

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.039.8.002,621.384.643

ПОЛУЧЕНИЕ МЕДИЦИНСКИХ РАДИОИЗОТОПОВ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ПРОТОНОВ ПРОЕКТА DARIA

© 2026 г. В. Е. Замышляева^а, *, Н. В. Марков^а, Т. В. Кулевой^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

*E-mail: valentina.zamyshlyeva@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2025 г.

После доработки 14.07.2025 г.

Принята к публикации 06.08.2025 г.

Оценена возможность расширения применения установки компактного источника нейтронов DARIA на базе сильноточного линейного ускорителя протонов на область наработки радиоизотопов для нужд ядерной медицины. Первичная область применения данной установки—широкий спектр нейтронных исследований для фундаментальных и прикладных целей. Произведен расчет потенциально нарабатываемых на ускорителе проекта DARIA активностей изотопа ^{18}F аналитически и при помощи программных пакетов. Представлены результаты расчетов и выводы о возможности использования ускорителя для наработки медицинских радиоизотопов.

Ключевые слова: нейтронные исследования, линейный ускоритель, ядерная медицина, радиоизотопы

DOI: 10.56304/S2079562926010513

ВВЕДЕНИЕ

В рамках реализации ФНТП развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры был запущен проект по созданию компактного источника нейтронов DARIA (neutron source Dedicated to Academical Research and Industrial Applications—источник нейтронов, предназначенный для научных исследований и промышленного применения). В основе проекта лежит использование сильноточного линейного ускорителя протонов и нейтрон-генерирующей мишени с сопутствующей системой формирования требуемого энергетического спектра нейтронов, а также ряда экспериментальных станций для проведения исследований на нейтронных пучках [1]. Такой источник нейтронов может быть установлен на базе научных или образовательных центров, что позволит создать инфраструктуру нейтронных исследований, охватывающую всю территорию страны и обеспечить доступность нейтронных исследований для научного сообщества.

Одной из особенностей разрабатываемого линейного ускорителя является возможность ускорять протоны до шести различных значений энергии в диапазоне от 3.3 до 13 МэВ. Это достигается путем включения/выключения резонаторов секции DTL. Как следствие появляется возможность расширения областей применения проекта DARIA. В частности, на базе установки будет возможно проведение облучения электронно-компонент-

ной базы, изучение радиационной стойкости материалов, изучение механизмов воздействия протонов низких энергий на живые системы и получение медицинских радиоизотопов. При этом все эти работы могут выполняться параллельно, поскольку заложенная модульность линейного ускорителя позволяет создать большое количество независимых каналов транспортировки пучка в различные экспериментальные залы. Максимальная энергия протонного пучка 13 МэВ является достаточной для наработки довольно широкого ряда диагностических радиоизотопов, используемых в ядерной медицине (^{18}F , ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N и т.д.). Однако, в некоторых случаях, в зависимости от основного эксперимента, ускоритель может быть настроен на более низкую энергию. Поскольку предполагается что наработка радиоизотопов может вестись параллельно с другими экспериментами, необходимо было провести оценку получаемой активности в зависимости от энергии выводимого пучка. В качестве оценочной была выбрана реакция $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$, ввиду того что в настоящее время радиоизотоп ^{18}F является наиболее распространенным и востребованным среди ПЭТ-изотопов. Также были проведены оценки радиационных полей в области размещения мишени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разрабатываемый сильноточный линейный ускоритель состоит из источника протонов GISMO

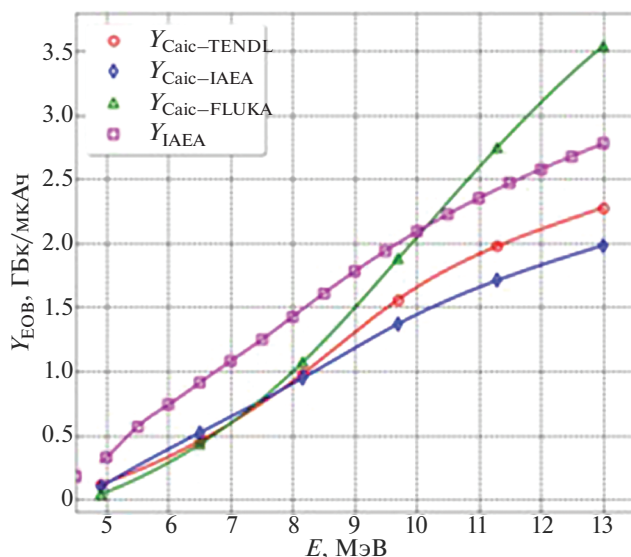


Рис. 1. Графики зависимости активности нарабатываемого радиоизотопа ^{18}F от энергии пучка протонов при токе пучка 1 мкА и продолжительности облучения 1 час.

