А.В. Белоусов¹, М.В. Желтоножская^{1,2}, Е.Н. Лыкова^{1,2}, П.Д. Ремизов¹, А.П. Черняев^{1,2}, В.Н. Яценко³

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОНУКЛИДА ¹³¹Сs ДЛЯ БРАХИТЕРАПИИ ФОТОЯДЕРНЫМ СПОСОБОМ

1. Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва. E-mail: iv-kate@yandex.ru; 2. НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва;

3. Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

А.В. Белоусов – доцент, к.ф.-м.н.; М.В. Желтоножская – с.н.с., ведущий инженер, к.т.н.;

Е.Н. Лыкова – старший преподаватель, ведущий инженер; П.Д.Ремизов – аспирант; А.П. Черняев – зав. кафедрой, зав. лаб., проф., д.ф.-м.н.; В.Н. Яценко – зав. лабораторией, к.т.н.

Реферат

Цель: Исследование возможности получения 131 Cs в реакции (у, 2n) на пучках тормозных фотонов, получаемых на ускорителе электронов путем облучения природного цезия, состоящего из единственного стабильного нуклида ¹³³Сs.

Материал и методы: Проведено облучение мишени природного цезия на импульсном разрезном микротроне НИИЯФ МГУ с энергией электронов 55 МэВ, средним током 40-45 нА в течение 80 мин. После экспозиции гамма-излучение мишени измерялось на полупроводником спектрометре Canberra с детектором из сверхчистого германия большого объема.

Результаты: Активность в облученном образце 131 Cs оказалась равной 8,1 ±1,0 мкКи на момент окончания облучения. Заключение: При брахитерапии для курса лечения пациента обычно применяют от 10 до 60 микроисточников. Активность одного терапевтического микроисточника¹³¹Сs составляет порядка 10⁻³ Ки, наработка требуемого количества становится возможной при использовании ускорителей электронов с токами порядка 50 мкА.

Ключевые слова: медицинская физика, брахитерапия, активация, ускорители электронов, фотоядерные реакции, ¹³¹Сs Поступила: 06.09.2018. Принята к публикации: 29.11.2018

Введение

Интенсивное развитие брахитерапии, которая стала эффективным средством как самостоятельного, так и комбинированного лечения онкологических больных, привело к возрастающему числу потребителей и повышению требований к технологиям получения радионуклидов. В последние годы повсеместное признание в лечении рака предстательной железы, одного из наиболее распространённых злокачественных новообразований у мужчин, получил метод брахитерапии с применением ¹²⁵I с периодом полураспада 59 сут и средней энергией фотонного излучения 28,5 кэВ.

Однако уже с 2003 г. в США для клинического использования при лечении рака этого вида получили одобрение радиоимплантаты ¹³¹Сs. По результатам исследований пациентов, которым была произведена имплантация ¹³¹Cs, получено, что уровень биохимической безрецидивной выживаемости составил 91-97 %, что является хорошим показателем, свидетельствующим о высокой эффективности этого препарата. Средняя энергия фотонов ¹³¹Сs составляет 34 кэВ, а период полураспада ¹³¹Сs равен 9,7 сут. Скорость репопуляции раковых клеток простаты составляет 1,5 % в день, т.е. увеличение их количества в два раза происходит за 67 сут. Таким образом, скорость уничтожения раковых клеток при использовании ¹³¹Сs существенно выше скорости их репопуляции [1-5].

Однако в России этот эффективный радионуклид до сих пор не нашел применения. Одним из возможных объяснений этого факта является сложность и дороговизна получения требуемого количества ¹³¹Сs по традиционной технологии на ядерных реакторах. Поэтому в настоящее время достаточно актуальными являются исследования альтернативных каналов получения ¹³¹Cs с помощью ускорителей электронов и оценка эффективности этого метода.

Обзор современных способов наработки ¹³¹Сs

Радионуклид ¹³¹Сs имеет довольно небольшой период полураспада, что является его важным преимуществом при медицинском применении, однако создаёт дополнительные сложности при его производстве. Суммарная активность всех источников, вводимых одному пациенту, составляет около 50 мКи при удельной активности около 500 мКи/г.

