследуемой области энергий протонов обусловлена тем, что на последней по направлению движения пучка фольге Cu значение энергии протонов (4.56 ± 0.85) МэВ, вычисленное посредством пакета SRIM/TRIM [26], выше порога реакции (см. табл.1).

3. Анализ результатов

Теоретические вычисления поперечного сечения реакций образования радионуклида ^{155}Tb на мишени из натурального гадолиния в диапазоне энергий протонов от порога до 18 МэВ были выполнены с использованием ядерных кодов TALYS 1.96 [19] и EMPIRE 3.2 [20] в версии по умолчанию.

На рис.2 для реакции $^{nat}\text{Gd}(p,xn)^{155}\text{Tb}$ приведены измеренная функция возбуждения совместно с данными [3, 23] и с теоретическими вычислениями посредством кодов TALYS 1.96 [19] и EMPIRE 3.2 [20]. Как видно из рис.2, измеренные функции возбуждения согласуются с данными работ [21, 23]. В диапазоне энергий протонов выше 10 МэВ экспериментальные данные несколько ниже теоретических предсказаний обоих кодов.

Радионуклидная активность для тонкой мишени определяется известным соотношением (3) [30]:

$$A^{\text{EOB}} = \frac{I \rho N_A \sigma l}{A z e} (1 - e^{-\lambda t_b}), \quad (3)$$

где A^{EOB} – активность непосредственно после конца облучения, (End Of Bombardment); I – ток пучка протонов (А); σ – измеренное поперечное сечение (см²); t_b – длительность облучения (ч); z – заряд падающей частицы; e – заряд электрона (1.602177×10^{-19} Кл).

Численные значения измеренных сечений, а также активности для каждой энергии протонов приведены в табл.2.

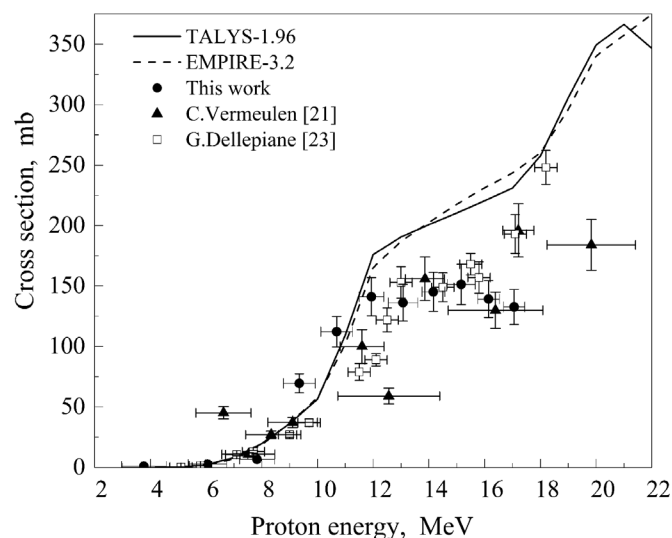


Рис.2. Измеренная функция возбуждения для реакции $^{nat}\text{Gd}(p,xn)^{155}\text{Tb}$ совместно с данными [21, 23] и теоретическими вычислениями с использованием кодов TALYS 1.96 и EMPIRE 3.2.

Для оценки вклада изотопов ^{155}Gd и ^{156}Gd в процесс образования нуклида ^{155}Tb посредством программных кодов TALYS 1.96 [19] и EMPIRE 3.2 [20] были проведены вычисления сечения реакций, учитывая природную распространенность каждого изотопа. Результаты вычислений показали, что в области энергии протонов от порога до 10.2 МэВ образование ^{155}Tb происходит через канал (p,n). В области с энергией выше 10.2 МэВ основной вклад в образование изотопа ^{155}Tb

Табл.2. Измеренные поперечные сечения и активности для тонкой мишени реакции $^{nat}\text{Gd}(p,xn)^{155}\text{Tb}$

Энергия протонов, МэВ	Сечение, мб	Активность, мКи/(мкА×ч)
3.77±0.80	1.05±0.12	4.99×10 ⁻⁴
6.05±0.69	2.64±0.30	1.25×10 ⁻³
7.83±0.63	6.75±0.77	3.21×10 ⁻³
9.35±0.57	69.57±7.86	3.31×10 ⁻²
10.69±0.57	112.23±12.63	5.33×10 ⁻²
11.94±0.44	141.16±15.81	6.71×10 ⁻²
13.07±0.53	136.15±15.18	6.47×10 ⁻²
14.16±0.41	145.23±16.12	6.90×10 ⁻²
15.16±0.50	151.34±16.72	7.14×10 ⁻²
16.14±0.39	139.23±15.32	6.61×10 ⁻²
17.06±0.38	132.71±14.53	6.30×10 ⁻²

вносит реакция $^{156}\text{Gd}(p,2n)$, что заметно на рис.2, где при этой энергии наблюдается резкий рост сечения.

