

Научная статья
УДК 54.056 + 54.058
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.011

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ^{177}Lu И СОПУТСТВУЮЩИХ РАДИОНУКЛИДНЫХ ПРИМЕСЕЙ

**Андрей Николаевич Гурин¹, Елена Тихоновна Чакрова², Зоя Владимировна Медведева³,
Светлана Геннадьевна Солонинкина⁴, Василий Аркадиевич Захаров⁵,
Елена Константиновна Кулакова⁶, Илона Валерьевна Матвеева⁷**

^{1–6}Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

⁷Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Автор, ответственный за переписку: Андрей Николаевич Гурин, gurin.andrey@inp.kz

Аннотация

Радиоактивные изотопы редкоземельных элементов (РЗЭ) находят все возрастающее применение в ядерной медицине для диагностических и терапевтических целей, так как обладают эффективными ядерно-физическими свойствами. Семнадцать элементов побочной подгруппы III группы Периодической таблицы химических элементов Д. И. Менделеева с атомными номерами 21, 39, 57, 58–71 (скандий, иттрий, лантан и 14 лантаноидов) составляют редкоземельные элементы. С каждым годом все больше внимания уделяется радиоактивному изотопу лютеция ^{177}Lu , наиболее перспективному для использования в терапевтических средствах нового поколения, в том числе для клеточной терапии онкологических заболеваний. Преимущества ^{177}Lu определяются его ядерными характеристиками: оптимальная глубина проникновения в человеческие ткани при радиотерапии малых опухолей и малая лучевая нагрузка на здоровые органы обеспечиваются максимальной энергией β -излучения 496 кэВ, наличие низкоэнергетического γ -излучения 113 кэВ позволяет проводить контроль за процессом лечения, период полураспада 6,71 дня делает возможной транспортировку препаратов с ^{177}Lu на значительные расстояния.

Для определения удельной активности ^{177}Lu и сопутствующих радионуклидных примесей при облучении на реакторе ВВР-К была проведена оценка прямого способа изотопа ^{177}Lu , также проанализированы ядерно-физические характеристики по литературным данным. Данная исследовательская работа позволяет оценить возможность получения ^{177}Lu по реакции (n, γ) на реакторе ВВР-К из природной и обогащенной мишени лютеция.

Ключевые слова:

редкоземельные изотопы, исследовательский реактор ВВР-К, нейтронное излучение, лютеций-177

Благодарности:

исследование было профинансировано Комитетом по науке Министерства образования и науки Республики Казахстан (программа № BR10965174).

Для цитирования:

Определение удельной активности ^{177}Lu и сопутствующих радионуклидных примесей / А. Н. Гурин [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 2. С. 67–73.
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.011

Original article

DETERMINATION OF THE SPECIFIC ACTIVITY OF ^{177}Lu AND ASSOCIATED RADIONUCLIDE IMPURITIES

**Andrey N. Gurin¹, Elena T. Chakrova², Zoya V. Medvedeva³, Svetlana G. Soloninkina⁴,
Vasily A. Zakharov⁵, Elena K. Kulakova⁶, Ilona V. Matveyeva⁷**

^{1–6}Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

⁷After Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Corresponding author: Andrey N. Gurin, gurin.andrey@inp.kz

Abstract

Radioactive isotopes of rare earth elements (REE) are increasingly used in nuclear medicine for diagnostic and therapeutic purposes as they have effective nuclear physical properties. Seventeen elements of the secondary subgroup of group III of the periodic table of chemical elements of D.I. Mendeleev with atomic numbers 21, 39, 57, 58–71: scandium, yttrium, lanthanum and 14 lanthanides make up rare earth elements. Every year more and more attention is paid to the radioactive isotope of lutetium ^{177}Lu , the most promising for use in therapeutic agents of a new generation, including for cell therapy of oncological diseases. The advantages of ^{177}Lu are determined by its nuclear characteristics: the optimal depth of penetration into human tissues during radiotherapy of small tumors and low radiation load on healthy organs are provided due to the maximum energy of beta radiation of 496 keV, the presence of low-energy gamma radiation of 113 keV allows monitoring the treatment process, the half-life of 6.71 days makes it possible to transport drugs from ^{177}Lu to significant distances.

