

РАДИОИЗОТОПНЫЙ КОМПЛЕКС РИЦ-80 В ПЕТЕРБУРГСКОМ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

*В.Н. Пантелеев, А.Е. Барзах, Л.Х. Батист, Д.В. Федоров, В.С. Иванов,
С.А. Кротов, Ф.В. Мороз, П.Л. Молканов, С.Ю. Орлов, Ю.М. Волков
Петербургский институт ядерной физики, Санкт-Петербург*

В ПИЯФ завершено строительство циклотрона Ц-80, рассчитанного на получение пучков протонов с энергией 40–80 МэВ и током до 200 мкА. Задачей Ц-80 является получение широкого спектра радионуклидов для диагностики и терапии. Разработан проект комплекса РИЦ-80 (Радиоактивные Изотопы на Ц-80). Особенностью проекта является использование масс-сепаратора в комбинации с мишенно-ионным устройством для получения ионных пучков радиоизотопов высокой чистоты, что особенно важно для медицинских приложений. Представлены первые результаты исследований мишенно-ионных устройств масс-сепаратора для получения изотопов ^{82}Sr , ^{223}Ra и ^{224}Ra высокой чистоты.

Ключевые слова: радионуклиды для медицины, радиоизотопный комплекс, масс-сепаратор

Введение

Последние десятилетия отмечены интенсивным внедрением методов ядерной физики и других наукоемких технологий в области, непосредственно связанной с качеством человеческой жизни и, в частности, с развитием совершенно новых областей медицины. Использование достижений фундаментальной ядерной науки послужило основой создания новой области современной медицины – так называемой ядерной медицины. Уникальность методов ядерной медицины состоит в том, что они позволяют диагностировать функциональные отклонения жизнедеятельности органов на самых ранних стадиях болезни, когда человек еще не чувствует симптомы заболевания. Это позволяет быстрее обнаруживать и лечить большое количество заболеваний, существенно экономя средства на лечение. Технологии ядерной медицины, направленные как на диагностику, так и на терапию заболеваний, в основном базируются на использовании различных видов излучений радиоактивных нуклидов.

Сначала основными источниками получения радионуклидов для медицины являлись реакторы на тепловых нейтронах. Поскольку в последнее десятилетие во многих странах ширится общественное движение, требующее запрета на строительство новых реакторов, а также закрытия старых, ученые интенсивно ищут новые (отличные от реакторных) методы производства радионуклидов для медицины. В России строительство новых исследовательских и промышленных атомных реакторов также было заморожено, но по другой причине – из-за отсутствия в течение последних нескольких десятилетий финансирования подобных проектов. Это привело к значительному свертыванию работ и общему отставанию России в ядерной медицине.

В результате указанных причин (а также ввиду некоторых других существенных преимуществ ускорительных методов) в настоящее время на первое место в производстве радионуклидов выходят ускорители заряженных частиц – циклотроны, как наиболее безопасные и надежные установки. Номенклатура цикло-

тронных радионуклидов шире и разнообразнее, чем номенклатура радионуклидов, получаемых на реакторах. Используя мишени, содержащие ^{238}U , можно с достаточно высоким выходом получать в реакции деления протонами те же радионуклиды, что и на тепловых нейтронах реакторов. При этом важно подчеркнуть, что только на ускорителях заряженных частиц можно производить радионуклиды, излучающие позитроны, используемые для ПЭТ – позитронной эмиссионной томографии.

В ПИЯФ в 2015 г. произведен запуск сильного протонного циклотрона, а также разработан проект радиоизотопного комплекса РИЦ-80. Одной из главных задач проекта является разработка и создание трех мишенных станций, одна из которых соединена с масс-сепаратором для получения медицинских радионуклидов высокой чистоты. На РИЦ-80 планируется производить весь спектр наиболее часто используемых в медицине радионуклидов, включая генераторный ПЭТ-радионуклид ^{82}Sr , используемый для диагностики заболеваний мозга [1], сердечно-сосудистых заболеваний, а также масс-сепарированные распадающиеся альфа-распадом изотопы $^{223}, ^{224}\text{Ra}$, используемые для терапии злокачественных опухолей на самой ранней стадии их образования [2, 3].

Комплекс РИЦ-80

На рис. 1 приведена фотография ускорителя Ц-80 [4], установленного в экспериментальном зале синхроциклотрона ПИЯФ СЦ-1000 (энергия протонов 1 ГэВ, интенсивность пучка 1 мкА) [5]. Ускоритель Ц-80 рассчитан на получение протонов с энергией 40–80 МэВ и током до 200 мкА, предназначенных для лечения злокачественных образований глаза и для получения широкого спектра радиоизотопов, используемых как для диагностики, так и для терапии различных заболеваний.