(ИПФ РАН), ускоряющей структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) и шести резонаторов с пятизоровыми структурами с трубками дрейфа (DTL). Энергия протонов на выходе RFQ соответствует значению 3.3 МэВ. Резонаторы DTL обеспечивают дальнейшее ускорений пучка до энергии 13 МэВ. Путем независимого включения/выключения резонаторов можно получить на выходе ускорителя протоны с энергией 4.9, 6.5, 9.7, 11.3 и 13 МэВ. Максимальные проектные параметры работы линейного ускорителя—импульсный ток пучка 100 мА, длительность импульса 100 мкс, частота следования импульсов 100 Гц [2].

С целью определения активности целевого изотопа ^{18}F было проведено моделирование облучения мишенной сборки в простой геометрии. Моделирование осуществлялось методом Монте-Карло в программном пакете FLUKA [3]. При проведении расчетов задавался аксиально симметричный пучок диаметром 1.12 см с равномерным поперечным распределением частиц. Пучок сначала проходил через выходное окно вакуумной камеры канала транспортировки пучка, а затем попадал в мишень. Выходное окно представляет собой титановую фольгу толщиной 25 мкм. Мишенная сборка выполнена в виде цилиндра из нержавеющей стали с выемкой диаметром 4 см и глубиной 0.25 см заполненной водой. Степень обогащения воды по изотопу ^{18}O соответствует 98%. Было выполнено пять расчетов для указанных выше значений энергии пучка. Статистика составляла 10^8 событий. Число образовавшихся

ядер изотопа ^{18}F на один протон в объеме мишени определялось с помощью модуля RESNUCLEI. Также по результатам моделирования были определены распределения амбиентного эквивалента дозы нейтронов и фотонов вокруг мишени. Для этого использовалась встроенная функция перехода от потока образующихся нейтронов и фотонов к амбиентному эквиваленту дозы с использованием коэффициентов AMB74 (Публикация 74 МКРЗ).

Также были проведены аналитические расчеты нарабатываемой активности изотопа ^{18}F , с использованием следующего соотношения:

$$A = \frac{\omega N_A I}{M e} (1 - e^{-\lambda t}) \int_{E_k}^{E_0} \frac{\sigma(E)}{dE/dx} dE,$$

где ω — массовая доля исходного изотопа в мишени, N_A — число Авогадро, M — молярная масса исходного изотопа, I — ток пучка, λ — постоянная распада, e — элементарный заряд, σ — сечение реакции, dE/dx — потери энергии пучка в объеме мишени, E_0 — начальная энергия налетающих частиц, E_k — их конечная энергия на выходе из мишени. При проведении аналитических расчетов использовались те же материалы и толщины что и при моделировании методом Монте-Карло. Значение энергии налетающих частиц после прохождения титановой фольги и потери энергии пучка в воде определялись с помощью программы SRIM [4]. Были использованы два набора данных зависимости сечения реакции от энергии протонов, взятые из базы TENDL и МАГАТЭ. Интерполяция данных по потерям энергии пучка и сечениям реакции, а также интегрирование осуществлялось с помощью модуля SciPy, являющегося библиотекой языка Python. Помимо этого, был проведен расчет с использованием общедоступного программного пакета Radionuclide Yield Calculator, разработанного в институте Argonx (Нант, Франция).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 1 представлены графики зависимости активности нарабатываемого радиоизотопа ^{18}F от энергии пучка протонов при токе пучка 1 мкА и продолжительности облучения 1 ч, полученные в результате моделирования в программе FLUKA (Y_{MC}) и аналитического расчета ($Y_{\text{Calc-IAEA}}$ и $Y_{\text{Calc-TENDL}}$). На график также нанесены рекомендованные МАГАТЭ значения активности (Y_{IAEA}) [5].

