

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОТОКА ПО ПРОБЛЕМЕ ПРОИЗВОДСТВА ИЗОТОПОВ ^{99}Mo И ^{99m}Tc ДЛЯ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ

Л.И. Николайчук, В.А. Попов, А.И. Тутубалин, О.В. Кривченко, А.Г. Шепелев
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*
E-mail: shepelev@kipt.kharkov.ua

Проведен анализ публикаций, содержащихся в Базе данных INIS, по проблеме производства изотопов ^{99}Mo и ^{99m}Tc для ядерной медицины. Показаны распределения публикаций по годам, странам, видам и языкам.

ВВЕДЕНИЕ

Современная медицина немыслима без применения радиоизотопов для диагностики и терапии заболеваний [1]. Свыше 90% всех диагностических исследований в мире выполняется с помощью радиоизотопа ^{99m}Tc [2]. В природе этот изотоп отсутствует, его получают при распаде материнского радиоизотопа – генератора ^{99}Mo с периодом полураспада 66 часов. Вследствие распада ^{99}Mo непрерывно получается радиоизотоп ^{99m}Tc , период полураспада которого 6 часов. Через определенные промежутки времени его выделяют физико-химическими средствами и используют для радиоактивной метки во многих радиофармацевтических химических соединениях. В связи с этим очевидно, что для широкого применения методов радиоизотопной диагностики необходимо решение проблемы производства радиоизотопа ^{99}Mo в промышленных масштабах.

Радиоизотопная диагностика, благодаря своим уникальным возможностям, получила широкое применение во всех развитых странах мира. На нужды ядерной медицины расходуется более 50% годового производства радиоизотопов во всем мире. Только в США с использованием радиоизотопов ежегодно производится около 13 млн. диагностических процедур и 100 млн. лабораторных тестов.

Главной причиной, которая сдерживает широкое применение современной радиоизотопной диагностики в медицинской практике клиник многих стран, является проблема производства необходимых медицинских радиоизотопов в нужных количествах.

Основным методом получения изотопа ^{99m}Tc является распад изотопа ^{99}Mo , получаемого облучением высокообогащенного ^{235}U в реакторах с высоким потоком нейтронов [3,4] за счет деления ^{235}U в реакции $^{235}\text{U}(n, f)$ [4,5]. Доля ^{99}Mo в продуктах распада составляет 6,1% от общего количества осколков деления. Более 95% молибдена в мире получают из деления оружейного ^{235}U [4,5,6]. Сечение деления ^{235}U тепловыми нейтронами велико и составляет 600 барн. После облучения урановой мишени ^{99}Mo выделяется из продуктов распада и очищается от других радиоизотопов химическим путем. При этом возникает трудная решаемая в настоящее время проблема захоронения радиоактивных долгоживущих высокотоксичных отходов, продуктов деления ^{235}U . Кроме этого, существует еще такая проблема: использование мишеней из высокообогащенного ^{235}U , что связано с потенциальной опасностью распро-

странения делящегося материала, который может быть использован для несанкционированного изготовления атомного оружия.

Для производства ^{99}Mo в реакторах также можно использовать реакцию нейтронного захвата $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$. Для повышения выхода ^{99}Mo необходимо использовать обогащенный ^{98}Mo , стоимость которого высока. Поэтому очевидны преимущества производства ^{99}Mo методом деления ^{235}U , и оно стало основным способом получения изотопов молибдена в мире [4,5].

Альтернативным источником получения безопасного экологически чистого производства радиоизотопов ^{99}Mo и ^{99m}Tc являются способы получения их с помощью ускорителей заряженных частиц. Известно, что почти все радиоизотопы можно получать на ускорителях заряженных частиц за счет ядерных реакций, которые возникают при бомбардировке этими частицами мишеней из естественных химических элементов. Большинство искусственных радиоизотопов и были получены на ускорителях-циклотронах (циклотронные радиоизотопы).

Некоторые радиоизотопы можно получать на электронных ускорителях. Так, производство ^{99}Mo возможно фотоядерным способом в реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$.