С точки зрения использования радионуклида ^{155}Tb в медицине представляет интерес удельная активность и радионуклидная чистота его образования. Поэтому для получения большей активности рассмотрено использование обогащенных мишеней ^{156}Gd и ^{155}Gd .

Получение ^{155}Tb на мишени из обогащенного ^{156}Gd не представляется перспективным, так как несмотря на высокие значения сечения образования ^{155}Tb в реакции $^{156}\text{Gd}(p,2n)$ с порогом 10.2 МэВ, этот процесс сопровождается реакцией $^{156}\text{Gd}(p,n)$ с порогом 3.24 МэВ. Это приводит к образованию излучающих интенсивные жесткие γ -кванты сопутствующих нуклидов ^{156g}Tb , $^{156m1}\text{Tb}$, $^{156m2}\text{Tb}$ с периодами полураспадов 5.35 д, 22.4 ч и 5.3 ч, соответственно.

Оценка интегральной радионуклидной активности образованного ^{155}Tb для толстой мишени (TTY – Thick Target Yield) выполнена посредством численного интегрирования соотношения (4) [31]:

$$\text{TTY}(E) = \frac{N_A \lambda}{Aze} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{\sigma(E)}{dE/dx(E)} dE, \quad (4)$$

где $E_{\max}$ и $E_{\min}$ – максимальная и минимальная энергии налетающей частицы; $\sigma(E)$ – экспериментально измеренные значения сечений; dE/dx – ионизационные потери налетающей частицы в облученном материале.

Интегральная активность образования нуклида ^{155}Tb на обогащенном гадолинии ^{155}Gd в диапазоне энергий протонов до 10.8 МэВ представлена на рис.3 совместно с результатами теоретических вычислений посредством кода TALYS 1.96 [19] и данными работы [21]. Наблюдается хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными результатами.

Радионуклид ^{155}Tb в наиболее чистом виде может быть получен при использовании протонного пучка и обогащенной мишени ^{155}Gd посредством реакции

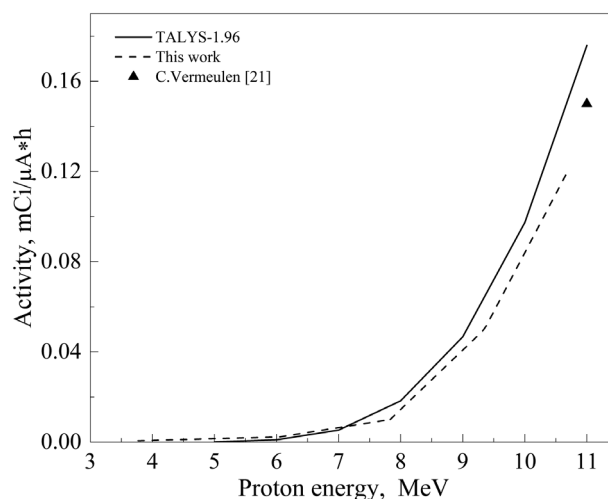


Рис.3. Сравнение измеренной интегральной активности на обогащенной мишени ^{155}Gd совместно с результатами работы [21] и теоретического вычисления по коду TALYS 1.96.

$^{155}\text{Gd}(p,n)$ (энергетический порог 1.6 МэВ). Как показали вычисления посредством кода TALYS 1.96 [19], образование сопутствующего ^{156}Tb через канал реакции $^{155}\text{Gd}(p,\gamma)$ незначительно из-за малого сечения (порядка 0.1 мб). При энергии протонов выше 10.8 МэВ происходит реакция $^{155}\text{Gd}(p,2n)$ с образованием ^{154}Tb . Таким образом, использование обогащенной мишени ^{155}Gd и протонов с энергией ниже 10.8 МэВ потенциально обеспечивает значительные выходы ^{155}Tb с высокой радионуклидной чистотой. При таком ограничении энергии протонов для интегральной активности получено значение 0.12 мКи/(мкА×ч), что согласуется с расчетной оценкой 0.15 мКи/(мкА×ч), представленной в работе [21].