Этот радионуклид распадается путем электронного захвата, превращаясь в нуклид ¹³¹Хе в стабильном состоянии. Электронный захват сопровождается испусканием характеристического излучения 29,461, 29,782, 33,624 и 34,419 кэВ. Учитывая интенсивности этих линий, а также их взаимное положение в энергетическом спектре, можно упрощённо считать, что распад сопровождается характеристическим излучением с энергией 29 и 34 кэВ.

¹³¹Сѕ может быть получен в результате облучения ксеноновой мишени протонами. В результате исследований [6] было получено, что оптимальный диапазон энергий протонов для наработки ¹³¹Сs этим методом – это энергии от 16 до 17 МэВ, где выход радионуклида составляет 15 МБк/(мкА×ч), а на 20 МэВ – 17 МБк/ (мкА×ч). При энергии свыше 17 МэВ образуется ¹²⁹Сs по реакции ¹³¹Хе(р,3n)¹²⁹Сs. Сечения образования ¹³¹Сѕ в данной реакции (экспериментальных данных и теоретических, полученных на основе баз данных Allice-Ippe, Empire, PADF-2007 и TENDL-2008) показаны на рис. 1. К недостаткам этого метода можно отнести сложность реализации в промышленных условиях, в первую очередь, из-за необходимости облучения газовых мишеней. Также известна реакция 127 I(α,γ) 131 Cs, но максимум сечения этой реакции составляет 0,156 мбарн, что на 4 порядка меньше, чем в реакции на ксеноне.

Кроме непосредственной наработки ¹³¹Cs, его также можно получать генераторным методом. В этом случае сначала получают радионуклид ¹³¹Ba, который с периодом полураспада 11,8 сут превращается в искомый ¹³¹Cs.

В последние годы используются методы получения ¹³¹Сѕ и ¹³¹Ва с помощью ядерных реакторов и ускорителей протонов. Во всех этих методах критическую роль играют сопутствующие ядерные реакции, при которых образуются другие радионуклиды, наличие которых не позволяет применять ¹³¹Сѕ в медицинских целях без проведения дополнительных дорогостоящих радиохимических процедур его выделения.

На сегодняшний день основной реакторный метод, применяемый в промышленности для получения 131 Сs, основан на реакции 130 Ва $(n,\gamma)^{131}$ Ва [7].

Для его осуществления природную смесь бария, в состав которой входит 7 стабильных изотопов ¹³⁰Ва (0,101 %), ¹³²Ва(0,097 %), ¹³⁴Ва(2,42 %),¹³⁵Ва(6,59 %), ¹³⁶Ва(7,81 %), ¹³⁷Ва(11,32 %), ¹³⁸Ва(71,66 %) помещают в ядерный реактор. Масса мишени должна быть достаточно большой, так как содержание ¹³⁰Ва в природной смеси бария составляет всего 0,1 %. Наряду с природной смесью бария используют мишени, обогащённые ¹³⁰Ва для более эффективной наработки ¹³¹Ва. Образующийся ¹³¹Ва с периодом полураспада 11,5 сут посредством электронного захвата превращается в ¹³¹Сs.

По теоретическим расчётам, сечение реакции ^{nat}Ba(n, γ)¹³¹Ba при облучении тепловыми нейтронами составляет 11,3 мбарн. После 1 ч облучения нейтронами с плотностью потока 10¹⁴ н/(с×см²) 1 г такой мишени обусловит получение активности 10 МБк за 1 ч. При облучении в тех же условиях 1 г ¹³⁰Ba можно получить активность 10 ГБк. Обычно за неделю нарабатывается до нескольких сотен Ки [7]. К недостаткам этого метода можно отнести значительное количество радиоактивных отходов, образующихся после выделения ¹³¹Cs из облученных мишеней.

Образующийся по мере облучения мишени реакторными нейтронами ¹³¹Cs также способен захватывать нейтроны, превращаясь в ¹³²Cs. Этот радионуклид в мягком рентгеновском диапазоне имеет идентичный ¹³¹Cs спектр, однако, вместе с этим испускает и высокоинтенсивное гамма-излучение с энергией 667 кэВ.

