

P18-2006-116

Ш. Гэрбиш, О. Д. Маслов, В. Н. Швецов, Н. Балжинням

**ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ ИРЕН
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ**

Гэрбиш Ш. и др.

P18-2006-116

Применение установки ИРЕН для получения радионуклидов

Описаны возможности получения на линейном ускорителе электронов ($E_{e^-} = 100$ МэВ) установки ИРЕН (ЛНФ, ОИЯИ) некоторых радионуклидов, в настоящее время наиболее широко применяющихся в практике ядерной медицины, радиобиологии, а также в мониторинге окружающей среды. Даны расчетные выходы для некоторых радионуклидов при применении линейного ускорителя электронов в соотношении с выходами, полученными на ускорителях электронов низких энергий $E_{e^-} < 30$ МэВ, таких как микроотрон МТ-25 (ЛЯР, ОИЯИ).

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Gerbish Sh. et al.

P18-2006-116

Application of the IREN Facility for Production of Radionuclides

The possibility of production of some radionuclides widely applied for the purpose of nuclear medicine, radiobiology and ecology monitoring at the linear electron accelerator ($E_{e^-} = 100$ MeV) of the facility IREN (FLNP, JINR) is considered in this paper. Based on the experimental data obtained at low energy ($E_{e^-} < 30$ MeV) electron accelerators as well as the microtron MT-25 (FLNP, JINR), an estimated yield for some radionuclides is given for the linear electron accelerator.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

Установка ИРЕН, в состав которой входит линейный ускоритель электронов с энергией 100 МэВ, является источником интенсивных пучков электронов, нейтронов и тормозного излучения. Установку планируется использовать в фундаментальных и прикладных исследованиях [1].

Для прикладных задач диапазон использования нейтронов ИРЕН и тормозного излучения электронного ускорителя по своим возможностям довольно широк. В него, в частности, входят: получение радионуклидов для медицинских и коммерческих целей, активационный анализ, радиационное применение и радиография.

1. ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ

На пороге XXI в. уже известно около 2500 радиоактивных изотопов, из которых более двух сотен находят применение в различных сферах науки, техники и медицины. Они имеют преимущественно искусственное происхождение, образуясь в ядерных реакциях элементарных частиц (гамма-излучения, заряженных частиц и нейтронов) с веществом мишени.

Радиоизотопные исследования биохимических явлений в организме человека — одно из прогрессирующих направлений в современной ядерной медицине [2].

Эффективность применения радиоизотопов основана на достижениях таких фундаментальных наук, как ядерная физика, химия, биология, на результатах развития ядерной техники (ускорители и источники излучения), на прогрессе в применении различных диагностических и управляющих систем (детекторы, сцинтилляционные камеры, томография, компьютерная автоматизация процессов).

В связи с развитием новых направлений в ядерной медицине (диагностика и терапия; новые радиофармацевтические препараты; исследования метаболизма) и радиоэкологии, а также инструментальных возможностей (автоматизированное управление процессами, съем информации), применение и разнообразие радионуклидов растет лавинообразно из года в год.

Потребность в тех или иных радионуклидах (перечень, необходимое количество) во многом зависит от направленности исследований. По данным МАГАТЭ, известно, что на нужды ядерной медицины в последние годы расходуется более 50 % годового производства радионуклидов во всем мире. Растет спрос на ультракороткоживущие и другие позитронные излучатели (в связи с исследованием состояния отдельных органов, особенно головного мозга, методом позитронно-эмиссионной томографии).

Первые опыты по получению радиоизотопов с помощью фотоядерных реакций с использованием тормозного излучения линейного ускорителя были осуществлены Мак-Грегором [4], но практическое применение нашлось спустя 13 лет [12–17].

Основные характеристики источников тормозного излучения ОИЯИ, которые могут быть использованы для получения радионуклидов, показаны в табл. 1. В последние годы микротрон МТ-25 ЛЯР ОИЯИ частично уже применяется для этих целей [5–11, 18–22].

Таблица 1. Основные характеристики источников тормозного излучения ОИЯИ

Технические параметры	Микротрон МТ-25 ЛЯР ОИЯИ	Линейный ускоритель, создаваемый в ЛНФ ОИЯИ
Энергия электронов (E_{e^-}), МэВ	25	100
Ток электронов (I_{e^-}), мА	0,02	0,1
Мощность (P), кВт	0,5	10
<i>Примечание.</i> $P_{\text{ЛНФ}}/P_{\text{МТ}} - 25 = 20$.		