4. Радионуклидная чистота

Метод отделения изотопа ^{155}Tb от гадолиниевой мишени и других примесей был разработан в CERN с помощью стендовых экспериментов и описан в работе [27]. По результатам стендовых экспериментов была разработана, создана и внедрена система химического разделения в горячей камере. Эта система позволяет обрабатывать высокие активности радионуклида и при этом снижать дозу радиации, которой подвергается оператор.

Представленные в работе [32] исследования продемонстрировали, что хотя реакция $^{156}\text{Gd}(p,2n)^{155}\text{Tb}$ обеспечивает более высокие выходы, однако значительно уступает по радионуклидной чистоте по сравнению с конечным продуктом ядерной реакции $^{155}\text{Gd}(p,n)^{155}\text{Tb}$.

5. Заключение

Была измерена функция возбуждения реакции $^{\text{nat}}\text{Gd}(p,n)^{155}\text{Tb}$ в области энергии протонов от порога до 18 МэВ. Полученные значения сравнены как с результатами теоретических вычислений посредством кодов TALYS 1.96 и EMPIRE 3.2, так и с данными других научных центров.

Обсуждена перспектива производства тераностического изотопа ^{155}Tb на выведенном протонном пучке медицинского циклотрона C18/18, обсуждены условия его производства. Установлено, что высокой активности радионуклида ^{155}Tb можно достичь через реакцию (p,n) путем облучения протонами высокообогащенных мишеней ^{155}Gd . Однако для обеспечения радионуклидной чистоты конечного продукта важно, чтобы энергия протонов не превышала пороговое значение для реакции (p,2n), равное 10.8 МэВ. При соблюдении этих условий интегральная активность от толстой гадолиниевой мишени составляет 0.12 мКи/(мкА×ч).

Авторы выражают благодарность обслуживающему персоналу циклотрона C18/18 за обеспечение стабильным пучком при облучении мишеней, а также коллективу Отделения по исследованию и производству изотопов Национальной научной лаборатории имени А.И. Алиханяна за оказанную помощь.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке МОНКС РА в рамках научных проектов № 20TTSG-1C006 и № 23AA-1C014.

ЛИТЕРАТУРА

1. **R.J. Hicks, M.S. Hofman.** Nat. Rev. Clin. Oncol., **712**, 9 (2012).
2. **G. Lucignani.** Q.J. Nucl. Med. Mol. Imaging, **117**, 9 (2005).
3. National Nuclear Data Center (NNDC), <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>
4. **C. Müller, E. Fischer, M. Behe, U. Köster et al.** Nucl. Med. Biol. B Beam Interact with Mater. Atoms, **41**, 58 (2014).
5. **G. Dellepiane, P. Casolaro, A. Gottstein et al.** Applied Radiation and Isotopes, **200**, 110969 (2023).
6. **G.F. Steyn et al.** Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact with Mater. Atoms, **319**, 128 (2014).
7. **П.П. Дмитриев, Г.А. Молин, З.П. Дмитриева.** Атомная энергия, **66**, 419 (1989).
8. **F. Tárkányi et al.** Appl. Radiat. Isot., **83**, 25 (2014).
9. **F. Szelecsényi et al.** J. Radioanal. Nucl. Chem., **307**, 1877 (2016).
10. **C. Duchemin et al.** Appl. Radiat. Isot., **118**, 281 (2016).
11. **G. Gyürky et al.** J. G Phys. Nucl. Part. Phys., **37**, 115201 (2010).
12. **A.G. Kazakov et al.** Radiochim. Acta., **106**, 135 (2018).
13. **R.E. Gayosoet et al.** Radiochim. Acta., **72**, 55 (1996).
14. **D. Ichinkhorloo et al.** Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact with Mater. Atoms, **499**, 46 (2021).
15. **R.E. Gayosoet et al.** J. Radioanal. Nucl. Chem., **218**, 223 (1997).
16. **F. Tárkányi et al.** Ann. Nucl. Energy, **62**, 375 (2013).
17. **F. Tárkányi et al.** Appl. Radiat. Isot., **98**, 87 (2015).
18. **H.A. Mkrtchyan.** J. Contemp. Phys., **58**, 105 (2023).
19. **A. Koning, S. Hilaire, S. Goriely.** TALYS-1.96/2.0. Simulation of nuclear reactions, December 30, 2021, https://tendl.web.psi.ch/tendl_2021/talys.html.
20. **M. Herman, R. Capote, M. Sin, A. Trkov et al.** EMPIRE-3.2 Malta modular system for nuclear reaction calculations and nuclear data evaluation, August 12, 2013, <http://www.nndc.bnl.gov/empire/main.html>.
21. **C. Vermeulen, G.F. Steyn, F. Szelecsenyi et al.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **275**, 24 (2012).
22. **R. Formento-Cavaier, F. Haddad, C. Alliot et al.** Nuclear Inst. And Methods in Physics Research B, **478**, 174 (2020).
23. **G. Dellepiane, P. Casolaro, Ch. Favarettoet et al.** Applied Radiation and Isotopes, **184**, 110175 (2022).
24. **R.K. Chapman, A.S. Voyles, N. Gharibyan et al.** Applied Radiation and Isotopes, **171**, 109647 (2021).
25. **C. Birattari, E. Gadioli, E. Gadioli-Erba et al.** Nuclear Physics A, **201**, 579 (1973).
26. **J.F. Ziegler et al.** The Stopping and Range of Ions in Matter (2010) www.srim.org.
27. GENIE-2000 Basic Spectroscopy S500, <https://genie-2000-basic-spectroscopy-s500.software.informer.com>.
28. **K. Kim, M.U., Khandaker, et al.,** Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B, Beam Interact with Mater. Atoms, **322**, 63 (2014).
29. **A., Hermanne, et al.** Nuclear Data Sheets, **148**, 338 (2018), <https://www->