Другим возможным способом получения изотопа ^{99}Mo на ускорителях электронов является реакция деления ^{238}U фотонами $^{238}\text{U}(\gamma, f)$. В работе [6] отмечается, что невозможно сделать однозначный вывод относительно конкурентоспособности этих двух способов. Однако необходимо отметить, что ускоренные электроны непосредственно не принимают участие в ядерных реакциях, поэтому процесс получения радиоизотопов на электронных ускорителях состоит из нескольких этапов. Предварительно необходима конверсия потока электронов в высокоэнергетичные гамма-кванты. Этот двустадийный процесс заметно снижает эффективность производства радиоизотопов на электронных ускорителях [7].

В отличие от электронов протоны и дейтроны непосредственно вызывают ядерные реакции при столкновении с ядрами химических элементов. Изотопы ^{99}Mo и ^{99m}Tc могут производиться в ядерных реакциях $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99m}\text{Tc}$ и $^{100}\text{Mo}(p, 2n)^{99m}\text{Tc}$ на циклотроне [8]. Перспективным процессом получения радиоизотопа ^{99}Mo на мишенях естественного изотопного состава является ядерная реакция захвата нейтрона ядром стабильного изотопа ^{99}Mo при

его бомбардировке ускоренными дейтронами по реакции $^{98}\text{Mo}(d, p)^{99}\text{Mo}$.

В работах [9,10] исследовался процесс образования ^{99}Mo как генератора изотопов технеция. Рассчитано сечение реакции $^{100}\text{Mo}(p, pn)^{99}\text{Mo}$, равное ~100 миллибарн в максимуме, которое хорошо согласуется с экспериментальными значениями. ^{99m}Tc , полученный в этой реакции, имеет высокую радиохимическую и радиоизотопную чистоту. В работах делается вывод, что производство генератора $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$ высокого обогащения и при больших токах ускорителя не является практически серьезной альтернативой обычному способу производства этого медицинского изотопа методом деления урана в реакторе.

Однако, ^{99m}Tc может быть получен на ускорительных установках (например, циклотронах), которые расположены непосредственно в медицинских центрах, что не требует дополнительных затрат для ускоренной доставки их к месту использования. Это является важным обстоятельством, поскольку период полураспада изотопа ^{99m}Tc равен 6 часам.

По сравнению с существующими реакторными методами и технологиями получения генератора ^{99}Mo метод производства его на ускорителях имеет ряд экономических преимуществ, а также сводит к минимуму производство ядерных отходов. В связи с этим особую актуальность приобретают способы производства радиоизотопов ^{99}Mo и ^{99m}Tc на ускорителях.

АНАЛИЗ ПОТОКА ИНФОРМАЦИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ РАДИОИЗОТОПОВ ^{99}Mo И ^{99m}Tc В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ И УСКОРИТЕЛЯХ

С целью выяснения тенденции в производстве радиоизотопов ^{99}Mo и ^{99m}Tc , широко применяемых в ядерной медицине, нами были проанализированы данные о публикациях по проблеме разных способов производства изотопа-генератора $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$.

Проведенный анализ публикаций, введенных странами-членами МАГАТЭ (их более 100) в автоматизированную Базу данных INIS (International Nuclear Information System), созданную в 1971 году, дал возможность проследить тенденции развития производства изотопов ^{99}Mo и ^{99m}Tc в ядерных реакторах и на ускорителях заряженных частиц за последние 40 лет.

Сложность применения большинства радиоизотопов состоит в малом периоде их полураспада. Поэтому их нельзя наработать и транспортировать на большие расстояния. Таким образом, их наработка и применение должны быть совмещены в одном месте. Исключение составляют генераторные радиоизотопы, к которым относится технеций-99m. Этот изотоп получается в процессе распада сравнительно долгоживущего материнского радиоизотопа ^{99}Mo (период полураспада 66 часов).

На Рис.1 показан общий рост публикаций всех стран – членов МАГАТЭ, введенных в Базу данных INIS, по проблемам производства изотопов ^{99}Mo и ^{99m}Tc различными методами за период времени с 1970 по 2010 г.