Видно, что мощность создаваемого в ЛНФ линейного электронного ускорителя в 20 раз больше, чем микротрона МТ-25, и выход радионуклидов ^{99m}Tc , ^{225}Ac и ^{237}U , получаемых на линейном ускорителе, должен быть в 60 раз больше, с учетом энергии ускоренных электронов [3].

В последней колонке табл. 2 приведены полученные расчетным путем выходы радионуклидов ^{99}Mo , ^{225}Ac и ^{237}U при использовании тормозного излучения создаваемого в ЛНФ линейного ускорителя электронов.

Таблица 2. Ожидаемые выходы некоторых радионуклидов

Радио- нуклиды	Период полураспада, ч	Ядерные реакции	Доля ядер в мишени	Порог реакции, МэВ	Расчетный выход, кБк/мкА·ч· мг
$^{99}_{42}\text{Mo}$	66	$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)$	9,62 %	-8,29	240
$^{225}_{89}\text{Ac}$	240	$^{226}\text{Ra}(\gamma, n)$	0,65 мкг	-6,75	40
$^{237}_{92}\text{U}$	162	$^{238}\text{U}(\gamma, n)$	99,27 %	-6,15	80

Очистка ^{99m}Tc , ^{225}Ac от материала мишени и сопутствующих радиоактивных примесей, а в случае ^{237}U и от продуктов деления, производится с применением экстракции и ионного обмена.

В настоящее время мировое потребление радионуклида ^{99m}Tc превышает $2 \cdot 10^5$ Ки ($7,4 \cdot 10^{15}$ Бк) в год [26] и производство ^{99m}Tc остается крайне актуальной задачей. Радиофармацевтическая промышленность практически всех промышленно развитых стран использует ^{99}Mo для изготовления генераторов ^{99m}Tc , который применяется почти в 80 % всех диагностических процедур ядерной медицины.

Из табл. 2 видно, что ожидаемый выход фотоядерной реакции для образования материнского радионуклида $^{99}_{42}\text{Mo}$ $2,4 \cdot 10^5$ кБк/мкА·ч·г, и он может также увеличиваться за счет (n, γ) при облучении металлической мишени Мо на установке ИРЕН. Возможности получения радионуклида ^{99}Mo показаны в табл. 3, а распады — на рис. 1.

Таблица 3. Возможности образования ^{99}Mo на установке ИРЕН

Ядерные реакции	Период полураспада	Доля изотопов, %	Порог реакции, МэВ	σ , мб
$^{100}_{42}\text{Mo}(\gamma, n) ^{99}_{42}\text{Mo}$	66,02 ч	9,6	-8,29	128
$^{100}_{42}\text{Mo}(\gamma, p) ^{99}_{41}\text{Nb}$	15 с	9,6	-11,3	67
$^{99m}_{41}\text{Nb}$	2,6 мин	9,6	-11,5	16
$^{98}_{42}\text{Mo}(n, \gamma) ^{99}_{42}\text{Mo}$	66,02 ч	24,1		130

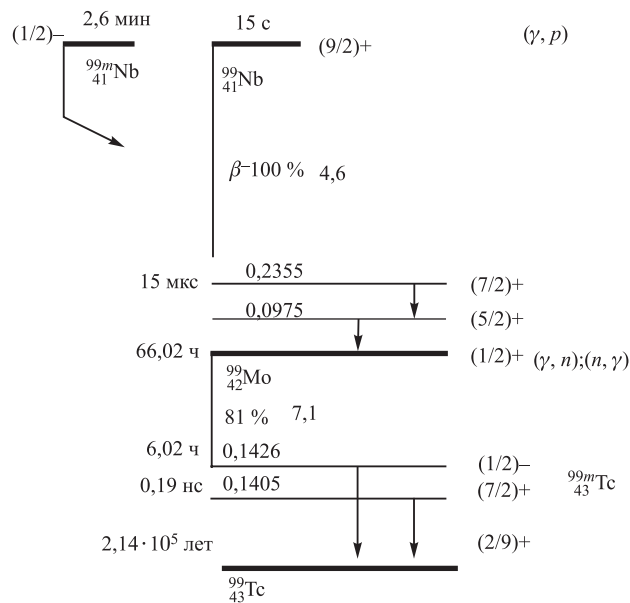


Рис. 1. Упрощенная схема распада $^{99m}_{43}\text{Tc}$

При использовании в качестве мишени ^{100}Mo получаемый продукт практически не содержит мешающих примесей и общая активность мишени определяется только активностью ^{99}Mo и ^{99m}Tc , что значительно снижает дозовые нагрузки при работе с мишенью и ^{99m}Tc .