To determine the specific activity of ^{177}Lu and associated radionuclide impurities during irradiation at the reactor of the WWR-K, an assessment of the direct method of the ^{177}Lu isotope and an analysis of the nuclear physical characteristics according to the literature data were carried out. This research work allows us to evaluate the possibility of obtaining ^{177}Lu by reaction (n, γ) at the WWR-K reactor from a natural and enriched lutetium target.

Keywords:

rare-earth isotopes, WWR-K research reactor, neutron irradiation, lutetium-177

Acknowledgments:

the study was funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (program No. BR10965174).

For citation:

Determination of the specific activity of ^{177}Lu and associated radionuclide impurities / A. N. Gurin [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 2. P. 67–73. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.011

Введение

^{177}Lu с периодом полураспада ($T_{1/2}$) 6,89 сут одновременно излучает элементарные β -частицы, имеющие энергии 0,421 и 0,133 МэВ, и гамма-лучи (γ), имеющие энергии 208 и 113 кэВ. Поэтому, поскольку ^{177}Lu одновременно испускает β -частицы, пригодные для медицинского лечения, и γ -лучи, пригодные для получения изображения, он является идеальным радиоактивным изотопом, с помощью которого одновременно могут быть осуществлены медицинское лечение и получение изображения.

^{177}Lu представляет собой один из радиоактивных изотопов, образующихся в ядерном реакторе. Его получают с помощью процесса непосредственного образования, при котором осуществляют нейтронное облучение обогащенной ^{176}Lu -мишени для образования ^{177}Lu в соответствии с реакцией $^{176}\text{Lu}(n, \gamma)^{177}\text{Lu}$, или с помощью процесса непрямого образования, при котором обогащенную ^{176}Yb -мишень используют в качестве исходного материала в соответствии с реакцией $^{176}\text{Yb}(n, \gamma)^{177}\text{Yb}(\beta^- \rightarrow)^{177}\text{Lu}$ [1].

При непрямом процессе образования ^{177}Yb получают с помощью реакции (n, γ) в ходе нейтронного облучения мишени, обогащенной ^{176}Yb , и при этом ^{177}Yb с периодом полураспада 1,9 ч превращается в ^{177}Lu вследствие распада. По существу, путем химического выделения ^{177}Lu из Yb в ходе нейтронного облучения можно получать свободный от носителя ^{177}Lu , имеющий удельную радиоактивность до $1,1 \times 10^5$ Ки/г. Предполагается, что свободный от носителя ^{177}Lu , имеющий высокую удельную радиоактивность, будет иметь повышенную ценность как медикамент для современной радиоиммунотерапии рака предстательной железы, рака молочной железы и т. д., вследствие чего возрастает потребность в обогащенных ^{176}Yb -мишенях в качестве исходного материала, свободного от носителя ^{177}Lu [2].

Существует два альтернативных практических пути получения ^{177}Lu , а именно прямой путь, основанный на облучении мишени лютеция нейтронами, и косвенный путь, основанный на облучении мишени иттербия нейтронами с последующим радиохимическим отделением ^{177}Lu от изотопов иттербия. Оба пути изучались и обсуждались в последние годы.

Прямое получение ^{177}Lu :



Данный метод наиболее предпочтительнее, так как ^{176}Lu имеет сравнительно большое значение сечения реакции, ^{177}Lu может быть получен напрямую с высокой специфичной активностью при облучении нейтронами ^{176}Lu на ядерном реакторе.

Вследствие эффективного значения сечения, реакция активации выше расчетных значений. При облучении мишени ^{176}Lu в результате конкурирующей реакции образуется изомер $^{176}\text{Lu}(\underline{n}, \gamma)^{177m}\text{Lu}$, который снижает радионуклидную чистоту ^{177}Lu , подготовку получения, утилизацию отходов в клиниках. В природной смеси изотопов ^{176}Lu содержится только 2,6 %. В продаже доступно лишь 60–80 % обогащенного оксида лютеция (^{176}Lu). Единственным ограничением прямого пути является то, что образуется ^{177m}Lu . Получить максимальную специфическую активность можно только в высоком потоке нейтронов в реакторе, около 70 % от теоретического.