Для выделения цезия из облученной мишени используют радиохимические методы. Облученный барий растворяют в кислоте, а затем, нейтрализуя раствор, осаждают барий опять в твердое состояние, в виде нерастворимой в воде соли бария. Образующаяся при этом соль цезия водорастворима и отфильтровывается от твердого осадка, содержащего барий. Далее производится тонкая химическая очистка раствора от примесей и выпаривание воды. Указанную процедуру производят по истечении определённого промежутка времени после облучения в реакторе, который обычно составляет от 6 ч до 5 сут. Это необходимо для того, чтобы распалась часть ядер ¹³²Сs, период полураспада которого меньше по сравнению с ¹³¹Сѕ и составляет 6,5 сут. Иногда процесс выделения повторяют с периодичностью в несколько дней, что увеличивает долю изотопа ¹³¹Сѕ в их смеси. Финальная радионуклидная чистота по ¹³¹Сѕ должна превышать 99,9 % [7].

Таким образом, к основным недостаткам современных методов получения ¹³¹Сѕ можно отнести либо сложность реализации в промышленных условиях, либо значительное количество радиоактивных отходов, образующихся после выделения ¹³¹Сѕ из облученных мишеней.

В данной работе исследована возможность наработки ¹³¹Cs в реакции (γ, 2n) на пучках тормозных фотонов, получаемых на ускорителе электронов, путем облучения мишени природного цезия, состоящего из единственного стабильного нуклида ¹³³Cs.

Методика эксперимента

Схема проведённого эксперимента показана на рис. 2.

Облучение мишени из природного цезия проводилось на импульсном разрезном микротроне НИИЯФ МГУ (рис. 3). Его характеристики приведены в табл. 1.

В нашем эксперименте на выходе из микротрона пучок электронов имел энергию 55 МэВ, средний ток 40–45 нА и поперечные размеры 8×2 мм. В качестве тормозной мишени использовали вольфрамовую мишень толщиной 2,1 мм. Облучаемая мишень располагалась непосредственно за тормозной мишенью на оси пучка электронов. В качестве мишени использовался



Рис. 1. Сечение активации в реакции ¹³¹Хе (p,n)¹³¹Сs [7]



Рис. 2. Схема эксперимента

Таблица 1

Параметры микротрона	ниияљ мгу
параметры микротрона	

Энергия пучка на выходе	55 МэВ
Ток пучка на выходе	До 10 мА
Частота инжекции	5-50 Гц
Число участков линейного ускорения	11
Длина импульса	5 мкс
Прирост энергии за оборот	5 МэВ
Частота работы	2856 МГц
Магнитное поле	1 Тл
Максимальная мошность	2.5 MBT

0,35 г порошка хлорида цезия в пластиковой капсуле, облучаемой в течение 80 мин.

После облучения мишени проводились измерения на полупроводником спектрометре Canberra с детектором из сверхчистого германия большого объема с энергетическим разрешением 1,8 кэВ по гамма-линии 1332 кэВ ⁶⁰Со.

Ниже (рис. 4а) приведен общий вид и фрагменты (рис. 4 б-г) полученных спектров через 2,61, 9,8 и 21,73 сут после окончания облучения. Столь большое время после облучения было выбрано для минимизации вкладов ¹²⁹Сs и ^{131m}Хе в пики с энергией 29 и 34 кэВ, по которым проводилась идентификация ¹³¹Сs и ¹³²Cs. На фрагментах каждого спектра указано время, в течение которого проводилось измерение.



Рис. 3. Разрезной микротрон НИИЯФ МГУ 55 МэВ

Обсуждение полученных результатов

Результаты и анализ обработки полученных спектров позволяют заключить о наличии в облученном образце результатов следующих реакций:

¹³³₅₅*Cs* + $\gamma \rightarrow \frac{132}{55}Cs + n$, ¹³³₅₅*Cs* + $\gamma \rightarrow \frac{131}{55}Cs + 2n$, ¹³³₅₅*Cs* + $\gamma \rightarrow \frac{131m}{54}Xe + p + n$, ¹³³₅₅*Cs* + $\eta \rightarrow \frac{134}{55}Cs$, ¹³³₅₅*Cs* + $\eta \rightarrow \frac{129}{55}Cs + 4n$. Можно с уверенностью утверждать, что реакции ¹³³₅₅*Cs* + $\gamma \rightarrow \frac{130}{55}Cs + 3n$, ¹³³₅₅*Cs* + $\gamma \rightarrow \frac{130}{55}Cs + 3n$, ¹³³₅₅*Cs* + $\gamma \rightarrow \frac{130}{55}Cs + 2n + p$,

$$^{133}_{55}Cs + \gamma \rightarrow ^{129}_{54}Xe + 3n + p$$



Рис. 4. Спектры облученной мишени цезия: (a) – общий вид спектра через 2,61 сут после окончания облучения; фрагменты измеренных спектров через 2,61 (б), 9,8 (в) и 21,73 (г) сут после окончания облучения в области энергий 10–50 кэВ

также имели место, но период полураспада ¹³⁰Cs – несколько минут, а изотопы ксенона стабильны и их не удается идентифицировать в спектрах. Также в спектре было определено по излучению энергии 163,9 кэВ достаточное количество возбуждённых ядер ^{131m}Xe. Этот изомер также излучает гамма-кванты с энергией 29 и 34 кэВ, однако его вклад не превышает десятых долей процента.

Из всех продуктов облучения можно отметить изотоп 134 Cs, который образовался не непосредственно в результате фотоядерных реакций, а при захвате ядрами 133 Cs нейтронов, образующихся в (γ , xn)-реакциях, где x – может достигать 5.

В пики 29 и 34 к
эВ вносят вклад 4 изотопа: $^{129}\mathrm{Cs},~^{131}\mathrm{Cs},~^{131\mathrm{m}}\mathrm{Xe}$
и $^{132}\mathrm{Cs}.$ Их периоды полураспада составляют:

$$T_{\frac{1}{2}} \begin{pmatrix} 129\\55}Cs \end{pmatrix} = 32 \text{ y}$$
$$T_{\frac{1}{2}} \begin{pmatrix} 131m\\54}Xe \end{pmatrix} = 11,84 \text{ cyr}$$
$$T_{\frac{1}{2}} \begin{pmatrix} 135\\55}Cs \end{pmatrix} = 9,69 \text{ cyr}$$
$$T_{\frac{1}{2}} \begin{pmatrix} 132\\55}Cs \end{pmatrix} = 6,48 \text{ cyr}.$$

Помимо того, что у ¹²⁹Сs малое сечение реакции, этот изотоп имеет сравнительно короткий период полураспада, что сводит его влияние к минимуму. Ксенон также отличается малым сечением образования.

Таким образом, получается, что в интересующие рентгеновские пики ощутимый вклад вносят лишь изотопы ¹³¹Cs и ¹³²Cs. Однако, так как ¹³¹Cs распадается электронным захватом и его распад не сопровождается выходом гамма-квантов, то оценить его вклад в суммарные пики характеристического излучения 29 и 34 кэВ мы можем только, отследив с течением времени изменения интенсивности этих пиков, связанные с периодом полураспада ¹³¹Cs и ¹³²Cs. Для этого мы исследовали на полупроводниковом спектрометре активность образца через 9,8 и 21,73 сут после активации мишени.

Проанализировав полученные данные, мы получили, что отношение активности двух изотопов в мишени к концу облучения оказалось равным 0,7±0,1.

Определить активность ¹³²Сs в облученной мишени можно из любой удобной гамма-линии (см. рис. 4), например, 464 кэВ, по формуле:

$$A = \frac{I}{\eta \varepsilon t^{\text{H3M}}} \tag{1}$$

где *I* – интенсивность гамма-линии, η – квантовый выход, *N* – число распавшихся за время измерения ядер $t^{и_{3M}}$, ε – эффективность регистрации детектора. А из закона радиоактивного распада можно рассчитать активность изотопов на момент окончания облучения. В итоге активность ¹³²Cs в образце оказалась равной 17,5±1,2 мкКи, а активность ¹³¹Cs, полученная из (1), оказалась равной 12,2±1,0 мкКи на момент окончания облучения.

Это означает, что выход ¹³¹Сs при данных условиях облучения составляет порядка 2 МБк/(мкА×ч), что на

порядок меньше, чем при облучении ксеноновых мишеней протонами с энергией около 20 МэВ.