Облучение 10 г ^{100}Mo (обогащение 100%) в течение 100 ч при токе 25 мкА и энергии электронов 25 МэВ приведет к накоплению активности ^{99}Mo , равной $8 \cdot 10^{10}$ Бк (80 ГБк) [7, 8].

Возможность получения в фотоядерных реакциях (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, (γ, p) , (γ, pn) и (γ, α) некоторых радионуклидов с использованием линейного ускорителя электронов ИРЕН показана в табл. 4. Там же даны экспериментальные выходы радионуклидов, полученных на микротроне ЛЯР ОИЯИ [23–25].

Таблица 4. Экспериментальные выходы некоторых радионуклидов в результате фотоядерных реакций на микротроне

Радионуклид	Период полураспада, ч	Ядерные реакции и тип распада	Доля ядер в мишени, %	Порог реакции, МэВ	Выход, кБк/мкА·ч·г	
					Экспериментальный, литература	Расчетный (ЛИУ, ИРЕН) 100 МэВ
^{18m}F	1,83	$^{19}\text{F}(\gamma, n)$	Ест. 100	-10,43	3200 [18]*	1,92E+5
^{43}K	22,4	$^{44}\text{Ca}(\gamma, p)$	94,9	-12,16	159±18 [19]**	9,54E+3
^{43}K	22,4	$^{44}\text{Ca}(\gamma, p)$	Ест. 2,09	-12,16	0,12 [18]	7,2
^{47}Sc	80,4	$^{48}\text{Ti}(\gamma, p)$	Ест. 73,7	-11,44	33,3 [18]	2,0E+3
^{56}Mn	2,6	$^{57}\text{Fe}(\gamma, p)$	Ест. 2,17	-10,56	11±4 [19]	6,7E+2
^{56}Mn	2,6	$^{57}\text{Fe}(\gamma, p)$	Ест. 2,17	-10,56	1,3 [18]	78
^{57}Co	6504	$^{58}\text{Ni}(\gamma, p)$ ЕС, e^+	Ест. 68,1	-8,18	0,35 [18]	21
^{61}Co	1,6	$^{62}\text{Ni}(\gamma, p)$	Ест. 3,63	-11,11	129±25 [19]	7,74E+3
^{61}Co	1,6	$^{62}\text{Ni}(\gamma, p)$	Ест. 3,63	-11,11	3,3 [18]	1,98E+2
		$^{65}\text{Cu}(\gamma, \alpha)$	Ест. 30,83	-6,76	33,3 [18]	2,0E+3
^{57}Ni	36,0	$^{58}\text{Ni}(\gamma, n)$	Ест. 68,1	-12,20	25 [18]	1,5E+3
^{67}Cu	61,9	$^{68}\text{Zn}(\gamma, p)$	Ест. 18,75	-9,97	12,9±1,8 [19]	7,7E+2
^{67}Cu	61,9	$^{68}\text{Zn}(\gamma, p)$	Ест. 18,75	-9,97	1,5 [18]	90
^{72}Ga	14,1	$^{73}\text{Ge}(\gamma, p)$	Ест. 7,76	-10,0	0,6 [18]	36
^{73}Ga	4,9	$^{74}\text{Ge}(\gamma, p)$	Ест. 36,73	-10,97	18,5±3,7 [19]	1,1E+3
^{73}Ga	4,9	$^{74}\text{Ge}(\gamma, p)$	Ест. 36,73	-10,97	4,9 [18]	2,9E+2
^{76}As	26,3	$^{77}\text{Se}(\gamma, p)$	Ест. 7,63	-9,61	0,25	15
^{87m}Sr	2,8	$^{88}\text{Sr}(\gamma, n)$	Ест. 82,58	-11,48	2800	1,7E+5
		$^{87}\text{Sr}(\gamma, \gamma')$	Ест. 7,0	-0,39		
^{89}Zr	78,4	$^{90}\text{Zr}(\gamma, n)$	Ест. 51,45	-11,99	100	6,0E+3
^{91m}Nb	1488	$^{92}\text{Mo}(\gamma, p)$ ЕС, e^+	Ест. 14,84	-7,49	0,6	36
^{92m}Nb	243,6	$^{94}\text{Mo}(\gamma, pn)$	Ест. 9,25	-17,45	1,3	78
^{95m}Nb	87,0	$^{96}\text{Mo}(\gamma, p)$	Ест. 16,68	-9,53	0,16	9,6
^{95}Tc	20,0	$^{96}\text{Ru}(\gamma, p)$ ЕС, e^+	Ест. 5,54	-7,31	26	1,5E+3