Косвенный путь получения ^{177}Lu :



^{177}Lu может быть практически получен свободным от носителя при β -распаде ^{177}Yb , полученного при облучении нейтронами ^{176}Yb на реакторе. Основным требованием для улучшения процесса является уменьшение образования изотопов ^{169}Yb и ^{175}Yb из обогащенной мишени. Доступный на рынке обогащенный оксид иттербия содержит ^{176}Yb около 97 %. Как правило, возможно использовать повторно облученную мишень ^{176}Yb , так как его значение сечения активации низкое и мишень практически не расходуется, но эта возможность пока еще мало обсуждается в литературе [3]. При получении безносительного ^{177}Lu с максимальной специфической активностью лютеций должен быть отделен от иттербиевой мишени, так как наравне с лютецием иттербий легко образует комплексы для радиофармпрепаратов [4].

Результаты

В качестве материала мишени возможно использование соединений лютеция и иттербия природного изотопного состава, а также соединений с различной степенью обогащения по изотопам ^{176}Lu и ^{176}Yb . На сегодняшний день рынок обогащенных изотопов лютеция и иттербия представлен соединениями со степенью обогащения от 65 до 95 % по целевому изотопу. Для теоретической оценки нами был выбран оксид лютеция природного состава, а также обогащенный оксид лютеция со степенью обогащения 83,31 % (^{176}Lu) [5, 6]. В табл. 1 представлены данные об изотопном составе лютеция.

Таблица 1

Данные об изотопном составе лютеция

Изотоп	^{175}Lu	^{176}Lu
Содержание в образце природного изотопного состава, %	97,40	2,60
Содержание в обогащенном образце, % [7]	$16,69 \pm 0,01$	$83,31 \pm 0,01$

Вне зависимости от процентного соотношения изотопов материала мишени, при облучении лютеция тепловыми нейтронами реактора по типу ядерных реакций (n, γ) будут нарабатываться радионуклиды, характеризующиеся различными временами жизни и энергиями распада. В табл. 2 приведены данные об изотопах, которые образуются при облучении нейтронами лютеция.

Результаты расчетов удельной активности изотопа ^{177}Lu в зависимости от времени облучения и материала мишени представлены в табл. 3.

Таблица 2

Радионуклиды, образующиеся при облучении лютеция по реакции (n, γ)

Материал мишени	Продукт реакции	Период полураспада	Цепочка распада радионуклида (продукта реакции)	Способ распада, энергия в кэВ [5, 7, 8]	
				β^- частицы	γ -излучение
^{176}Lu	^{177}Lu	6,734 дня	$\rightarrow ^{177}\text{Hf}$	497,8 (78,6 %); 384,8 (9,1 %); 248,5(0,053 %) 176,5 (12,2 %)	321,32(0,22 %); 249,67(0,21 %); 208,37 (11,06 %); 136,7(0,05 %); 112,95 (6,4 %)
	$^{177\text{m}}\text{Lu}$	160,9 дня	$\rightarrow ^{177}\text{Lu}(21\%)[6,71 \text{ дня}] \rightarrow ^{177}\text{Hf}$ либо $\rightarrow ^{177\text{m}}\text{Hf}(79\%)[1,08\text{с}] \rightarrow ^{177}\text{Hf}$	200	418; 414; 378; 228; 153; 128
^{177}Lu	^{178}Lu	28,4 мин	$\rightarrow ^{178}\text{Hf}$	2000	1341; 1310; 1269; 550 (очень слаб.); 445 (~ 10); 342 (100); $\gamma < 250$ не наблюдаются
^{177}Lu	$^{178\text{m1}}\text{Lu}$	22,7 мин	$\rightarrow ^{178\text{m1}}\text{Hf}[4 \text{ ч}] \rightarrow ^{178}\text{Hf}$	1200	332
^{177}Lu	$^{178\text{m2}}\text{Lu}$	16 мин	$\rightarrow ^{178}\text{Hf}$		
^{175}Lu	$^{176\text{m}}\text{Lu}$	3,68 ч	$\rightarrow ^{176}\text{Hf}$	1200; 1300	88

Примечание. Изотопы, подчеркнутые снизу линией, являются стабильными.

