

УДК 621.039.554

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА УСКОРИТЕЛЯХ И РЕАКТОРАХ

**А.Н. Довбня, Н.П. Дикий, О.В. Немашкало, А.И. Тутубалин,
В.Л. Уваров, А.Г. Шепелев, Б.И. Шраменко, Л.Д. Юрченко**

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина
e-mail: bshram@kipt.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 7 декабря 2003г.

В обзоре дан наукометрический анализ состояния проблемы производства и использования радионуклидов (РН). Особое внимание уделено вопросу получения РН на ускорителях заряженных частиц в сопоставлении с получением их в реакторах. Сопоставлены сведения об использовании РН для ядерной медицины, сельского хозяйства и технических применений. В дополнение к данным, имеющимся в обзорах на эту тему, нами использована информация, содержащаяся в Международной Базе Данных МАГАТЭ "International Nuclear Information System" (INIS) за период с 1970 по 2003г. Анализ проведен на массиве, состоящем из более 16000 источников информации, с использованием около 30 ключевых слов и понятий. Приведены сведения о публикациях по получению РН разными методами – в реакторах, ускорителях тяжелых частиц (ионов, протонов) и ускорителях электронов, их разделению и очистке, сведения о распределении публикаций по областям применения, годам, странам и видам публикаций, сделаны заключения о тенденциях развития исследований по рассмотренной проблеме.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радионуклиды, ускорители, реакторы, ядерная медицина, науковедение.

Радионуклиды (РН) в настоящее время находят применение в большинстве стран мира в таких областях как медицина, техника и сельское хозяйство, причем сфера их использования непрерывно расширяется.

Состояние проблемы получения РН, их применения в ядерной медицине, промышленности, научных исследованиях и тенденции их развития довольно детально рассмотрены в работах [1-3]. Из приводимой ниже таблицы 1, опубликованной в обзорной статье [1] видно, что к 2000г. различные установки по производству РН имелись примерно в 50 странах. Большинство таких установок располагалось в Западной Европе.

Табл. 1. Основные установки по производству радионуклидов в мире и их распределения по регионам [1]

Тип установок	Число установок
Ядерные реакторы:	
Исследовательские реакторы	75
Высокопоточные реакторы	6
Быстрые реакторы	2
Атомные электростанции	<10
Ускорители:	188
Специализированные циклотроны для производства медицинских радионуклидов	48
Циклотроны для ПЭТ	130
Другие ускорители	10
Установки по разделению	21
Установки по производству тяжелых стабильных изотопов	9
Число стран-производителей радионуклидов:	50
Западная Европа	17
Восточная Европа и бывшие республики СССР	8
Северная Америка	3
Азия и Средний Восток	12
Остальной мир	10

В настоящее время спрос на РН растет, особенно в странах Азии, поэтому можно ожидать роста числа производящих РН установок. Нейтрон-избыточные РН производятся в ядерных реакторах. В Японии, Южной Корее, Индии и Китае строятся и вводятся в эксплуатацию новые ядерные реакторы, однако они являются многоцелевыми и не смогут полностью удовлетворить растущие потребности в РН. Для производства других РН требуются специализированные установки, в том числе сильноточные ускорители тяжелых частиц и электронов.

С целью выяснения тенденций в производстве РН на современном этапе в настоящей работе нами проанализированы данные о публикациях по проблемам получения и применения РН, введенных странами-членами МАГАТЭ в автоматизированную Базу Данных INIS (International Nuclear Information System). Машинный анализ проводился по тридцати ключевым словам и понятиям. Считается общепринятым, что публикации (за исключением закрытых источников) всегда адекватно отражают состояние исследований, относящихся к

чением закрытых источников) всегда адекватно отражают состояние исследований, относящихся к соответствующей научной или технической проблеме. Проведенный нами анализ публикаций дал возможность проследить тенденции развития производства и использования РН в различных областях за последние 30 лет.