На рис. 2 приведена схема расположения элементов комплекса РИЦ-80. Для более эффективного использования пучкового времени ускорителя Ц-80 планируется использование двух мишенных станций: в то время, пока происходит радиационное охлаждение одной из станций, производящей долгоживущий изотоп, вторая станция может быть использована для производства другого радионуклида. Масс-сепаратор с собственной мишенной станцией будет использоваться для производства сверх-



Рис. 1. Комплекс Ц-80 в ПИЯФ

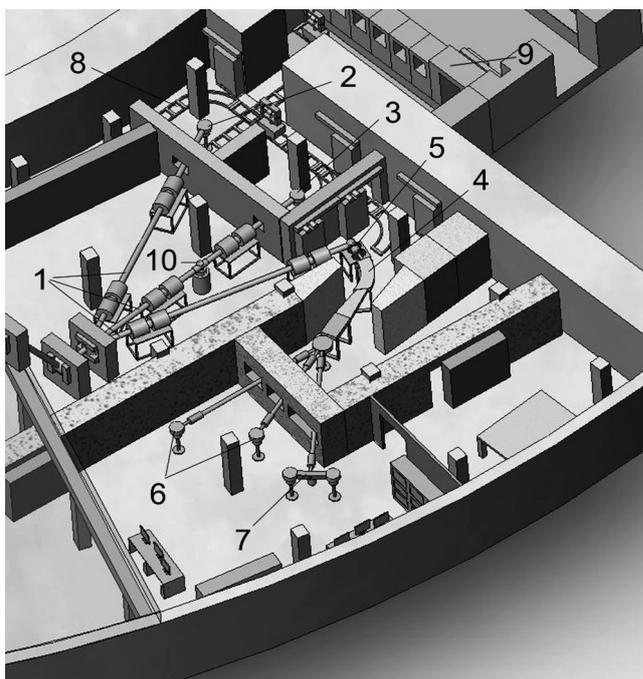


Рис. 2. Схема размещения элементов радиоизотопного комплекса РИЦ-80: 1 – разводка протонного пучка к мишенным станциям; 2 – мишенная станция для получения радиоизотопов радиохимическими методами; 3 – мишенная станция для получения радиоизотопов методом высокотемпературного выделения; 4 – масс-сепаратор для получения образцов радионуклидов сверхвысокой чистоты; 5 – мишенная станция масс-сепаратора; 6 – коллекторы масс-сепарированных ионов; 7 – детекторные станции для контроля чистоты получаемых образцов радиоизотопов; 8 – система для транспортировки облученных мишенных устройств в специальные хранилища или к “горячим” камерам

чистых медицинских радионуклидов. Каждая мишенная станция снабжена механизмом перемещения радиоактивных мишеней в специальные защищенные хранилища, а также к “го-

Таблица 1

Значения активности (в мишени) для некоторых радионуклидов, планируемых для получения на РИЦ-80 с протонным пучком 100 мкА, рассчитанные по программе FLUKA [8]

Изотоп	Время полураспада, сут	Материал мишени	Время облучения, ч	Активность в мишени, Ки
Ge-68	270,8	Ga	240	2
Sr-82	25,55	Rb	240	14
Mo-99	2,74	Mo	200	7
In-111	2,8	Cd	25	25
I-123	0,55	Te	5	11
I-124	4,17	Te	200	10
Tb-149	0,17	Gd	12	3
Ra-223	11,4	ThC	240	4
Ra-224	3,66	ThC	240	0,5

рячим” камерам для выделения необходимых нуклидов из мишенного вещества и приготовления радиофармпрепаратов.

Оценка выходов радионуклидов на РИЦ-80

Протонный циклотрон Ц-80 с энергией протонов 40–80 МэВ и током пучка до 200 мкА позволит получать источники высокой активности практически всех медицинских радионуклидов, производимых на ускорителях. В табл. 1 приведены расчетные значения активности радиоизотопов, получение которых планируется на комплексе РИЦ-80.

Расчеты позволяют определить оптимальную толщину мишенного материала для каждого конкретного случая. Например, для мишени из металлического рубидия толщина мишенного вещества составляет около 5 см. В качестве мишенных материалов будут использоваться вещества как с естественным, так и с обогащенным изотопным составом. Важно подчеркнуть, что значения активностей, представленные в табл. 1, – это ожидаемые значения активности в мишенном материале до выделения. Значения активностей выделенных из мишени радионуклидов могут быть меньше из-за неполного выделения. В настоящее время проводится разработка мишенных устройств с улучшенными показателями эффективности выделения. Эксперименты с прототипами таких мишеней проводятся на синхроциклотроне ПИЯФ с энергией протонов 1 ГэВ.

Как видно из табл. 1, комплекс РИЦ-80 позволит получать широкий спектр изотопов, производимых в настоящее время на аналогичных установках. Уникальные параметры комплекса РИЦ-80 обеспечат получение и других (не указанных в табл. 1) радионуклидов, кото-

рые рассматриваются в настоящее время в качестве перспективных для диагностики и терапии. Среди них ^{64}Cu , ^{67}Cu , ^{67}Ga , ^{77}Br и ^{81}Rb .