Как показали расчеты, удельная активность изотопа ^{177}Lu с носителем, получаемая из обогащенной мишени, в 32 раза больше, чем из мишени природного состава. Так, при использовании мишени из лютеция природного состава максимальное значение удельной активности составляет $4,84 \cdot 10^3$ ГБк/г, а при облучении мишени с обогащением по ^{176}Lu 83,31 % — $1,55 \cdot 10^5$ ГБк/г. Выход целевого изотопа при этом составляет ~ 4,5 %. Наряду с целевым изотопом нарабатываются и другие изотопы лютеция. Для оценки эффективности облучения в табл. 4 приведены активности изотопов по отношению к целевому изотопу в процентах.

Таблица 3

Результаты расчетов нарабатываемой активности изотопа ^{177}Lu

Ядерная реакция	Сечение реакции, барн [9]	Время облучения, дни	Активность мишени				¹⁷⁷ Lu, %
			природного состава		обогащенного состава		
			ГБк	ГБк/г	ГБк	ГБк/г	
¹⁷⁶ Lu(<i>n</i> , γ) ¹⁷⁷ Lu	2129 ± 60	1	555,69	5,59·10 ²	17,81·10 ³	1,79·10 ⁴	0,5
		10	3,54·10 ³	3,56·10 ³	113,51·10 ³	1,14·10 ⁵	3,3
		20	4,61·10 ³	4,64·10 ³	147,82·10 ³	1,49·10 ⁵	4,4
		30	4,81·10 ³	4,84·10 ³	154,27·10 ³	1,55·10 ⁵	4,5
		40	4,71·10 ³	4,74·10 ³	151,10·10 ³	1,52·10 ⁵	4,4

Таблица 4

Процентное содержание изотопов в облучаемой мишени из лютеция по отношению к целевому изотопу

Изотоп	Мишень природного состава				Мишень обогащенная			
	Облучение 20 дней		Облучение 30 дней		Облучение 20 дней		Облучение 30 дней	
	А, Бк	Примеси, %	А, Бк	Примеси, %	А, Бк	Примеси, %	А, Бк	Примеси, %
^{177}Lu	$4,6 \cdot 10^3$		$4,84 \cdot 10^3$		$1,49 \cdot 10^5$		$1,55 \cdot 10^5$	
$^{177\text{m}}\text{Lu}$	0,66	0,01	0,98	0,02	$0,22 \cdot 10^3$	0,15	$0,25 \cdot 10^3$	0,16
$^{176\text{m}}\text{Lu}$	$1,7 \cdot 10^3$	35,56	$1,65 \cdot 10^3$	34,09	$0,28 \cdot 10^3$	0,19	$0,28 \cdot 10^3$	0,18
^{178}Lu	$0,1 \cdot 10^3$	2,16	$0,11 \cdot 10^3$	2,27	$3,57 \cdot 10^3$	2,39	$3,81 \cdot 10^3$	2,46

Как видно из представленных данных, основной вклад в примеси вносит изотоп $^{176\text{m}}\text{Lu}$ с периодом полураспада 3,86 ч, но при переходе на обогащенный лютеций его содержание снижается в 6 раз. Практическая ценность прямого способа производства ^{177}Lu подвергалась сомнениям, поскольку наработка целевого радионуклида в этом случае сопровождается образованием долгоживущего изомера $^{177\text{m}}\text{Lu}$ ($T_{1/2} = 160$ сут). В целях снижения радиационной нагрузки на пациента и уменьшения активности отходов, образующихся в клиниках при проведении «лютециевой» терапии, содержание $^{177\text{m}}\text{Lu}$ в конечном продукте лимитируется [10]. Расчетные оценки, представленные в работах [7, 9], показывают, что при оптимизации условий облучения проблема наработки $^{177\text{m}}\text{Lu}$ успешно решается. Даже при облучении в высокопоточном реакторе в течение 10 сут доля $^{177\text{m}}\text{Lu}$ остается на приемлемом уровне и не превышает 0,02 % [4].

Для определения необходимого времени облучения мишени можно воспользоваться зависимостью отношения удельной активности, нарабатываемой к максимально возможной, данные приведены в табл. 5.