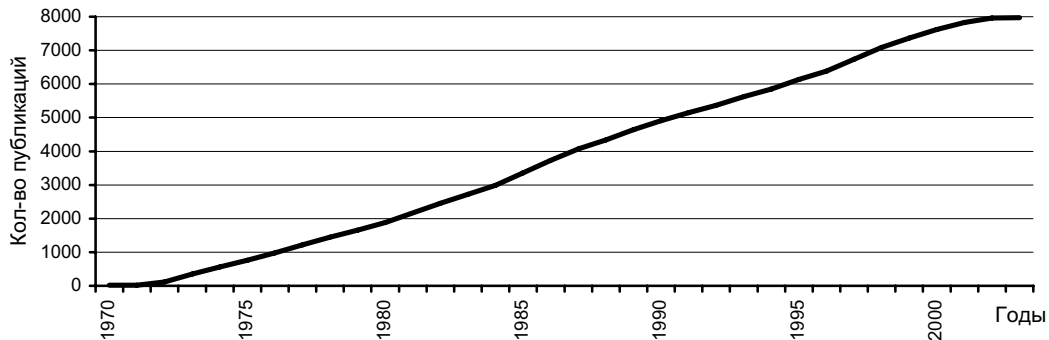


Рис.1. Кумулятивный рост количества публикаций по производству радионуклидов

На рис.1 показан рост общего числа публикаций всех стран-членов МАГАТЭ по проблемам производства РН за указанный период времени. Представляют интерес также сведения (см. рис.2) об относительном вкладе различных стран в общее число публикаций (А) и о видах публикаций (Б). Видно, что основными информационными источниками являются статьи и доклады на конференциях.

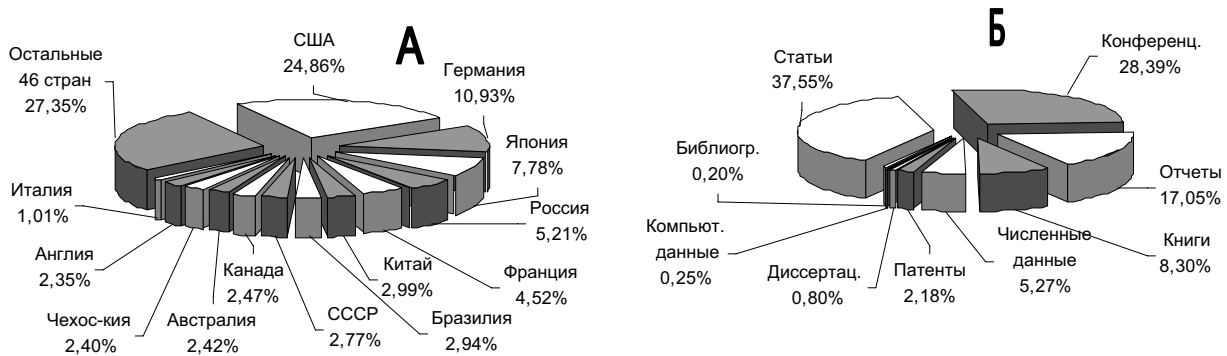


Рис.2. Интегральный вклад стран в публикации по производству радионуклидов (А) и виды публикаций (Б)

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОНУКЛИДОВ

Ниже приведены сопоставительные данные о числе публикаций по производству РН на ускорителях заряженных частиц и реакторах. Из данных, приведенных на рис.3, следует, что число публикаций по производству РН разными методами нарастает, причём, за последние 10 лет количество работ по применению ускорителей ионов и протонов возросло в 1,5 раза, реакторов – в 1,6 раза, а ускорителей электронов в 2,3 раза. Хотя “реакторный” метод производства РН преобладает, производство их на ускорителях заряженных частиц всех типов (протонов, ионов и электронов) к настоящему времени составляет более $\frac{2}{3}$ от производства в реакторах. Заметим, что основными типами публикаций по производству РН являются отчеты, труды конференций и статьи.