Другим перспективным направлением ядерной медицины является изучение возможности использования радионуклидов с более короткими временами жизни, чем у изотопов, применяемых в настоящее время. Это позволило бы значительно уменьшить дозу облучения, получаемую пациентом. Также важной задачей остается получение радиоактивных источников высокой чистоты, что требует высокоэффективного выделения нужного нуклида из смеси изотопов, произведенных в мишени.

Он-лайн масс-сепаратор комплекса РИЦ-80

Получение и исследование радиоактивных изотопов на ISOL (Isotope Separator On-Line)-системах – одно из основных направлений в ядерной физике. Основная задача – получение и изотопическое разделение полученных нуклидов – эффективно решается ISOL-системами, сопряженными с источниками пучков различных частиц: протонов, нейтронов или тяжелых ионов. Системы такого типа, установленные на пучках протонных ускорителей – ISOLDE (CERN, Швейцария), ISAC (TRIUMF, Канада), ИРИС (ПИЯФ, Россия) [9, 10, 5] – в настоящее время в состоянии производить более 2 тыс. изотопов практически всех элементов. Получаемые радионуклиды с периодами полураспада от нескольких миллисекунд до нескольких тысяч лет используются для исследований в ядерной физике и астрофизике, физике твердого тела, ядерной медицине и медицинской физике.

Принцип действия ISOL-системы состоит в следующем (рис. 2). Пучок протонов (или других частиц) бомбардирует мишенное устройство, нагретое до температуры 1800–2200°C и находящееся в вакуумной камере. Изотопы, полученные в результате ядерных реакций в материале мишени, диффундируют в виде атомов из толщины мишенного материала и попадают в ионный источник, где происходит их ионизация. Полученные ионы извлекаются и ускоряются электрическим полем вытягивающего электрода до энергии 30–50 кэВ и формируются в ионный пучок с помощью системы электростатических линз. Пучок моноэнергетических ионов поступает в анализирующий магнит масс-сепаратора, где под действием магнитного поля происходит геометрическое разделение ионов разных масс. Далее сепарированные ионы поступают в камеру разводки пучков, откуда и доставляются к ионным коллекторам для имплантации. Время имплантации выбирается исходя из требуемых активности и чистоты радиоизотопного образца, которые можно контролировать с помощью α -, β - и γ -детекторов, установленных на коллекторе вблизи точки имплантации.

Масс-сепараторный метод обеспечивает следующие преимущества:

- ✓ получение источников радионуклидов высокой чистоты;
- ✓ несколько разделенных по массам изотопов могут накапливаться одновременно;
- ✓ глубина имплантации в несколько десятков ангстрем позволяет использовать в качестве коллектора очень тонкие фольги, что значительно облегчает последующий процесс изготовления радиофармпрепарата;
- ✓ данный метод имплантации радиоактивных ионов позволяет получить уникальные генераторы радиоизотопов благородных газов;
- ✓ дополнительно к большому количеству относительно долгоживущих нуклидов, использование масс-сепаратора в режиме он-лайн с ускорителем или реактором позволит получить до сих пор недоступные короткоживущие изотопы с периодами полураспада от нескольких десятков минут до нескольких часов;
- ✓ диагностические процедуры можно реализовать в режиме он-лайн в лабораториях, базирующихся на установках, производящих большой ассортимент короткоживущих радионуклидных источников высокой чистоты.

Поскольку эффективность получения радиоизотопов масс-сепараторным методом сильно зависит от эффективности ионизации атомов в ионном источнике, то при расчетах ожидаемой активности необходимо принимать во внимание значение данной характеристики. Ниже приведены значения эффективности ионизации некоторых элементов. Для Rb значение эффективности ионизации ϵ_i составляет около 80 %; для Sr, In, Ra: $\epsilon_i \approx 20$ –40%; для I: $\epsilon_i \approx 20$ –30 % [11].

Разработка мишеней для комплекса РИЦ-80

Получение ^{82}Sr из мишени на основе карбида иттрия (мишень для масс-сепараторной станции)

Масс-сепараторный метод позволяет значительно улучшить соотношение содержания генераторного радионуклида ^{82}Sr и примесного более долгоживущего ^{85}Sr , и тем избежать его неконтролируемого проникновения в кровеносную систему пациента. Карбид иттрия в виде таблеток был использован для первых экспериментов по получению ^{82}Sr . Данный радионуклид с периодом полураспада $T_{1/2} = 25,55$ сут является генератором изотопа ^{82}Rb ($T_{1/2} = 1,25$ мин), который широко используется в ПЭТ-диагностике.