^{95m}Tc	1464	$^{96}\text{Ru}(\gamma, p)$ EC, e^+	Еср. 5,54	-7,35	2,59	1,55E+2
^{99m}Tc	6,02	$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)$ $^{96}\text{Mo}, e^-$	Еср. 9,63	-8,29	2960	1,8E+5
^{95}Tc	20,0	$^{96}\text{Ru}(\gamma, p)$ EC, e^+	Еср. 5,54	-7,31	$1,4 \cdot 10^7$ [7]	8,4E+8
^{95m}Tc	1464	$^{96}\text{Ru}(\gamma, p)$ EC, e^+	Еср. 5,54	-7,35	3800 [7]	2,3E+5
^{99m}Tc	6,02	$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)$ e^-	Еср. 9,63	-8,29	2200 [7,8]	1,3E+5
^{101m}Rh	105,6	$^{102}\text{Pd}(\gamma, p)$	80	-7,97	444 ± 111 [19]	2,7E+4
^{101m}Rh	104,16	$^{102}\text{Pd}(\gamma, n)$, EC, e^+	Еср. 1,0	-10,59	74 [18]	4,4E+3
^{105}Ag	990,96	$^{106}\text{Cd}(\gamma, n)$, EC, e^+	Еср. 1,25	-11,20	0,12 [18]	7,2
^{111}In	67,4	$^{112}\text{Sn}(\gamma, p)$	80	-7,73	1202 ± 203 ***	7,2E+4
^{111}In	67,4	$^{112}\text{Sn}(\gamma, p)$	80,6	-7,73	$74 \pm 7,4$ [13]	4,4E+3
^{111}In	67,4	$^{112}\text{Sn}(\gamma, n)$, EC, e^+	Еср. 0,97	-11,11	4,35 [18]	2,6E+2
^{123}I	13,3	$^{124}\text{Xe}(\gamma, p)$ $^{124}\text{Xe}(\gamma, n)$ EC, e^+	3,4	-6,79 -10,57	384 ± 148 [19]	3,2E+4
^{123}I	13,3	$^{124}\text{Xe}(\gamma, n)$ EC, e^+	Еср. 0,096	-10,57	20,6 [18]	1,2E+3
^{123}I		$^{124}\text{Xe}(\gamma, n)$ EC, e^+	98	-10,57	7400 [5]	4,4E+5
^{129}Cs	32,3	$^{130}\text{Ba}(\gamma, p)$	32,9	-6,62	1195 ± 129 [19]	7,2E+4
^{129}Cs	32,3	$^{130}\text{Ba}(\gamma, n)$, EC, e^+	Еср. 0,101	-10,40	1,3 [18]	78
^{132}Cs	155,28	$^{133}\text{Cs}(\gamma, n)$	Еср. 100	-9,06	180 [18]	1,1E+4
^{143}Pm	6360	$^{144}\text{Sm}(\gamma, n)$ EC, e^+	87	-10,45	20000 [22]	1,2E+6
^{155}Tb	127,68	$^{156}\text{Dy}(\gamma, p)$ $^{156}\text{Dy}(\gamma, n)$ EC, e^+	Еср. 0,06	-7,19 -9,97	111 ± 22 [19]	6,7E+3
^{167}Tm	222	$^{168}\text{Yb}(\gamma, p)$ $^{168}\text{Yb}(\gamma, n)$ EC, e^+	Еср. 0,13	-6,46 -9,20	88 ± 25 [19]	5,3E+3
^{195}Au	4392	$^{196}\text{Hg}(\gamma, n)$ EC, e^+	Еср. 0,15	-6,58	0,025 [18]	1,5
^{198}Au	64,72	$^{199}\text{Hg}(\gamma, p)$	Еср. 16,87	-7,25	0,01 [18]	0,6
^{199}Au	75,6	$^{200}\text{Hg}(\gamma, p)$	Еср. 23,10	-7,70	0,007 [18]	0,42
^{202}Tl	293,52	$^{203}\text{Tl}(\gamma, n)$	Еср. 29,52	-7,83	57 [18]	3,4E+3