Из представленных зависимостей видно, что результаты аналитического расчета с использованием данных по сечениям реакции из TENDL и МАГАТЭ сильно различаются в диапазоне энергий от 8 до 13 МэВ (на уровне 10%). Это обусловлено различиями в используемых сечениях реакций при данных энергиях (рис. 2). Полученные значения

аналитического расчета незначительно отличаются от данных, полученных с использованием программного пакета Radionuclide Yield Calculator (на уровне 1–5% в зависимости от энергии), что обусловлено различием в используемых методах интерполяции. Сравнивая результаты аналитического расчета ($Y_{\text{Calc-IAEA}}$) со значениями, рекомендованными МАГАТЭ (Y_{IAEA}), можно отметить некоторое различие, несмотря на то, что в обоих случаях используются один и те же данные по сечениям реакции. При этом различие согласуется с данными приведенными в литературе. В частности, при энергии протонов 13 МэВ отношение $Y_{\text{IAEA}}/Y_{\text{Calc-IAEA}} = 1.4$, соответствует значению в работе [6]. Сопоставление результатов Монте-Карло моделирования с результатами аналитических расчетов показывает значительное отличие при энергиях больше 10 МэВ. Это обусловлено двумя факторами. Во-первых, рекомендованные данные МАГАТЭ основаны на аналитическом расчете активности с использованием аппроксимированной функции для сечения реакции, которая не учитывает ряд резонансов [5], в то время как встроенные библиотеки сечения реакций в программе FLUKA основаны на экспериментальных данных. Во-вторых, в программе FLUKA при проведении моделирования учитываются все ядерные взаимодействия. В результате помимо первичного пучка вклад в результирующую активность изотопа вносят и вторичные частицы, которые не учитываются при аналитическом расчете.

Были проведены оценки получаемой активности ^{18}F -FDG при облучении мишени протонами на установке DARIA, для трех значений энергий пучка (табл. 1). При проведении расчетов средний ток пучка был зафиксирован на уровне 100 мкА, что соответствует текущим допустимым значениям для водных мишеней (например, мишень IBA конической формы с объемом воды 4.2 мл рассчитана на максимальный ток 135 мкА), а продолжительность облучения составляла 120 мин. Значение радиохимического выхода ^{18}F -FDG соответствовало 60%. Для сравнения в таблице также приведены значения активности ^{18}F -FDG получаемые в рутинной клинической практике в Братиславском центре ядерной медицины (циклотрон IBA Cyclone 18/9) [7], а также данные компании IBA для цик-

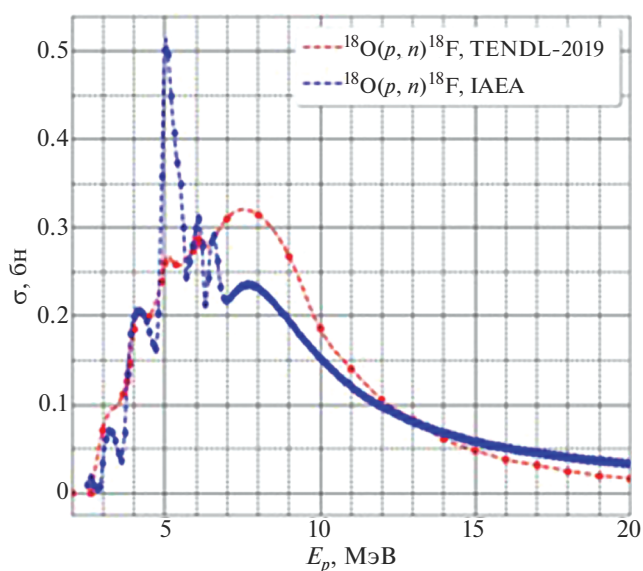


Рис. 2. Зависимости сечения реакции $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$ от энергии протонов.

лотрона IBA Cyclone Key. Из представленных результатов видно, что при энергии протонов 9.7 МэВ можно будет получать сопоставимые значения активности ^{18}F -FDG. При уменьшении энергии пучка выход значительно уменьшается, тем не менее получаемой активности достаточно для обеспечения нескольких десятков индивидуальных доз ^{18}F -FDG.

На рис. 3 и 4 приведены распределения амбиентного эквивалента дозы нейтронов и фотонов вокруг мишени при облучении протонами с энергией 6.5 и 13 МэВ.

Из представленных распределений видно, что уменьшение энергии протонов в два раза приводит к значительному уменьшению радиационной нагрузки вокруг мишени (практически на один порядок, если рассматривать точку на расстоянии 20 см от мишени). При условии работы на низких энергиях выводимого пучка это может позволить значительно уменьшить требования к радиационной безопасности, особенно если использовать локальную защиту мишенной сборки. Так, например, в работе [8] отмечалось, что использова-

Таблица 1. Активности ^{18}F -FDG при облучении мишени протонами на установке DARIA и на циклотронах IBA