Облученный на пучке синхроциклотрона ПИЯФ карбид иттрия был помещен в Ta-W контейнер, изготовленный как прототип мишенного устройства, по своим характеристикам идентичный мишенному устройству, которое будет использовано для получения ^{82}Sr на РИЦ-80. Мишенный контейнер диаметром 30 мм и длиной 200 мм помещался в вакуумный стенд и нагревался для извлечения полученных нуклидов из мишенного вещества (этот же принцип используется для извлечения из мишени продуктов ядерной реакции в системах ISOL) [5]. Предварительные расчеты по программе FLUKA [8] показали, что ожидаемая активность ^{82}Sr в мишени из карбида иттрия (до извлечения) при облучении протонами током 100 мкА в течение 240 часов составит около 2 Ки. Тогда ожидаемая активность ^{82}Sr на коллекторе масс-сепаратора (при эффективности ионизации

стронция около 50 %) составит около 1 Ки. Примесь изотопа ^{85}Sr в данном случае будет менее 1 %.

Таблетки из Y_2C_3 , облученные на пучке протонов 1 ГэВ синхротрона ПИЯФ, помещали в графитовый цилиндр, вставленный в танталовый контейнер. Центральная часть контейнера соединялась с вольфрамовой трубкой с отверстием 2 мм в диаметре. Радионуклиды, содержащиеся в мишенном материале, диффундировали в процессе нагревания до 2000–2100°C мишенного устройства из карбида иттрия к вольфрамовой трубке (также нагретой до 2000°C), проходили через нее и оседали на коллекторе из танталовой фольги, установленном на охлаждаемом медном фланце. Специально собранный вакуумный стенд для тестирования высокотемпературных мишенных устройств позволяет рассеивать мощность до 9 кВт, что соответствует мощности, вносимой в мишень пучком протонов ускорителя Ц-80.

Исследуемый прототип мишенного устройства позволяет получать и выделять радионуклиды из таких материалов (используемых в качестве мишенного вещества), как тугоплавкие металлы и их карбиды, жидкие металлы и композиты. Данный прототип можно использовать как в качестве мишенного устройства для масс-сепараторной станции, так и как мишень для метода высокотемпературного “сухого” выделения радионуклидов (без использования масс-сепаратора) [7, 12]. В этой работе представлены результаты исследований мишенных материалов, которые будут использоваться для масс-сепараторного метода получения радионуклидов.

Поскольку тестируемое мишенное вещество облучали пучком протонов с энергией 1 ГэВ, в нем образовалось большое количество различных радионуклидов помимо изотопов рубидия и стронция. Из-за этого высокотемпературное выделение стронция происходило в несколько этапов, с последовательным выделением различных образованных в мишени продуктов при разных температурах в высоком вакууме. Поскольку процесс выделения стронция из карбида иттрия характеризуется сравнительно медленными диффузионно-эффузионными процессами, на первом этапе мишень нагревали до 1500–1800°C, чтобы выделить продукты с более благоприятными диффузионно-эффузионными характеристиками (например, изотопы Rb и Mn). На следующем этапе

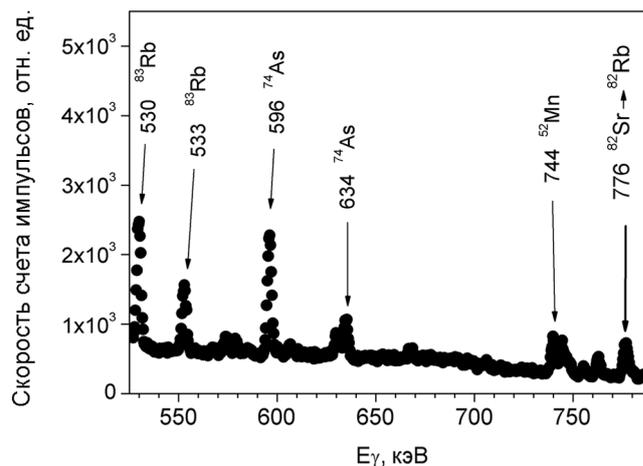


Рис. 3. Гамма-спектр облученного образца карбида иттрия до нагревания. Гамма-линия 776 кэВ соответствует распаду изотопа ^{82}Rb , используемого для ПЭТ-диагностики

при более высокой температуре из мишени селективно выделяли стронций. На рис. 3 представлен γ -спектр излучения облученного образца карбида иттрия до нагревания на вакуумном стенде.

На рис. 4 показан γ -спектр радиоактивного источника, выделенного на холодном коллекторе в результате нагрева мишени. Из сравнения рис. 3 и рис. 4 можно видеть, что на этапе нагрева мишени до 1500–1800°C из нее удалось устранить почти все радиоактивные продукты, кроме изотоп стронция. Окончательная эффективность выделения стронция при нагревании мишени до 1950–2000°C в течение 10 ч составила около 90 %.

Таким образом, мишень на основе карбида иттрия – это хороший кандидат для получения изотопа ^{82}Sr масс-сепараторным методом. Данный материал обладает подходящими характеристиками (температура плавления, температура кипения) для высокотемпературного мишенного устройства, соединенного с источником поверхностной ионизации.