Согласно данным, приведенным в табл. 5, и с учетом высокой стоимости облучения можно сделать вывод, что целесообразно проводить облучение мишеней из лютеция в течение 5–20 дней. Для более точного определения необходимо проведение экспериментальных облучений мишеней из лютеция с последующим определением радионуклидного состава облученных образцов.

В ряде случаев применение радиоизотопов требует особенно высоких значений удельной активности. В таких случаях целесообразно получать радиоизотоп «без носителя».

Эксперименты по определению удельной активности ^{177}Lu и сопутствующих радиоактивных примесей проводились с использованием мишени из хлорида лютеция массой 10 мкг по лютецию. Для приготовления мишени из лютеция 0,2 г навески реактива хлорида лютеция 6-водного $\text{LuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ природного изотопного состава растворяли в 10 мл 0,1 М НСl. Концентрация полученного раствора по иттербию составляла 12,4 мг/мл. В колбу на 25 мл отбирали 2,8 мл приготовленного раствора и доводили до метки 0,1 М НСl. Концентрация лютеция в полученном растворе составляла 1,0 мг/мл.

Затем в кварцевые ампулы отбирали дозатором 10 мкл приготовленного исходного раствора и высушивали в сушильном шкафу при температуре 60–90 °С в течение 24 ч. После высушивания ампулы запаивали газосварочным аппаратом при 1600 °С. Запаянные ампулы проверили на герметичность путем погружения их в воду на 2–3 ч.

Таблица 5

Зависимость отношения нарабатываемой удельной активности
к максимальной удельной активности от времени облучения мишени лютеция

Время облучения, дни	$A_{уд}/A_{уд\max}$
1	0,176
3	0,317
5	0,429
8	0,519
10	0,590
12	0,646
14	0,690
16	0,724
18	0,749
20	0,769
22	0,783
24	0,792
26	0,798
28	0,801
30	0,802
32	0,801

Подготовленные ампулы заворачивали в алюминиевую фольгу и помещали в блок-контейнер. Мишени из лютеция облучали в течение 1, 3 и 5 дней в периферийном канале реактора ВВР-К при плотности потока тепловых нейтронов около $3 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Результаты теоретических расчетов удельной активности ^{177}Lu и сопутствующих радионуклидов при облучении 10 мкг лютеция природного изотопного состава в течение 1, 3 и 5 дней представлены в табл. 6.

В таблице 7 приведены экспериментальные значения активности изотопов лютеция в сравнении с теоретическими данными.

Таблица 6

Результаты теоретических расчетов удельной активности ^{177}Lu
и сопутствующих радионуклидов на конец облучения мишени из лютеция

Изотоп	Лютеций природного состава							
	Активность, Бк			Удельная активность				
	24 ч	72 ч	120 ч	24 ч		72 ч		120 ч
				Бк/г	Ки/г	Бк/г	Ки/г	Бк/г
^{177}Lu	$5,6 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^7$	$5,58 \cdot 10^{11}$	15,05	$1,5 \cdot 10^{12}$	40,81	$2,3 \cdot 10^{12}$
$^{177\text{m}}\text{Lu}$	$3,5 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$3,45 \cdot 10^7$	0,001	$1,0 \cdot 10^8$	0,003	$1,7 \cdot 10^8$
$^{176\text{m}}\text{Lu}$	$1,6 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	$1,63 \cdot 10^{12}$	44,05	$1,7 \cdot 10^{12}$	44,59	$1,7 \cdot 10^{12}$

Таблица 7

Результаты экспериментальных расчетов удельной активности ^{177}Lu
и сопутствующих радионуклидов в сравнении с теоретическими данными