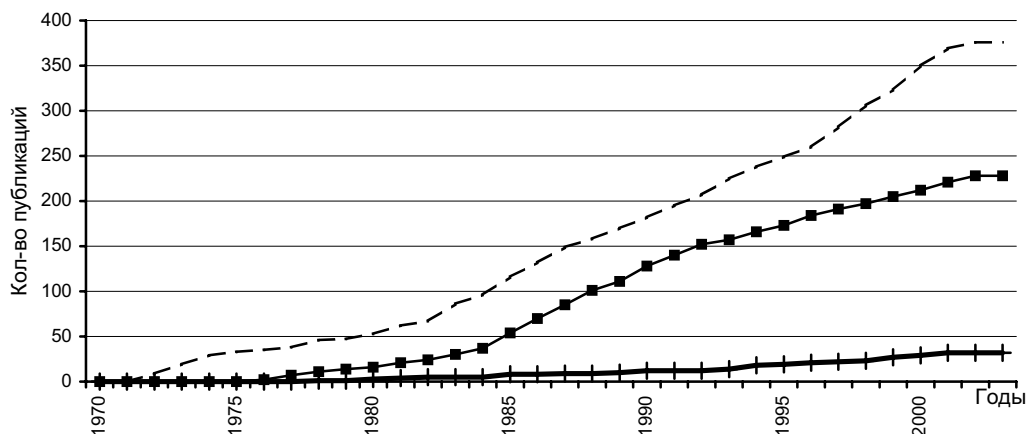


Рис.3. Кумулятивный рост количества публикаций по производству радионуклидов на ускорителях-электронов (1), ионов и протонов(2) и реакторах(3)

Вышеприведенные данные наглядно показывают, что исследования по применению ускорителей заряженных частиц в производстве РН неуклонно расширяются, хотя число публикаций, содержащих информацию по непосредственному применению ускорителей электронов, составляет достаточно скромный вклад в общее число публикаций по этому направлению: в 1993г., например, этот вклад составил всего 9%. Это может быть объяснено тем, что большинство линейных ускорителей электронов на энергию 20÷25 МэВ до последнего времени имели низкие значения среднего тока электронов и использовались, в основном, в качестве терапевтических установок для лечения онкологических заболеваний.

Ситуация существенно изменилась с вводом в строй высокоточных ускорителей электронов на энергию 20÷25 МэВ со средним током 0,8÷1 мА [4-14]. Такие ускорители с мощностью пучка 10÷20 кВт позволяют использовать их в качестве инструмента для производства различных РН, включая ^{99m}Tc , с приемлемым уровнем удельной и общей активности, а также ультракороткоживущие изотопы ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , и ^{18}F для позитрон-эмиссионной томографии (ПЭТ).

Серьёзной проблемой, осложняющей процесс получения РН в реакторах, является наработка сопутствующих радиоактивных отходов (РАО). Например, при производстве ^{99m}Tc ($^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$) реакторным способом получение ^{99}Mo активностью 1 Кюри сопровождается «вынужденной» наработкой сопутствующих РАО активностью до 50 Кюри.

Поэтому важнейшим преимуществом технологии производства РН на линейных ускорителях электронов является возможность обеспечения наиболее благоприятных условий экологической чистоты их производства. Практически «чистая» технология получения изотопа ^{99m}Tc по схеме $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$ достигается на линейном ускорителе электронов путём использования обогащённых мишеней, содержащих только изотоп ^{100}Mo . Метод термического разделения ^{99m}Tc и ^{99}Mo совместно с рециклированием, т.е. многократным использованием мишени из ^{100}Mo [15], позволяет обеспечить высокую эффективность и экологическую безопасность такого метода наработки изотопа ^{99m}Tc .

Указанные выше обстоятельства проявились в том, что число публикаций по применению ускорителей электронов для получения РН возросло за последние 10 лет более, чем в 2 раза, и составило к 2003 году около 14% общего числа публикаций по применению ускорителей заряженных частиц для производства РН.

Следует отметить, что заметный вклад в улучшение ситуации с использованием ускорителей электронов для производства радиоизотопов внесён работами сотрудников НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ [16-26].