Как отмечалось выше, для эффективного получения изотопов стронция с помощью масс-сепаратора необходимо обеспечить высокую эффективность ионизации атомов стронция. Для решения этой задачи был разработан высокотемпературный источник поверхностной ионизации на основе монокристаллического вольфрама, выращенного в форме трубки с внутренним диаметром 2 мм, внешним

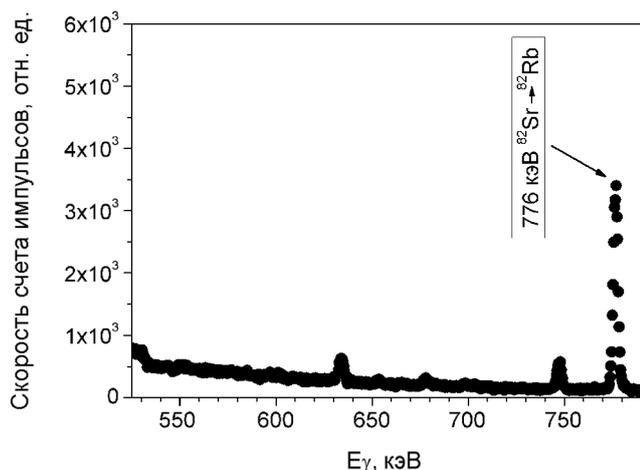


Рис. 4. Гамма-спектр радиоактивного источника, выделенного на охлаждаемом коллекторе в результате нагрева мишени до температуры 1950–2000°С. В данных тестах масс-сепаратор не использовался. Этим объясняется наличие в спектре гамма-линий, не относящихся к распадам рубидия и стронция

диаметром 5 мм и длиной 20 мм. Ориентация плоскостей кристалла обеспечивает величину работы выхода для внутренней поверхности трубки около 5 эВ (для поликристаллического вольфрама эта характеристика не превышает 4,5 эВ). Ионный источник, применявшийся для ионизации атомов стронция, показан на рис. 5.

Эксперименты по тестированию эффективности ионизации проводили с использованием масс-сепаратора по следующей процедуре. Облученный образец (небольшой кусок ниобиевой фольги) помещали в нагреватель, присоединенный к ионному источнику (вместо мишенного устройства). Ионный источник нагревался до температуры 2400°С – оптимальной температуры с точки зрения баланса между эффективностью поверхностной ионизации атомов стронция и надежностью работы ионного источника в течение продолжительного времени. Затем температура нагревателя с образцом повышалась в течение двух часов до 1700–2000°С. Радионуклиды высаживались на коллекторе, расположенном после фокусирующей линзы на входе магнита масс-сепаратора. Такое расположение коллектора (исключение из схемы эксперимента магнита масс-сепаратора) объясняется необходимостью накопления на коллекторе

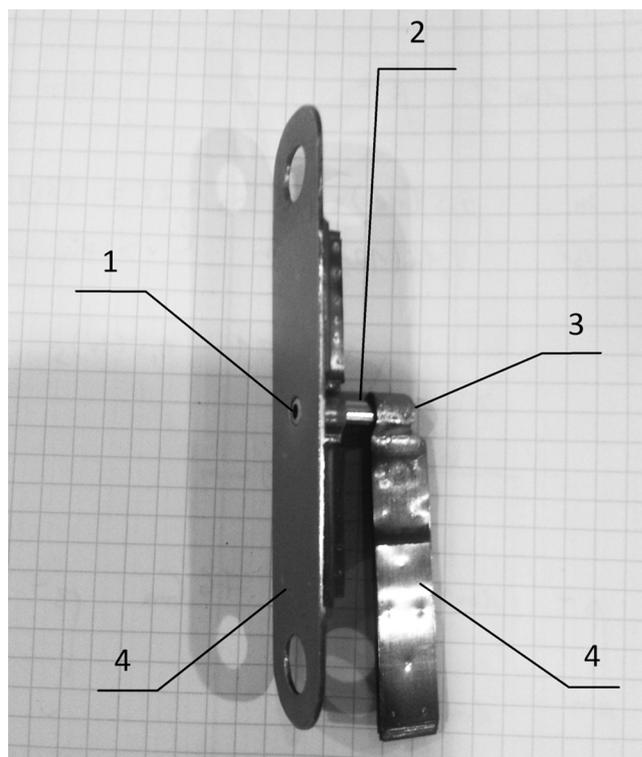


Рис. 5. Высокотемпературный источник поверхностной ионизации из монокристаллического вольфрама с работой выхода 5 эВ: 1 – выходное отверстие для ионов (направление к вытягивающему электроду); 2 – трубка из монокристаллического вольфрама; 3 – отверстие для соединения с мишенным контейнером; 4 – тоководы источника питания для резистивного нагрева вольфрамовой трубки