	IBA Cyclone 18/9	IBA Cyclone Key	DARIA		
Энергия протонов, МэВ	18	9.2	9.7	6.5	4.9
Ток пучка, мкА	45	80	100	100	100
Время облучения, мин	120	120	120	120	120
Активность ^{18}F (ЕОВ), ГБк	203	142	230	108	19
Активность ^{18}F -FDG, ГБк	140	111	138	64	11

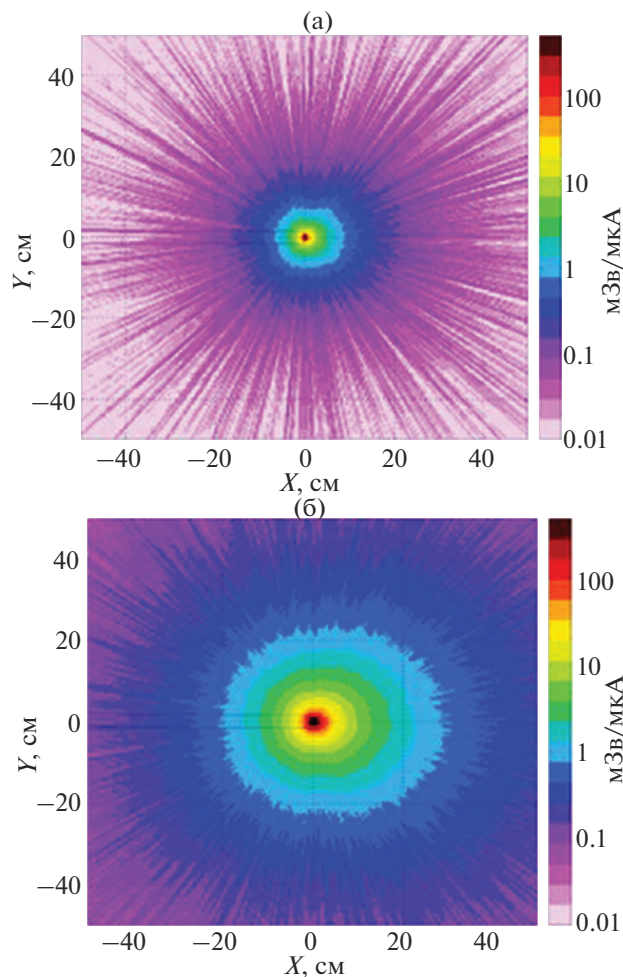


Рис. 3. Распределения амбиентного эквивалента дозы нейтронов вокруг мишени при облучении протонами с энергией 6.5 (а) и 13 (б) МэВ.

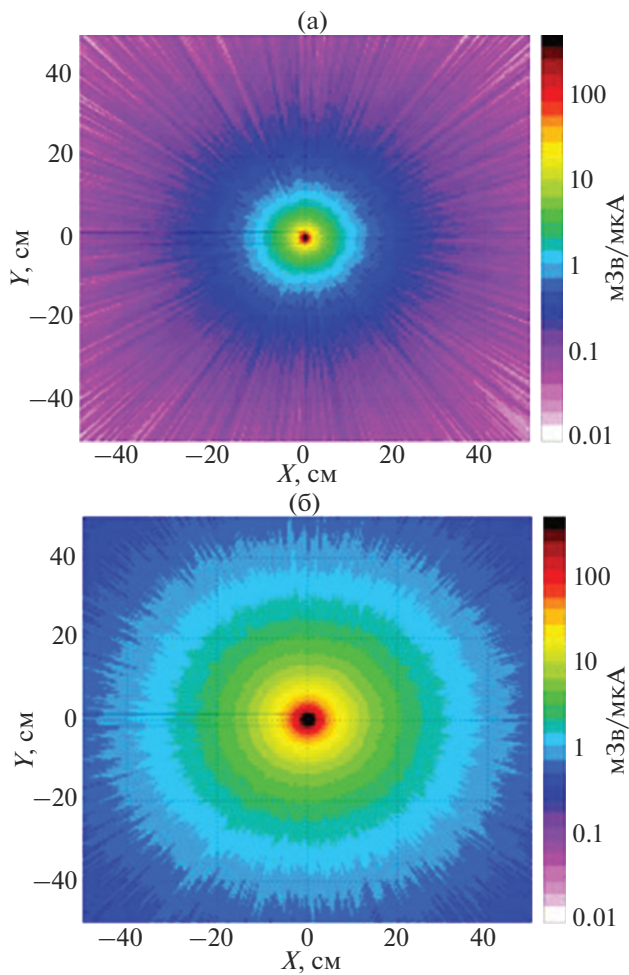


Рис. 4. Распределения амбиентного эквивалента дозы фотонов вокруг мишени при облучении протонами с энергией 6.5 (а) и 13 (б) МэВ.

