**Исследование возможности получения медицинских изотопов рения   
в фотоядерных реакциях**

***Ленивкин М.В.1, Желтоножская М.В.2, Ремизов П.Д3, Черняев А.П.4***

*1студент, 2старший научный сотрудник, 3младший научный сотрудник, 4профессор*

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия*

*E–mail: lenivkin.mv18@physics.msu.ru*

В настоящее время тераностика является инновационной и расширяющейся областью прецизионной медицины. Тераностическое лечение совмещает специфические методы диагностики и терапии, обеспечивая переход от традиционной терапии к персонализированному лечению онкологических заболеваний с учетом уникальных особенностей пациента [1]. Радиофармпрепараты с изотопами рения обладают высоким потенциалом для применения в тераностике благодаря своим радионуклидным характеристикам [2].

На данный момент для наработки медицинских изотопов рения используются реакторные методы. Радиоизотоп 186Re получают в реакции 185Re(*n*, γ)186Re при облучении нейтронами мишени, обогащенной по 185Re [3]. Для получения 188Re используют термохроматографическое выделение из материнского радиоизотопа 188W, который образуется в реакциях двойного нейтронного захвата [186W(*n*, γ), 187W(*n*, γ)188W]. Однако даже при использовании обогащенных мишеней, для получения достаточной для решения задач ядерной медицины удельной активности рения этим способом, необходимо использовать ядерные реакторы с высокой плотностью потока нейтронов. Подобных реакторов в мире насчитываются единицы. Сложность и дороговизна получения медицинских изотопов рения делает актуальной задачу поиска альтернативных каналов их получения.

В представленной работе предлагается исследовать возможность применения ускорителей электронов для получения радиоизотопов рения. Для этого были сделаны предварительные теоретические оценки средневзвешенных по потоку тормозного излучения сечений фотоядерных реакций с использованием программного кода TALYS 1.96 [4], а также было проведено облучение образца оксида осмия тормозным излучением, полученным на разрезном микротроне НИИЯФ МГУ с энергией пучка 55 МэВ.

При расчете теоретических сечений реакций в TALYS 1.96 использовалась модель Ферми-газа [4]. Эта модель рассматривает нуклоны как невзаимодействующие друг с другом частицы, которые формируют возбужденные уровни ядра, находясь в постоянном потенциале. Таким образом, не учитывается энергетическое расщепление компонент гигантского дипольного резонанса с различными изоспинами [5]. Поэтому для (γ, *p*) реакций были рассчитаны выходы реакций с использованием метода преобразования средневзвешенных сечений [6] при полупрямом механизме фотоядерных реакций.

Для оценки интегрального выхода фотоядерных реакций проводилась свертка дифференциальных сечений по тормозному спектру, полученному при моделировании тормозного спектра электронов ускорителей с энергией пучка 55 МэВ в программной среде Geant4 (Таблица).

В эксперименте в течении часа облучалась сборка мишени оксида осмия массой 1.33 г и мониторной мишени тантала. Затем облученные мишени измерялись при помощи полупроводниковых спектрометров Ortec® и Canberra® с детекторами из сверхчистого германия с энергетическим разрешением 1.8–2.0 кэВ по гамма-излучению 1333 кэВ 60Co. Эффективность регистрации гамма-излучения спектрометров определялась с помощью калибровочного источника 152Eu. В полученных гамма-спектрах надежно установлены гамма-переходы, сопутствующие распаду 183Os, 185Os, 191Os, 186Re, 188Re, 189Re, 190Re. Полученные результаты обсуждаются.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-25-00249).

Таблица. Сравнение выходов (γ, *p*) реакций, полученных с использованием TALYS1.96 и метода преобразования средневзвешенных сечений

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Продукт реакции | Реакция | 55 МэВ | |
| YTALYS, мбн | YПРЕОБР, мбн | |
| 185Re | 186Os(γ, *p*) | 0.15408 | 0.83957 | |
| 186Re | 187Os(γ, *p*) | 0.17712 | 0.49721 | |
| 187Re | 188Os(γ, *p*) | 0.15031 | 0.62437 | |
| 188Re | 189Os(γ, *p*) | 0.12986 | 0.34177 | |
| 189Re | 190Os(γ, *p*) | 0.12339 | 0.36520 | |
| 191Re | 192Os(γ, *p*) | 0.10641 | 0.21688 | |

Список литературы

1. S. Jeelani, R. C. Reddy, T. Maheswaran, G. S. Asokan, A. Dany, Theranostics: A treasured tailor for tomorrow // Journal of pharmacy & bioallied sciences 2014 V. 6
2. X. Wang, L. Zhang et al, Flexible use of commercial rhenium disulfide for various theranostic applications // Biomater Sci. 2023 V. 11
3. J. Vucina, H. Ruben. Production and therapeutic use of rhenium-186, 188 - the future of radionuclides // Medicinski pregled 2003 V. 56
4. A. Koning, S. Hilaire, S. Goriely, TALYS-1.96/2.0 Simulation of nuclear reactions, https://www-nds.iaea.org/talys/tutorials/talys\_v1.96.pdf (2021)
5. B. S. Ishkhanov, I. M. Kapitonov. Giant dipole resonance of atomic nuclei. Prediction, discovery and research // Physics-Uspekhi 2021 V. 63
6. V. A. Zheltonozhsky, A. M. Savrasov. Investigation of (γ,p)-reactions on zirconium and molybdenium nuclei // The European Physical Journal 2021 V. 58