одновременно радиоактивных нуклидов разной массы, ^{83}Rb и ^{85}Sr , чтобы сравнить эффективности ионизации рубидия и стронция в одинаковых условиях. На рис. 6 приведены гамма-спектры, измеренные для определения эффективности ионизации рубидия и стронция. Активность других элементов, выделенных на коллекторе, пренебрежимо мала по сравнению с активностью стронция и рубидия, поскольку высокая эффективность поверхностной ионизации обеспечивается только для атомов этих двух элементов. Эффективность ионизации определялась как отношение $\varepsilon_i = S_1 / (S_2 - S_3)$, где S_1 – интегральный счет импульсов, измеренный на коллекторе, S_2 – интегральный счет, измеренный на облученном образце перед нагреванием, S_3 – интегральный счет, измеренный на облученном об-

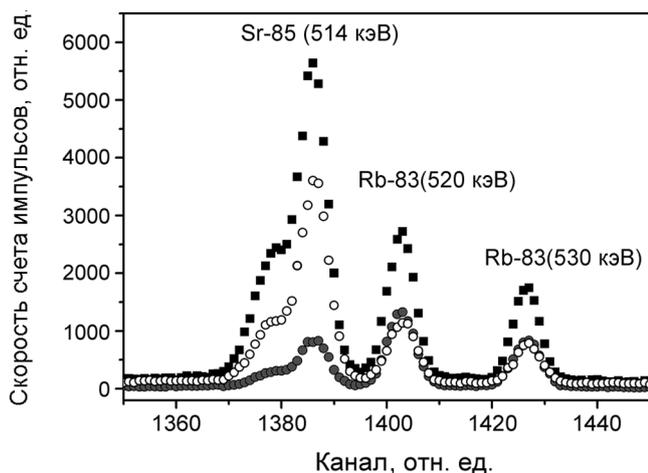


Рис. 6. Гамма-спектры облученного образца ниобиевой фольги: до нагревания – отмечены квадратами, после нагревания – полыми кружками. Кружками обозначены гамма-спектры радиоактивности, накопленной на коллекторе

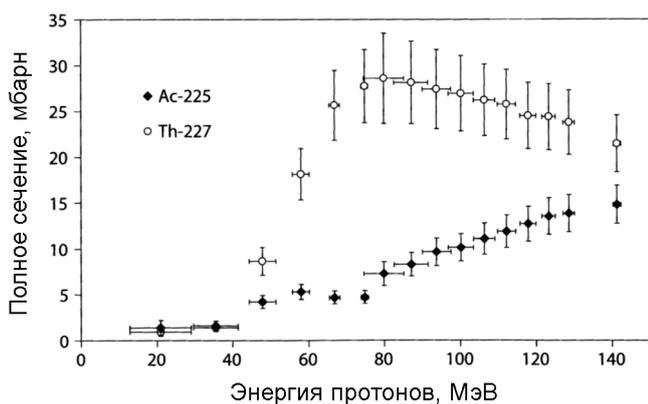
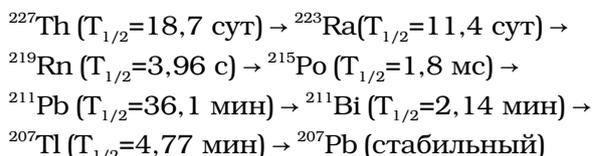


Рис. 7. Сечения образования в ториевой мишени изотопов ^{225}Ac и ^{227}Th в зависимости от энергии облучающих протонов, измеренные на протонном пучке ускорителя ИЯИ РАН [14]

разце после нагревания. Полученные значения эффективности ионизации составили 45(5) % для стронция и 84(6) % для рубидия. В дальнейшем в качестве ионного источника планируется использовать монокристаллическую вольфрамовую трубку длиной 40 мм с теми же внутренним и внешним диаметрами. Основываясь на наших предыдущих экспериментах [13], мы ожидаем увеличение эффективности для стронция до 80 % и ее же значение, близкое к 100 %, для рубидия.

Получение альфа-радиоактивных изотопов радия из мишени на основе карбида урана

Известно, что альфа-радиоактивные нуклиды являются хорошим инструментом для лечения различных новообразований на раннем этапе их формирования. Главным достоинством методов, основанных на использовании таких нуклидов, является небольшая глубина проникновения альфа-частиц в биологические ткани (60–80 мкм). Действие радиофармпрепаратов на основе альфа-радиоактивных нуклидов на пораженные ткани очень эффективно и при этом хорошо локализовано, то есть здоровые ткани остаются практически неповрежденными. Среди таких альфа-радиоактивных нуклидов для терапии можно выделить изотопы ^{223}Ra ($T_{1/2}=11,4$ сут), ^{224}Ra ($T_{1/2}=3,66$ сут) и ^{225}Ac ($T_{1/2}=10,0$ сут). Данные изотопы могут быть получены с помощью облучения протонами мишеней на основе урана или тория. На рис. 7 показана зависимость сечения образования изотопов ^{225}Ac и ^{227}Th от энергии облучающих протонов [14]. Максимальное сечение образования изотопа ^{227}Th в мишени на основе ^{232}Th (100 % содержания в естественной смеси изотопов) достигается при энергии протонов, близкой к 80 МэВ. Радионуклид ^{223}Ra образуется в результате следующей цепочки распадов ^{227}Th :



Как видно из приведенной цепочки, распад одного нуклида ^{223}Ra приводит к испусканию четырех альфа-частиц, что значительно повышает эффективность метода лечения.