nds.iaea.org/medical/monitor_reactions.html.

30. **O. Lebeda, M. Pruszyński**, Applied Radiation and Isotopes, **68**, 23 (2010).
31. **M. Sitarz, E. Nigron, A. Guertin et al.** MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) Instruments, **3**, 7 (2019).
32. **C. Favaretto, Z. Talip, F. Borgna et al.** EJNMMI Radiopharm. Chem., **6**, 37 (2021)

ՑԻԿԼՈՏՐՈՆ C18/18-Ի ՎՐԱ ^{155}Tb ԲԺՇԿԱԿԱՆ ԻԶՈՏՈՊԻ ԱՐՏԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ռ.Վ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ա.Գ. ԲԱՐՍԵԴՅԱՆ, ՅՈՒ.Հ. ՂԱՐԻԲՅԱՆ, Ա.Վ. ԳՅՈՒՐԺԻՅԱՆ,
Ի.Ա. ՔԵՐՈԲՅԱՆ, Հ.Ա. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Ա.ՅՈՒ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Աշխատանքում ներկայացված է օնկոլոգիական հիվանդությունների ախտորոշման և բուժման համար օգտագործվող ^{155}Tb բժշկական իզոտոպի արտադրության ուսումնասիրության արդյունքները՝ ցիկլոտրոն C18/18-ի պրոտոնային փնջի միջոցով: Հարուցված ակտիվության չափումները կատարվել են ակտիվացիոն անալիզի մեթոդով, որին հաջորդել է սպեկտրաչափական անալիզը: Որպես հիմնական թիրախ օգտագործվել է բնական գադոլինիումը: Կատարվել է զրգոման ֆունկցիաների տեսական հաշվարկներ $^{nat}\text{Gd}(p,xn)^{155}\text{Tb}$ ռեակցիաների համար՝ օգտագործելով TALYS 1.96 և EMPIRE 3.2 ծրագրային փաթեթները: Ստացված արդյունքները համեմատվել են տեսական հաշվարկների, ինչպես նաև այլ, մինչ այժմ հայտնի, փորձարարական արդյունքների հետ: Գիտափորձի արդյունքում ստացված ^{155}Tb ռադիոնուկլիդ ինտեգրալ ակտիվությունը համեմատվել է TALYS 1.96 կոդով հաշված տեսական արդյունքի և այլ փորձարարական տվյալների հետ:

INVESTIGATION OF PRODUCTION POSSIBILITY OF MEDICAL ISOTOPE ^{155}Tb ON CYCLOTRON C18/18

R.V. AVETISYAN, A.G. BARSEGHYAN, YU.H. GHARIBYAN,
A. V. GYURJINYAN, I.A. KERBYAN, H.A. MKRTCHYAN, A.YU. PETROSYAN

The results of studies on the production of the ^{155}Tb isotope, which is used in theranostic applications for oncological diseases, utilizing the proton beam of the medical cyclotron C18/18 are presented. The measurements of the induced activity were carried out using the activation method, followed by spectrometric analysis. Natural gadolinium was used as the main target. Excitation functions were calculated for the $^{nat}\text{Gd}(p,xn)^{155}\text{Tb}$ reactions using TALYS 1.96 and EMPIRE 3.2 theoretical nuclear codes. The measured cross-section values were compared with the results of the theoretical calculations as well as with the experimental data from other works. The experimental value of the integral activity of the radionuclide ^{155}Tb was compared with the result obtained with the TALYS 1.96 code and with early published data.