^{203}Pb	52,0	$^{204}\text{Pb}(\gamma, n)$	Ест. 1,4	-8,24	86 [18]	5,1E+3
^{225}Ac	240	$^{226}\text{Ra}(\gamma, n)$ $^{225}\text{Ra}, e^-$		500	500 [10]	3,0E+4
^{237}U	162	$^{238}\text{U}(\gamma, n)$	Ест. 99,27	-6,15	1000 [11,9]	6,0E+4
^{237}Pu	1104	$^{238}\text{Pu}(\gamma, n)$			310 **** [6]	1,8E+4
^{236}Pu	2,858 лет	$^{237}\text{Np}(\gamma, n)$ $^{236}\text{Np}, e^-$			5 [6]	3,0E+2
<i>Примечание.</i> *[18] МТ-23, $E_\gamma = 19$ МэВ; **[19] МТ-25; ***[17, 20]; **** Оценка по ^{237}U .						

О МЕТОДИКЕ ПОЛУЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ РАДИОНУКЛИДОВ И ВЫВОДЫ

1. ^{123}I применяется в медицинской диагностике щитовидной железы, почек и других органов, заменяя ^{131}I . Использование ^{123}I вместо ^{131}I понижает интегральную дозу воздействия радиации на пациента в 100 раз, что позволяет применять его при иодной диагностике детей и при необходимости вводить в организм больного до 1 мКи ^{123}I . Привлекательным представляется способ производства ^{123}I в реакции $^{124}\text{Xe}(\gamma, n) \ ^{124}\text{Xe}(T_{1/2} = 2,08 \text{ ч}) \rightarrow ^{123}\text{I}$ [5]. Так как естественный ксенон имеет девять стабильных изотопов, то для получения радиоизотопно чистого ^{123}I необходимо использовать обогащенный ксенон. Было показано, что при облучении гамма-квантами с $E_\gamma = 21,5$ МэВ природного образца ксенона достигается выход ^{123}I , равный 0,1 мКи/мкА·ч·г [5]. При 250 облучениях 10 г мишени Хе по 10 ч в сеансе в течение года активность произведенного ^{123}I будет равняться 50 Ки. Производство ожидаемой активности ^{123}I на линейном ускорителе установки ИРЕН в год ~ 300 Ки.

2. В связи с загрязнением окружающей среды антропогенными тяжелыми металлами, токсичными и радиоактивными элементами некоторые радионуклиды представляют особый интерес с точки зрения экологии.

Развитие чувствительных методов анализа плутония в биологических объектах (продукты питания и жизнедеятельности человека) и природных образцах (почва, вода и т. д.) является актуальным направлением современной радиоэкологии. Особый интерес для идентификации источников загрязнения исследуемых объектов (ядерные взрывы, аварии на АЭС и др.) представляет определение изотопных отношений ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{238}Pu .

Для этих целей используются в качестве радиотрассеров препараты ^{236}Pu . Получение ^{236}Pu возможно по фотоядерным реакциям тормозного излучения, ускоренных электронов, на мишени ^{237}Np в результате последующих превращений (рис. 2):



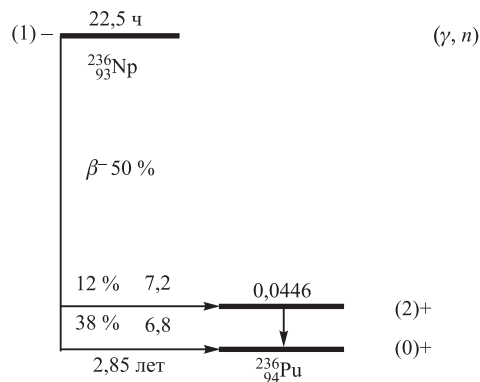


Рис. 2. Схема распада $^{236}_{93}\text{Np}$

Получен ^{236}Pu в реакции $^{237}\text{Np}(\gamma, n)$ с выходом около 5 Бк/мкА·ч на 1 мг исходного ^{237}Np . Сечение образования ^{236}Pu составляет ≈ 90 мб, т. е. ≈ 180 мб для реакции $^{237}\text{Np}(\gamma, n) ^{236}\text{Np}$, которая является наиболее оптимальной для получения препаратов ^{236}Pu с изотопной чистотой 10^{-6} – 10^{-7} .