Заключение

В брахитерапии для курса лечения пациента обычно применяют от 10 до 60 микроисточников. Активность одного терапевтического микроисточника ¹³¹Cs составляет порядка 10⁻³ Ки. В облучении, проведённом на 0,35 г хлорида цезия в течение 80 мин, мы получили активность по ¹³¹Cs 12,2 мкКи. Заменить:

То есть, для получения необходимой активности одного микроисточника время облучения на микротроне может составить свыше 7 ч. Таким образом, для наработки активности, требуемой для введения одному пациенту, необходимо либо увеличивать ток пучка электронов до 50 мкА, либо увеличивать время облучения образца. Современные промышленные ускорители электронов позволяют получать токи порядка нескольких мА.

Также можно отметить, что отношения количеств ядер двух изотопов цезия в мишени к концу облучения оказалось равным 0,7, при этом «загрязняющий» изотоп 132 Cs с периодом полураспада 6,5 сут распадается на стабильный 132 Xe. Поскольку период полураспада 132 Cs примерно в полтора раза меньше, чем у 131 Cs, то через 4 мес после облучения радионуклидная чистота 131 Cs станет достаточной для его применения в качестве имплантата, а его активность уменьшится примерно на три порядка. Кроме того, для разделения изотопов 131 Cs и 132 Cs непосредственно после облучения мишеней из природного цезия допустимо использовать традиционные масс-сепараторные методы, но это может существенно увеличить себестоимость медицинского источника.

Таким образом, получение ¹³¹Cs предлагаемым методом при различных режимах и энергиях работы ускорителей электронов перспективно для разработки конкурентоспособного метода получения этого медицинского источника, однако для этого потребуются дальнейшие исследования.

Статья написана при финансовой поддержке гранта «УМНИК» по теме «Разработка технологии получения перспективных низкоэнергетических источников ионизирующего излучения для лучевой терапии онкологических заболеваний с использованием линейных ускорителей электронов», договор №13365 ГУ/2018. Руководитель проекта – Е.Н. Лыкова

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kehwar T.S., Jones H.A., Huq M.S., Smith R.P. Changes in radiobiological parameters in ¹³¹Cs permanent prostate implants // J. Radiother. Practice. 2013. Vol. 12. P. 66–79.
- Glaser S.M., Benoit R.M., Smith R.P., Beriwal S. Long-term quality of life in prostate cancer patients treated with cesium-131 // Brachytherapy. 2016. Vol. 15. P. 48–53.
- Knaup C., Mavroidis P., Esquivel C. et al. Radiobiological comparison of single and dual-isotope prostate seed implants // J. Radiother. Practice. 2013. Vol. 12. P. 154–162.

- 4. Yondorf M.Z., Parashar B., Sabbas A. et al. Radiation exposure after neurosurgical resection and permanent intraoperative cesium-131 radioisotope brachytherapy in patients with brain tumors // Brachytherapy. 2014. Vol. 13. P. 109-110.
- 5. Zlokazov S., Swanberg D. J., Egorov O. et al. Method for large scale production of cesium-131 with low cesium-132 content // US Patent Application Publication. 2012.
- 6. Tárkányi F., Hermanne A., Takács S. et al. Cross section measurements of the ¹³¹Xe(p,n) reaction for production of

Medical Radiology and Radiation Safety. 2019. Vol. 64. No. 1. P. 53-57

the therapeutic radionuclide ¹³¹Cs // Appl. Radiat. Isot. 2009. Vol. 67. Nº 10. P. 1751–1757.

7. Браун Г.Н., Суонберг Д.Дж., Брэй А. Способ отделения и очистки цезия-131 от карбоната бария. - М: Евразийская патентная организация Патент № 9820. 2008.