Изотоп		Лютеций природного состава					
		Активность, Бк			Удельная активность, Бк/г		
		24 ч	72 ч	120 ч	24 ч	72 ч	120 ч
^{177}Lu	Эксперимент	$5,6 \cdot 10^6$	$1,51 \cdot 10^7$	$2,27 \cdot 10^7$	$5,59 \cdot 10^{11}$	$1,51 \cdot 10^{12}$	$2,27 \cdot 10^{12}$
	Теория	$11,2 \cdot 10^6$	$3,93 \cdot 10^7$	$5,40 \cdot 10^7$	$11,3 \cdot 10^{11}$	$3,93 \cdot 10^{12}$	$5,40 \cdot 10^{12}$
$^{177\text{m}}\text{Lu}$	Эксперимент	$0,24 \cdot 10^3$	$0,72 \cdot 10^4$	$1,20 \cdot 10^4$	$0,24 \cdot 10^8$	$0,72 \cdot 10^8$	$1,20 \cdot 10^8$
	Теория	$0,44 \cdot 10^3$	$1,68 \cdot 10^3$	$2,61 \cdot 10^3$	$0,44 \cdot 10^8$	$1,68 \cdot 10^8$	$2,61 \cdot 10^8$
$^{176\text{m}}\text{Lu}$	Эксперимент	$1,63 \cdot 10^7$	$1,65 \cdot 10^7$	$1,65 \cdot 10^7$	$1,63 \cdot 10^{12}$	$1,65 \cdot 10^{12}$	$1,65 \cdot 10^{12}$
	Теория	$3,61 \cdot 10^7$	$5,51 \cdot 10^7$	$7,35 \cdot 10^7$	$3,61 \cdot 10^{12}$	$5,51 \cdot 10^{12}$	$7,35 \cdot 10^{12}$
^{178}Lu	Эксперимент	$6,66 \cdot 10^4$	$6,01 \cdot 10^4$	$5,42 \cdot 10^4$	$1,32 \cdot 10^{10}$	$3,53 \cdot 10^{10}$	$5,29 \cdot 10^{10}$
	Теория	Не обнаружен					

Выход при облучении лютетия природного изотопного состава тепловыми нейтронами в реакторе ВВР-К в течение 1, 3 и 5 дней составил ~ 50 % от расчетного значения. При этом не был обнаружен изотоп ^{178}Lu с периодом полураспада 28,4 мин, который должен был составить 2,3 % по отношению к удельной активности целевого изотопа. Кроме этого, было обнаружено 0,2 % примесного изотопа ^{155}Eu ($T_{1/2}=4,753$ лет) и при облучении в течение 1 дня 0,8 % ^{153}Sm и 0,03 % ^{155}Sm , их процентное содержание определялось по отношению к целевому изотопу.

Выводы

Проведена теоретическая оценка удельной активности ^{177}Lu и сопутствующих радионуклидных примесей при использовании лютетия и иттербия в качестве материала мишеней. Показано, что удельная активность изотопа ^{177}Lu с носителем, получаемая из оксида обогащенного лютетия, составляет $1,6 \cdot 10^5$ ГБк/г. Проведены эксперименты по определению удельной активности ^{177}Lu в облученных на реакторе ВВР-К образцах лютетия природного изотопного состава. Показано, что для образцов теоретические прогнозы хорошо подтверждаются экспериментальными данными, а для образцов лютетия выход при облучении составляет 50 %.

Список источников

1. Dash A., Pillai M. R. A., Knapp F. F. Production of ^{177}Lu for Targeted Radionuclide Therapy: Available Options // Nucl. Med. Mol. Imaging (2010). 2015. V. 49, Issue 2. P. 85–107.
2. Lebedev N. A., Novgorodov A. F., Misiak R., Brockmann J., Rösch F. Radiochemical separation of no-carrier-added ^{177}Lu as produced via the $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$ process // Appl. Radiat. Isot. 2000. V. 53, Issue 3. P. 421–425.
3. Bhardwaj R., Ponsard B., Sarilar M. Large-scale production of lutetium-177m for the 177mLu/177Lu radionuclide generator // Appl. Radiat. Isot. Elsevier Ltd. 2020. V. 156, Issue 11. P. 108986.
4. Кузнецов Р. А., Бобровская К. С., Светухин В. В., Фомин А. Н., Жуков А. В. Производство лютетия-177: технологические аспекты // Радиохимия. 2019. Т. 61, № 4. С. 273–285.
5. Trace Sciences International, www.isotopetrace.com
6. Isoflex USA. Certificate No.: 70-02-176-1078. URL: www.isoflex.com.
7. Дзепелов Б. С., Пекар Л. К. Схема распада радиоактивных ядер // Издательство Академии наук СССР. М., 1958. С. 493–520.
8. Pfennig G., Klewe-Nebenius H., Seelmann-Eggebert W. Kalsruher nuklidkarte. Chart of the nuclides — Tableau des nuclides — Tabla de nuclidos // Institut für Radiochemie. 6. Auflage. 1995. P. 15–18.
9. Manual for reactor produced radioisotopes International atomic energy // A-1400, IAEA-TECDOC-1340. Vienna. 2003. P. 121–129.
10. Gurin A. N., Riss P., Matveeva I. V., Chakrova E. T. Quality control test for ^{177}Lu -DOTAELA // Int. J. Biol. Chem. 2019. V. 12, Issue 2. P. 112–115.