^{237}Np облучали фотонами на компактном ускорителе электронов — микротроне МТ-25 ЛЯР ОИЯИ. Мишень ^{237}Np массой 1 мг облучали фотонами микротрона МТ-25 в течение 10 ч, а массой 10 мг — 100 ч при токе электронов 15 мкА и максимальной энергии 25 МэВ [6]. После окончания облучения мишени «охлаждали» в течение 15–30 дней до полного распада ^{236}Np и короткоживущих γ - и β -излучателей и затем растворяли в концентрированной азотной кислоте. Разделение продуктов реакции производили методом анионообменной хроматографии на анионите Wofatit SBW. Изотопная чистота полученного препарата дана в табл. 5. Выход ^{236}Pu составил 5 Бк/мкА·ч на 1 мг ^{237}Np .

Таблица 5. Активность, изотопная чистота и сечение образования ^{236}Pu в реакции $^{237}\text{Np}(\gamma, n)$

Мишень	Условия облучения	^{236}Pu , кБк	^{238}Pu , Бк/Бк	^{239}Pu , Бк/Бк	^{240}Pu , Бк/Бк	^{237}Np , Бк/Бк	$\sigma (^{236}\text{Pu})$, мб
^{237}Np 1 мг ^{238}Pu 0,7 Бк ^{239}Pu 0,06 Бк	25 МэВ, 160 мкА·ч	0,57 ($\approx 0,70$)*	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	$< 10^{-6}$	80
^{237}Np 10 мг ^{238}Pu 7 Бк ^{239}Pu 0,6 Бк	25 МэВ, 2000 мкА·ч	78,0 (≈ 100)*	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	$< 10^{-6}$	96

* Приведены значения активности с учетом эффективности выделения из мишени.

В табл. 6 приведены фотоядерные данные некоторых радионуклидов, представляющих экологический интерес.

Таблица 6. Фотоядерные данные некоторых радионуклидов

Радионуклид, период полураспада и тип распада	Ядерные реакции	Доля ядер в мишени, %	Порог реакции, МэВ	Энергия излучения, кэВ, и интенсивность, %	Применение
$^{26}_{13}\text{Al}$, $7,2 \cdot 10^9$ г, e^+ (82, 1); $\text{ЭЗ}(17,9)$	$^{27}\text{Al}(\gamma, n)$	100	-13,29	1808,6 (99,7) $E_{e^+} = 1160$	<i>in-vivo</i> исследования метаболизма следов Al
$^{97}_{43}\text{Tc}$, $4,0 \cdot 10^6$ г, $\text{ЭЗ}(100)$	$^{98}\text{Ru}(\gamma, p)$ $^{99}\text{Ru}(\gamma, pn)$	1,86 12,7	-8,27 -17,73	X-лучи	Как индикатор при изучении поведения ^{99}Tc
$^{237}_{94}\text{Pu}$, 45,3 сут, $\alpha(0,033)$; $\text{ЭЗ}(99)$	$^{237}_{93}\text{Np}$			97,1 (12,5) 101,1 (20,1) 113,9 (7,6) $E_{\alpha} = 5370$ $E_{\alpha} = 5660$	<i>in-vivo</i> исследования метаболизма Pu
$^{236}_{94}\text{Pu}$, 2,85 г, $\alpha(100)$;	$^{236}_{93}\text{Np}$			47,6 (0,07) 109,0 (0,01) $E_{\alpha} = 5770(72,4)$ $E_{\alpha} = 5720(27,6)$	В качестве радиотрассеров
$^{235}_{93}\text{Np}$, 396,1 сут, $\alpha(0,0026)$; $\text{ЭЗ}(99,99)$	$^{237}\text{Np}(\gamma, 2n)$		-18,04	X-лучи $E_{\alpha} = 4920$; $E_{\alpha} = 5000$; $E_{\alpha} = 5020$	В качестве радио- трассеров
$^{2367}_{93}\text{Np}$, $1,5 \cdot 10^5$ г, $\alpha(0,1)$; $e^- (8,9)$; $\text{ЭЗ}(91)$	$^{237}\text{Np}(\gamma, n)$		-8,03	160,03 (27,5)	Получение ^{236}Pu
$^{2365}_{93}\text{Np}$, 22,5 ч, $e^- (48)$; $\text{ЭЗ}(52)$	$^{237}\text{Np}(\gamma, n)$		-8,03		Получение ^{236}Pu
$^{225}_{91}\text{Ac}$, 10 сут, $\alpha(100)$;	$^{226}\text{Ra}(\gamma, n)$			$E_{\alpha} = 5732(10,2)$; 5792 (8,7); 5794 (18,2); 5830 (50,9).	Радиотерапия раковых заболеваний
$^{237}_{92}\text{U}$, 6,75 сут, $e^- (100)$	$^{238}\text{U}(\gamma, n)$	99,27	-6,15	97,07 (17,5) 101,07 (27,3) 207,95 (23,4)	В качестве радио- трассеров