ние локальной защиты радиусом 1 м, состоящей из слоев железа и борированного полиэтилена, позволит снизить мощность дозы на поверхности защиты до уровня 2 мкЗв/ч, при облучении водной мишени протонами с энергией 10 МэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках реализации проекта по созданию компактного источника нейтронов на базе сильноточного линейного ускорителя рассматриваются возможные варианты расширения области применения установки DARIA. Модульная структура ускорителя, регулируемый ток пучка, а также возможность изменения энергии пучка в диапазоне от 3.3 до 13 МэВ позволят решать широкий спектр прикладных задач, в том числе наработку медицинских радиоизотопов. Причем получение радиоизотопов можно будет проводить параллельно с другими исследованиями при различных энергиях протонов с ускорителя, не меняя настройки пучка. Так,

проведенные расчеты показывают, что даже при использовании низких энергий пучка можно будет получать до нескольких десятков индивидуальных доз ^{18}F -FDG (при средней активности 400 МБк на пациента весом 80 кг). Этого может быть достаточно для обеспечения локальных потребностей в данном типе радиоизотопа, при условии проведения требуемого лицензирования. Помимо этого, на установке DARIA можно будет осуществлять отработку технологий создания мишенных устройств и проведения экспериментальных исследований по получению новых медицинских радиоизотопов. Также на ее базе будет возможно реализовать подготовку специалистов в области радиохимии.

В дальнейшем успешная реализация проекта DARIA может послужить основой для создания компактного радиоизотопного комплекса на базе линейного ускорителя, такого как, например, мобильная установка для производства РФЛП на основе компактного линейного ускорителя про-

тонов PULSARTM 7 с энергией 7 МэВ американской компании AccSys Technology, Inc [9, 10]. Линейный ускоритель протонов в виду малых потерь частиц в отличие от циклотронов требует меньшей радиационной защиты и основная защита необходима в месте расположения мишени. По предварительным оценкам вес ускорителя на 7 МэВ с локальной защитой мишени не будет превышать 10 т, а площадь помещения необходимая для размещения ускорителя с сопутствующим оборудованием, а также локальной защиты мишени будет не более 20 м². Для сравнения вес циклотрона IBA CYCLONE KEY (9.2 МэВ) составляет 7.5 т, вес дополнительной защиты (опционально) 48 т. Площадь помещения для размещения циклотрона без дополнительной защиты 10 м², с дополнительной защитой 26 м².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Pavlov K.A. *et al.* // Crystallogr. Rep. 2022. V. 67. P. 3–17.
2. Kulevoy T.V. // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. P. 768–771.
3. Böhlen T.T. *et al.* // Nucl. Data Sheets. 2014. V. 120. P. 211–214.
4. Ziegler J.F. *et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2010. V. 268. P. 1818–1823.
5. IAEA-TECDOC-1211. Charged particle cross-section database for medical radioisotope production: diagnostic radioisotopes and monitor reactions. 2001. Vienna: IAEA.
6. Infantino A. *et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2016. V. 366. P. 117–123.
7. Gaspar L. *et al.* // Am. J. Nucl. Med. Mol. Imaging. 2016. V. 6. P. 154–165.
8. Vretenar M. *et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. V. 2420. P. 012104.
9. Hamm R.W., Hamm M.E. // How to Create a Business out of Manufacturing Linacs. Proc. of EPAC. 2006. Edinburgh, Scotland.
10. Pramudita A. // Atom Indonesia. 2011. V. 37 (1). P. 1–4.

Obtaining of the Medical Radioisotopes Using the Linear Proton Accelerator of DARIA Project

V. E. Zamyshlyayeva¹, *, N. V. Markov¹, and T. V. Kulevoy¹

¹ National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: valentina.zamyshlyayeva@mail.ru

Received May 19, 2025; revised July 14, 2025; accepted August 6, 2025

Abstract—The possibility of expanding the application of DARIA compact neutron source installation based on a high-current linear proton accelerator to the field of radioisotope production for the needs of nuclear medicine is evaluated. The primary application area of this facility is a wide range of neutron research for fundamental and practical purposes. The calculation of the ¹⁸F isotope activities potentially generated at the accelerator of DARIA project was performed analytically and using software packages. The results of calculations and conclusions about the possibility of using the accelerator for medical radioisotopes production are presented.

Keywords: neutron research, linear accelerator, nuclear medicine, radioisotopes