References

1. Dash A., Pillai M. R. A., Knapp F. F. Production of ^{177}Lu for targeted radionuclide therapy: available options. Nucl. Med. Mol. Visualization (2010), 2015, vol. 49, issue 2, pp. 85–107.
2. Lebedev N. A., Novgorodov A. F., Misyak R., Brockmann J., Resh F. Radiochemical separation of ^{177}Lu with the addition of a no carrier obtained by the $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$ process. Appendix. Radiate. Izot, 2000, vol. 53, issue 3, pp. 421–425.
3. Bhardwaj R., Ponsard B., Sarilar M. Large-scale production of lutetium ^{177}m for the radionuclide generator $^{177}\text{mLu}/^{177}\text{Lu}$. Appendix. Radiate. Isot. LLC “Elzevir”, 2020, vol. 156, issue 11, pp. 108986.
4. Kuznetsov R. A., Bobrovskaya K. S., Svetukhin V. V., Fomin A. N., Zhukov A. V. Proizvodstvo lyutetsiya-177: tekhnologicheskiye aspekty [Production of lutetium-177: technological aspects]. Radiokhimiya [Radiochemistry], 2019, vol. 61, no. 4, pp. 273–285.
5. Trace Sciences International. Available at: www.isotopetrace.com.
6. Isoflex USA. Certificate number: 70-02-176-1078. Available at: www.isoflex.com.
7. Dzhepelov B. S., Pekar L. K. Skhema okisleniya radioaktivnykh yader [Scheme of decay of radioactive nuclei]. Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR [Publishing House of the USSR Academy of Sciences]. Moscow, 1958, pp. 493–520.
8. Pfennig G., Klewe-Nebenius H., Seelmann-Eggebert W. Kalsruher nuklidkarte. Diagram of nuclides — Table of nuclides — Table of nuclides. Institute of Radiochemistry. 6. Auflage, 1995, pp. 15–18.
9. Guidelines on radioisotopes produced by the Reactor. International Atomic Energy Agency. A-1400, IAEA-TECDOC-1340. Vienna, 2003, pp. 121–129.
10. Gurin A. N., Riss P., Matveeva I. V., Chakrova E. T. Quality control of the test for ^{177}Lu -DOTAELA. In-t biol. Chemistry, 2019, vol. 12, Issue 2, pp. 112–115.

Информация об авторах

А. Н. Гурин — доктор химических наук, научный сотрудник, заместитель начальника НТЦ РПИ, <http://orcid.org/0000-0003-3900-3818>;
Е. Т. Чакрова — начальник НТЦ РПИ, руководитель проекта;
З. В. Медведева — руководитель группы контроля качества;
С. Г. Солоникина — инженер группы производства, магистр;
И. В. Матвеева — доктор химических наук, ассоц. профессор, научный сотрудник;
В. А. Захаров — инженер группы производства;
Е. К. Кулакова — инженер группы контроля качества.

Information about the authors

A. N. Gurin — PhD (Chemistry), Researcher, Deputy Head of STC RPI, <http://orcid.org/0000-0003-3900-3818>;

Ye. T. Chakrova — head of STC RPI, project manager;

Z. V. Medvedeva — manager quality control groups;

S. G. Soloninkina — engineer of the production group, Master;

I. V. Matveeva — PhD (Chemistry), Associate Professor, researcher;

V. A. Zakharov — engineer of the production group;

E. K. Kulakova — engineer of the quality control group.

Статья поступила в редакцию 28.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 28.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.