3. ^{225}Ac был получен в реакции $^{226}\text{Ra}(\gamma, n)^{225}\text{Ra} \rightarrow ^{225}\text{Ac}$ на ускорителе электронов — микротроне МТ-25 ЛЯР. При этом выход ^{225}Ra составил 1,2 кБк/мкА·ч на 1 мг исходного ^{226}Ra . ^{225}Ac выделялся из облученной мишени с использованием катионообменной хроматографии. Соотношение активностей $^{225}\text{Ac}/^{226}\text{Ra}$ было равно $1:1 \cdot 10^{-6}$ [10]. Следует заметить, что облучение ^{226}Ra тормозными излучениями не приводит к образованию других изотопов актиния, т.е. изотопная чистота препаратов ^{225}Ac будет зависеть прежде всего от радиохимической чистоты исходного ^{226}Ra . Нароботка ^{227}Ac в реакции $^{226}\text{Ra}(n, \gamma)^{227}\text{Ra} \rightarrow ^{227}\text{Ac}$ будет определяться потоком фоновых нейтронов, образующихся в основном при взаимодействии электронов с материалом тормозной мишени и фотонов с конструкционными материалами мишенного блока. По этой же методике может быть получен выход ~ 70 кБк/мкА·ч·мг ^{237}U на линейном ускорителе установки ИРЕН.

4. Благодаря своим ядерно-физическим характеристикам ^{237}U ($T_{1/2} = 6,75$ сут, e^- , $E_\gamma = 0,06$ МэВ (36%), 0,208 МэВ (23%)) [9] представляет значительный интерес для использования в качестве трассера при исследовании поведения урана в различных химических и биологических системах, изучения его состояния в ультранизких концентрациях методом горизонтального зонного электрофореза в свободном электролите. ^{237}U используется в мессбауэровской спектроскопии в качестве источника резонансного γ -излучения. Однако из-за отсутствия подходящих ядерных реакций для его производства этот изотоп не нашел широкого практического применения. ^{237}U был получен в реакции $^{238}\text{U}(\gamma, n)$ на ускорителе электронов — микротроне МТ-25 ЛЯР с радиационным выходом 1 кБк/мкА·ч·мг ^{238}U . Для отделения ^{237}U от материала мишени использован метод сбора ядер отдачи. Для очистки ^{237}U от продуктов деления были применены экстракция и ионный обмен. Получен препарат ^{237}U с удельной активностью 49,5 МБк/мг ^{238}U и химическим выходом 70%. Содержание радиоактивных примесей в препарате не превысило 10^{-5} Бк/Бк. По этой же методике может быть получен выход ~ 60 кБк/мкА·ч·мг ^{237}U на линейном ускорителе установки ИРЕН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Aksenov V. L. et al.* Proposal for the construction of the New intense resonance neutron source (IREN). JINR Commun. E3-92-110. Dubna, 1992.
2. *Дмитриев С. Н., Зайцева Н. Г., Очкин А. В.* Радионуклиды для ядерной медицины и экологии. Дубна, 2004. 105 с.
3. *Tsipenyuk Y. M.* The Microtron. Development and Applications / Ed. by S. P. Kapitza. The Physics and Technology of Particles and Photon Beams. London–New York: Taylor & Francis, 2002.