Для цитирования: Белоусов А.В., Желтоножская М.В., Лыкова Е.Н., Ремизов П.Д., Черняев А.П., Яценко В.Н. Исследование возможности получения радионуклида ¹³¹Сs для брахитерапии фотоядерным способом // Мед. радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64. № 1. С. 53-57. DOI: 10.12737/article_5c55fb4d218e20.76419134

DOI: 10.12737/article 5c55fb4d218e20.76419134

Radiation Physics, Technology And Dosimetry

Research of ¹³¹Cs Radionuclide Production for Brachytherapy with Photonuclear Method

A.V. Belousov¹, M.V. Zheltonozhskaya^{1,2}, E.N. Lykova^{1,2}, P.D. Remisov¹, A.P. Chernyaev^{1,2}, V.N. Iatsenko³

1. Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia. E-mail: iv-kate@yandex.ru;

2. D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

3. A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

A.V. Belousov – Assoc, Prof., PhD Phys.-Math.; M.V. Zheltonozhskava – Senior Researcher, Leading Engineer, PhD Tech.;

E.N. Lykova – Senior Lecturer, Leading Engineer; P.D. Remisov – Past-Graduate Student; A.P. Chernyaev – Head of Dep., Head of Lab., Dr. Sci. Phys.-Math., Prof.; V.N. Iatsenko – Head of Lab., PhD Tech.

Abstract

Purpose: Currently a brachytherapy method with ¹²⁵I received widespread acceptance in the treatment of prostate cancer. However, since 2003, ¹³¹Cs radio-implants have been approved for clinical use in the treatment of this type of cancer. To investigate alternative ¹³¹Cs receiving channels using electron accelerators and to evaluate the effectiveness of this method for its use in brachytherapy.

Material and methods: To study alternative channels for the ¹³¹Cs production using electron accelerators and to evaluate the efficiency of this method, we irradiated the natural cesium target (0.35 g) on a pulsed microtron with an electron energy of 55 MeV, an average amperage of 40–45 nA during 80 min. <u>Results</u>: The ¹³¹Cs activity in the irradiated sample was $12.2 \pm 1.0 \mu$ Ci at the end of irradiation.

 $\overline{\text{Conclusion}}$: In brachytherapy, 10 to 60 micro-sources are usually used to treat a patient. The activity of one therapeutic micro source is ¹³¹Cs of the order of 10⁻³ Ci. Thus, the development of the required amount becomes possible when using electron accelerators with currents of the order of 50 mA. In the future it is also necessary to investigate ¹³¹Cs in the electron energy range 30-45 MeV for choosing the optimal irradiation regime.

Key words: medical physics, brachytherapy, activation, electron accelerators, photonuclear reactions, ¹³¹Cs

REFERENCES

- 1. Kehwar TS, Jones HA, Huq MS, Smith RP. Changes in radiobiological parameters in ¹³¹Cs permanent prostate implants. J Radiother Practice. 2013;12:66-79.
- 2. Glaser SM, Benoit RM, Smith RP, Beriwal S. Long-term quality of life in prostate cancer patients treated with cesium-131. Brachytherapy. 2016. 15:48.
- 3. Knaup C, Mavroidis P, Esquivel C, et al. Radiobiological comparison of single and dual-isotope prostate seed implants. J Radiother Practice. 2013.12:154-62.
- Yondorf MZ, Parashar B, Sabbas A, et al Radiation exposure after neurosurgical resection and permanent intraoperative cesium-131 radio-isotope brachytherapy in patients with brain tumors. Brachytherapy. 2014.13:109-10.
- 5. Zlokazov S, Swanberg DJ, Egorov O, et al. Method for large scale production of cesium-131 with low cesium-132 content. United States Patent Application Publication. 2012 Jun.7.
- 6. Tárkányi F, Hermanne A, Takács S, Rebeles RA, Van den Winkel P, Király B, Ditrói F, Ignatyuk AV. Cross section measurements of the $^{131}\!\mathrm{Xe}(p,n)$ reaction for production of the therapeutic radionuclide ¹³¹Cs. Appl. Radiat. Isot. 2009. 67(10):1751-7.
- 7. Brown GN, Swanberg DJ, Bray LA. Method of separation and purification of cesium-131 from barium carbonate: Pat.: 9820, Eurasian Patent Organization 28.04.2008. (Russian).

For citation: Belousov AV, Zheltonozhskaya MV, Lykova EN, Remisov PD, Chernyaev AP, Iatsenko VN. Research of ¹³¹Cs Radionuclide Production for Brachytherapy with Photonuclear Method. Medical Radiology and Radiation Safety. 2019;64(1):53-7. (Russian).

DOI: 10.12737/article_5c55fb4d218e20.76419134