В наших экспериментах использовалась мишень на основе ^{238}U (карбид урана UC высокой плотности [15]) для получения и высокотемпературного выделения изотопов радия, распадающихся с испусканием альфа-частиц. Мишень из карбида урана плотностью 11 г/см³ в течение 24 ч облучалась протонным пучком синхроциклотрона ПИЯФ с током 0,1 мкА. Масса мишенного вещества составляла около 1 г. После месячного радиационного охлаждения, мишенное вещество было помещено в графитовый цилиндр, вставленный в вольфрамовый мишенный контейнер. Контейнер был установ-

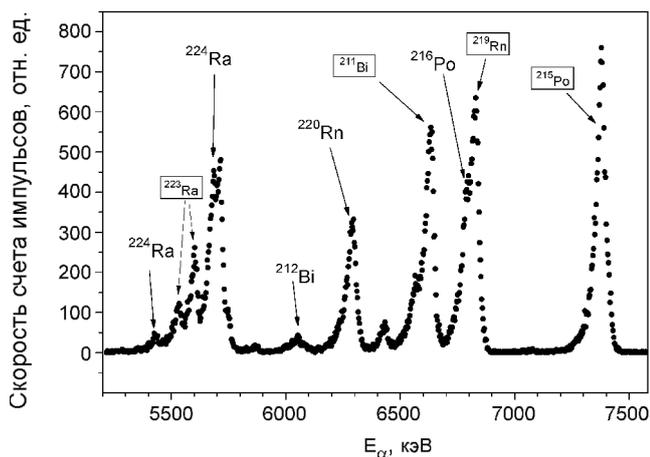
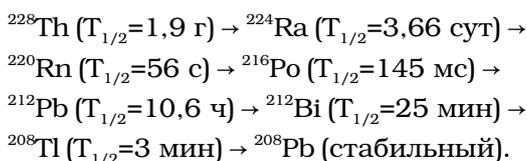


Рис. 8. Альфа-спектр радионуклидов, выделенных из UC мишени, нагретой до температуры 2400°C, на охлаждаемый танталовый коллектор. Изотопы, принадлежащие цепочке альфа-распадов ^{223}Ra , заключены в прямоугольники

лен в вакуумный стенд, в котором и производилось выделение радионуклидов при высокой температуре. Выделение изотопов радия имело место при температуре контейнера около 2400°C. На рис. 8 представлен альфа-спектр радионуклидов, выделенных из UC мишени при температуре 2400°C, на охлаждаемый танталовый коллектор.

На рис. 8 помимо цепочки альфа-распадов ^{223}Ra (на рисунке обозначения изотопов заключены в прямоугольники), также можно видеть альфа-линии изотопов, получающихся при распаде ^{228}Th ($T_{1/2}=1,9$ г):



Таким образом, эксперимент по получению изотопов радия продемонстрировал возможность применения мишеней на основе карбида урана высокой плотности. В перспективе имеется возможность увеличить выходы изотопов радия более чем на порядок, используя в качестве мишенного вещества карбид тория (согласно расчетам по программе FLUKA). Технология производства такого материала уже разработана. Мишенный материал на основе карбида тория также обладает необходимыми характеристиками для изготовления высоко-

температурного мишенного устройства, соединенного с источником поверхностной ионизации масс-сепаратора.

Заключение

Протонный циклотрон Ц-80 с энергией протонов 40–80 МэВ и током пучка до 200 мкА будет запущен в ПИЯФ в конце 2015 – начале 2016 гг. Одной из основных задач Ц-80 станет получение широкого спектра изотопов для медицинских целей.

К настоящему времени закончена разработка проекта комплекса РИЦ-80 (Радиоактивные Изотопы на Ц-80). Отличительная особенность установки состоит в использовании масс-сепаратора с мишенно-ионным устройством в качестве одной из мишенных станций для получения радиоизотопов высокой чистоты.

Значительная часть проведенной работы посвящена разработке мишенно-ионного устройства для проекта РИЦ-80. Исследованные мишенные вещества и разработанные ионные источники будут применяться на радиоизотопном комплексе ПИЯФ. В частности, такие материалы как карбид иттрия, карбид урана, а также карбид тория будут использованы для получения изотопически чистых медицинских радионуклидов. В ближайших планах – исследование полноразмерного прототипа мишенного устройства с количеством мишенного материала, достаточным для производства рабочих активностей на РИЦ-80 (масса мишенного вещества 40–60 г).