4. *McGregor M.N.* Linear accelerators as radioisotope producers // *Nucleonics*. 1957. V. 15, No. 1. P. 176.
5. *Флеров Г.Н. и др.* Получение короткоживущего изотопа ^{123}I на микротроне МТ-22 // АЭ. 1986. Т. 61, вып. 4. С. 289–291.
6. *Дмитриев С.Н., Маслов О.Д., Сабельников А.В.* Получение ^{236}Pu в реакции $^{237}\text{Np}(\gamma, n)$ // *Радиохимия*. 1998. Т. 40, вып. 6. С. 533–537.
7. *Maslov O. D., Dmitriev S. N., Sabelnikov A. V.* Possibility of production of technetium short-lived radioactive isotopes // *The Third Russian-Japanase Seminar on Technetium. Extended Synopses, Dubna, June 23 – July 1, 2002. Dubna, 2002.* P. 26.
8. *Сабельников А.В. и др.* Получение ^{99}Mo и ^{99m}Tc в фотоядерной реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)$ на ускорителе электронов — микротроне МТ-25. Препринт ОИЯИ Р12-2004-210. Дубна, 2004.
9. *Сабельников А.В. и др.* Получение ^{237}U в фотоядерной реакции $^{238}\text{U}(\gamma, n)$ на ускорителе электронов — микротроне МТ-25. Препринт ОИЯИ Р12-2004-193. Дубна, 2004.
10. *Маслов О.Д., Сабельников А.В., Дмитриев С.Н.* Получение ^{225}Ac в фотоядерной реакции $^{226}\text{Ra}(\gamma, n)$ на ускорителе электронов — микротроне МТ-25. Препринт ОИЯИ Р12-2004-209. Дубна, 2004.
11. *Густова М.В. и др.* Способ получения радионуклида урана-237. Патент № 2262759 от 18.11.2003 г. (заявка 2003133380/06) Бюл. № 29, 20.10.2005.
12. *Малинин А.Б. и др.* // *Радиохимия*. 1970. Т. 12. С. 780.
13. *Marceau M. et al.* // *J. Appl. Radiation Isotopes*. 1970. V. 21. P. 667.
14. *Kato T. et al.* // *Talanta*. 1972. V. 19. P. 215.
15. *Yaqi M. et al.* // *Chem. Lett.* 1972. V. 3. P. 215.
16. *Gray F. C. et al.* // *J. Nucl. Med.* 1973. V. 14. P. 931.
17. *Levin V.I., Malinin A. B., Tronova I.N.* // *Radiochem. Radioanal. Lett.* 1981. V. 49. P. 111.
18. *Řanda Z., Ducháček V., Hradil M.* Možnost výroby radionuklidu fotojadernými reakcemi na mikrotronu. // *Jaderna energie*. 1988. V. 34. P. 10.
19. *Malinin A. B. et al.* // *Radiochem. Radioanal. Lett.* 1983. V. 59. P. 213.
20. *Левин В.И. и др.* // *Радиохимия*. 1977. Т. 19. С. 388.
21. *Marceau M. et al.* // *J. Appl. Radiation Isotopes*. 1970. V. 21. P. 667.

22. *Belov A. G., Tonchev A. P.* Production of ^{143}Pm isotope with microtron bremsstrahlung gamma-rays // Symp. on radiation measurements and applications, Michigan, May 16–19. 1994.
23. *Randa Z., Kreisinger F.* Tables of nuclear constants for gamma activation analysis. Institute of Mineral Raw Materials. Kutna Hora, 1980. P. 136.
24. Схемы распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения: Публикация 38 МКРЗ: В 1 ч., 3 кн./ Под ред. А.А. Моисеева. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1987. С. 283, 305.
25. Nuclear Chart 2002. Strasbourg, France Mariasusil Antony, ELA, 53 cours Leopold, BP 267, 54005 Nancy Cedex, France
26. Science News. October 23, 1999. V. 156. P. 264–266.

Получено 14 августа 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 30.10.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 0,83. Тираж 270 экз. Заказ № 55526.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/