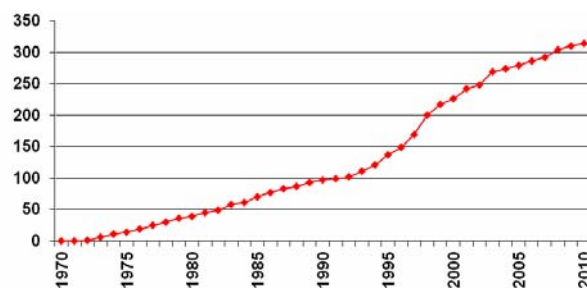


Рис.1. Динамика информационного потока по производству ^{99}Mo и ^{99m}Tc для ядерной медицины

Как видно из Рис.1, число публикаций по данной проблеме неуклонно растет. Особенный рост наблюдается начиная с 1992 г. За этот период (1992-2010 г.) число публикаций возросло практически в три раза. Этот факт свидетельствует о значительно возросших за последние десятилетия потребностях в изотопах ^{99}Mo и ^{99m}Tc для ядерной медицины.

Несомненный интерес представляют сведения о вкладе разных стран в общее число публикаций по вышеуказанной проблеме, а также о типах публикаций и о языках, на которых опубликована эта информация.

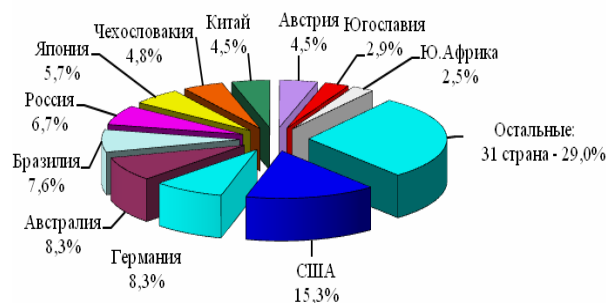


Рис.2. Вклад стран в публикации по производству ^{99}Mo и ^{99m}Tc для ядерной медицины

На Рис.2 представлен вклад различных стран в число публикаций по проблеме производства ^{99}Mo и ^{99m}Tc для ядерной медицины. Из рисунка видно, что лидирующее место по числу публикаций занимают США (15,3 %), далее идут Германия (8,3 %) и Австралия (8,3 %). Немного отстает Россия (6,7 %). Публикации в рассматриваемой области исследований осуществляли 40 стран.

Основными типами публикаций по указанной проблеме, как видно из Рис.3, являются труды конференций (44,7 %), статьи журналов (25,3 %) и отчеты (19,8 %). Это можно рассматривать как свидетельство активно развивающейся области знаний.

Наиболее распространенным языком публикаций по данной проблеме, как видно из Рис.4, является английский язык (65 %). Кроме указанных на Рис.4 языков публикации осуществлялись еще на 11 языках.

Нами проанализировано распределение информации по различным способам производства медицинских радиоизотопов ^{99}Mo и ^{99m}Tc , описанным выше. Эта информация представлена в таблице. Отметим, что всего публикаций – 314, из них 131 посвящены техническим вопросам (изготовление мишеней, радиохимия и т.д.)

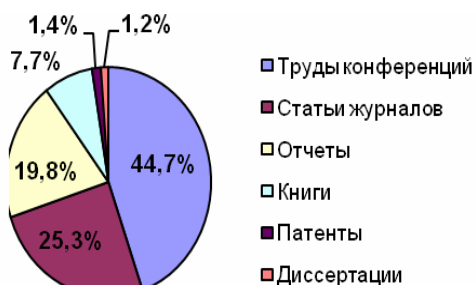


Рис. 3. Распределение публикаций по видам информационных документов

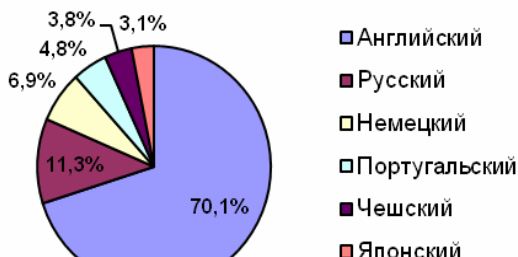


Рис. 4. Распределение публикаций по языкам
Способы получения радиоизотопов ^{99}Mo и $^{99\text{m}}\text{Tc}$