Список литературы

1. Chatal J.-F., Rouzet F., Haddad F. et al. Story of rubidium-82 and advantages for myocardial perfusion PET imaging // Front. Med. 2015. Vol. 2. № 3. P. 65.
2. Javar H., Quinn D.I. Targeted α -particle therapy of bone metastases in prostate cancer // Clin. Nucl. Med. 2013. Vol. 38. P. 966.
3. Reitkopf-Brodutch S., Confino H., Schmidt M. et al. Ablation of experimental colon cancer by intratumoral ^{224}Ra -loaded wires is mediated by alpha particles released from atoms which spread in the tumor and can be augmented by chemotherapy // Int. J. Radiat. Biol. Phys. 2015. Vol. 91, № 2. P. 179–186.
4. Artamonov S.A., Ivanov E.M., Mikheev G.F. et al. Design features of the 80 MeV H-isochro-

- nous cyclotron in Gatchina // In: "High Energy Physics Division: Main Scientific Activities" – Gatchina. 2013. P. 332–338.
5. Panteleev V.N., Alyakrinskiy O., Barbuie M. et al. Studies of uranium carbide targets of a high density // Nucl. Instr. Meth., 2008, B 266, P. 4247–4251.
 6. Panteleev V.N., Barzakh A.E., Batist L.Kh. et al. Project of the Radioisotope Facility RIC-80 at PNPI // In: "High Energy Physics Division: Main Scientific Activities" – Gatchina. 2013. P. 278–282.
 7. Panteleev V.N., Barzakh A.E., Batist L.Kh. et al. Status of The Project of Radioisotope Complex RIC-80 (Radioisotopes at Cyclotron C-80) at PNPI // Proc. of the Third Int. Conf. on Radiation and Applications in Various Fields of Research. – Budva, Montenegro. 2015. P. 51–56.
 8. Battistoni G., Muraro S., Sala P.R. et al. The FLUKA code: description and benchmarking // Proc. of the Hadronic Shower Simulation Workshop. – AIP Conf. Proc. 2007. Vol. 896, P. 31–49
 9. Fedosseev V.N., Kudryavtsev Yu., Mishin V.I. Resonance laser ionization of atoms for nuclear physics // Phys. Scr. 2012. Vol. 85, 058104. 14 pp.
 10. Dombisky M., Bricault P. High intensity targets for ISOL, historical and practical perspectives // Nucl. Instr. Meth. 2008. B 266. P. 4240–4246.
 11. Kirchner R. On the thermoionization in hot cavities // Nucl. Instr. Meth. 1990. A 292. P. 203–208.
 12. Panteleev V.N., Barzakh A.E., Fedorov D.V. et al. Development of Targets for The RIC-80 Project // In: "High Energy Physics Division: Main Scientific Activities" – Gatchina. 2013. P. 347–354.
 13. Panteleev V.N., Barzakh A.E., Fedorov D.V. et al. High temperature ion sources with ion confinement // Rev. Sci. Instrum. 2002. Vol. 73. № 2, P. 738–740.
 14. Ermolaev S., Zhuikov B., Lapshina E. et al. Production of Actinium-225 and Radium-223 from Natural Thorium Irradiated with Protons // In "Abstracts of the Seventh Int. Conf. on Isotopes" – Moscow, Russia. 2011. P. 32.
 15. Panteleev V.N., Alyakrinskiy O., Barbuie M. et al. Production of Cs and Fr isotopes from a high-density UC targets with different grain dimensions // Eur. Phys. J. 2009. A 42. P. 495–501.

RADIOISOTOPE COMPLEX RIC-80 AT PNPI

V.N. Panteleev, A.E. Barzakh, L.Kh. Batist, D.V. Fedorov, V.S. Ivanov, F.V. Moroz,
S.A. Krotov, P.L. Molkanov, S.Yu. Orlov, Yu.M. Volkov

B.P. Konstantinov Petersburg Institute of Nuclear Physics, Gatchina, Russia

The high current cyclotron C-80 capable of producing 40–80 MeV proton beams with a current of up to 200 μ A has been constructed at PNPI. One of the main goals of the C-80 is the production of a wide spectrum of radionuclides for diagnostics and therapy. The project development of the radioisotope complex RIC-80 (RadioIsotopes at the Cyclotron C-80) at the beam of C-80 has been completed. The combination of the mass-separator with the target-ion source device, available at one of the new target stations for on-line, or semi on-line production of a high purity separated radioisotopes is explored in greater detail. The results of target and ion source tests for a mass-separator method for the production of high purity radioisotopes ^{82}Sr and $^{223, 224}\text{Ra}$ are also presented.

Key words: *medical radionuclides, radioisotope complex, production targets, mass-separator*

E-mail: vnp@pnpi.spb.ru