Способ получения (ядерная реакция, установка)	Кол-во публикаций
Продукты деления (ядерные реакторы)	29
Реакции с нейтронами (реакторы для производства изотопов, нейтронные источники)	13
Реакции с протонами (ускорители протонов)	7
Реакции с дейтронами (ускорители дейтронов)	3
Реакции с гамма-излучением (электронные ускорители)	6
Генераторы радиоизотопов (распады ^{99}Nb и ^{99}Mo)	125

Как видно из таблицы, преобладающее число публикаций (42) относится к описанию производства ^{99}Mo и $^{99\text{m}}\text{Tc}$ в ядерных реакторах. Значительно уступает им количество публикаций, описывающих их производство альтернативными методами – на ускорителях заряженных частиц.

ВЫВОДЫ

Известно, что радиоизотопные методы диагностики и лечения различных заболеваний широко используются в современной мировой клинической практике. Анализ введенных в Базу данных INIS публикаций по производству изотопов ^{99}Mo и $^{99\text{m}}\text{Tc}$ для ядерной медицины свидетельствует о неуклонном росте их числа в разных странах, а следовательно, и об актуальности этой проблемы. Дальнейшее развитие радиоизотопной диагностики и терапии связано с увеличением производства изотопов медицинского назначения, в частности, изотопов ^{99}Mo и $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Последний активно используется во всем мире для диагностики органов и систем жизнедеятельности человека [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Ю. Баранов. «Изотопы»: свойства, получение применение. М.: Наука «Физмат. Лит». 2005, с.328.
2. R.G. Bennet, I.D. Christian, D.A. Petti, et al. // *Nuclear Technology*. 1999, v.126, p.102-121.
3. *Medical Isotope Production Without Highly Enriched Uranium*: Uranium Committee on Medical Isotope Production Without Highly Enriched Uranium, National Research Council. Washington, the national academies press DC. 2009, 220p.
4. *Making Medical Isotopes*: Report of the Task Force on Alternatives for Medical-Isotope Production / Editors Ann Fong, Timothy I. Meyer, Krista Zala. Vancouver, TRIUMF, University of British Columbia. 2008, p.94.
5. Frank N. von Hippel, Laura H. Kahn // *Science and Global Security*. 2006, v.14, p.151-162.
6. И.С. Гук, С.Г. Кононенко, Ф.А. Пеев // *Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля»*. 2010, №916, в.3/47, с.177-126.
7. П.А. Демченко, В.А. Воронко, Н.Г. Шулика и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Серія «Ядерно-фізическіе ісследованія»*. 1997, в.4,5 (31,32), т.11, с.168-170.
8. M.C. Lagunas-Solar. *Appl. Radiat. Isot.* 1991, 42 (7), p.643-657.
9. R.M. Lambrecht, T. Sekine. *IEAE-TEHDOC-1065*. 1999, p.87-112.
10. M.C. Lagunas-Solar. *IEAE-TEHDOC-1065*. 1999, p.75-85.

Статья поступила в редакцию 18.11.2011 г.

ANALYSES ON PRODUCTION OF ^{99}Mo AND $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ISOTOPES FOR NUCLEAR MEDICINE

L.I. Nikolaichuk, V.A. Popov, A.I. Tutubalin, O.V. Krivchenko, A.G. Shepelev

The paper gives the analysis of INIS Database-contained publications on the problem of ^{99}Mo and $^{99\text{m}}\text{Tc}$ isotope production for nuclear medicine. Distributions of publications in time (years), country, language and types are presented.

АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПОТОКУ З ПИТАНЬ ВИРОБНИЦТВА ІЗОТОПІВ ^{99}Mo ТА $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ДЛЯ ЯДЕРНОЇ МЕДИЦИНИ

L.I. Ніколайчук, В.О. Попов, А.І. Тутубалін, О.В. Кривченко, А.Г. Шепелєв

Проведено аналіз публікацій, які містяться у Базі даних INIS, з питань виробництва ізоотопів ^{99}Mo та $^{99\text{m}}\text{Tc}$ для ядерної медицини. Наведено розподіл публікацій за роками, країнами, видами та мовами.