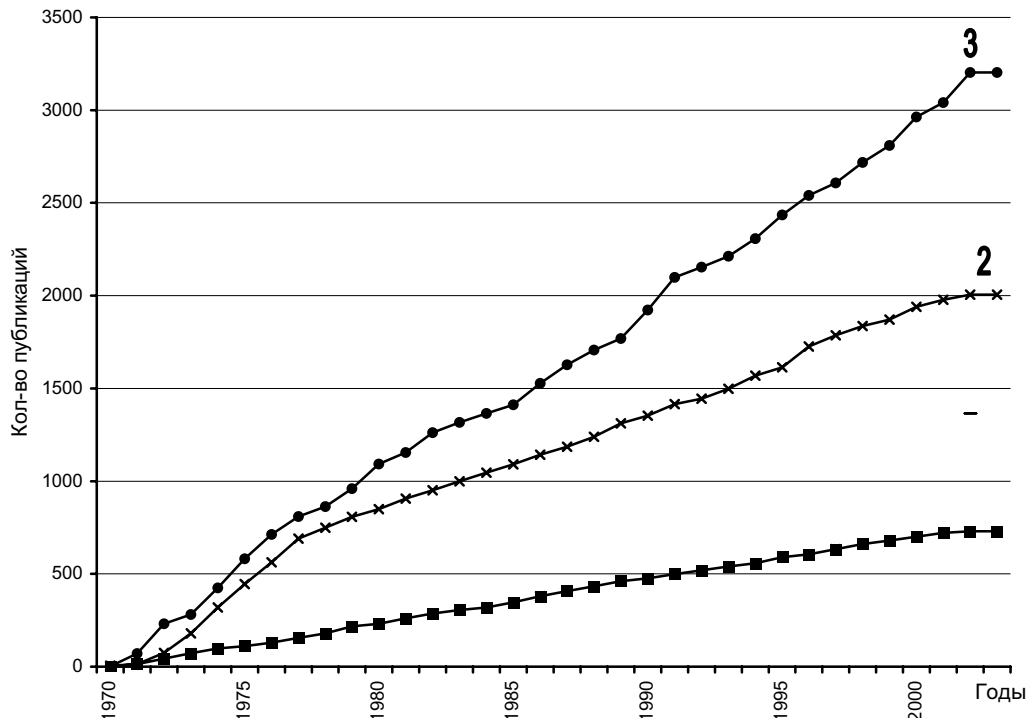


Рис.4. Кумулятивный рост числа публикаций по применению радионуклидов в технике (1), медицине (2) и сельском хозяйстве (3)

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ

Интересно рассмотреть результаты информационного анализа применения РН в различных областях. Характерно, что первые применения РН имели место в технике (контроль толщины изделий, контроль уровня жидкости и т.п.). Из рис.4 видно, что если в начале 70-х годов количества публикаций о применении РН в раз-

личных областях были сравнимы, то последние 30 лет характеризуются ростом применения РН в медицине (в 1,3 раза) и, особенно, в сельском хозяйстве (в 1,5 раза). Это свидетельствует о преобладании интереса мирового сообщества к проблемам охраны здоровья и производства продуктов питания. При этом основные типы публикаций о применениях РН – статьи, труды конференций и книги.

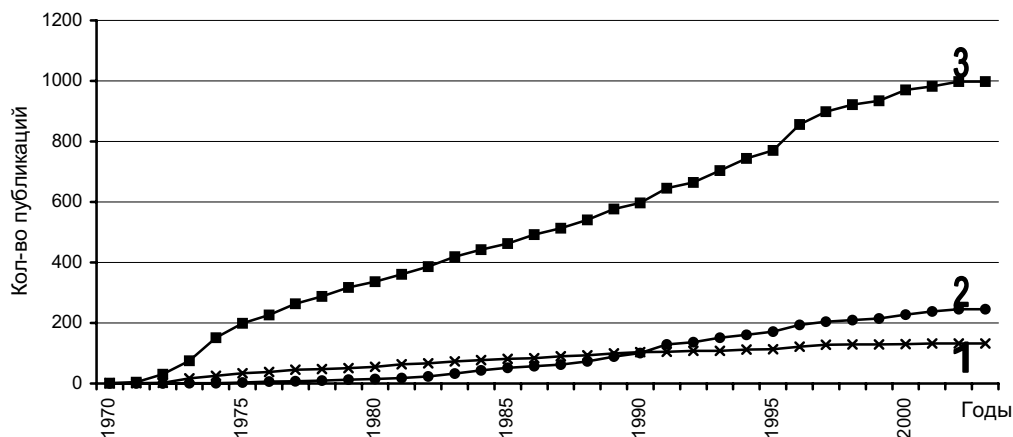


Рис.5. Кумулятивный рост количества публикаций по некоторым направлениям применения радионуклидов в медицине: гамма-камеры (1), томография (2), меченые соединения (3)

Так как основой применения РН в ядерной медицине являются фармацевтические препараты, то, естественно, что преобладающая часть публикаций посвящена проблеме создания меченых соединений (о чём свидетельствуют данные, приведенные на рис.5). Это можно объяснить продолжением разработок по снижению радиационной нагрузки при лечении злокачественных заболеваний, усилению действия радиации на клеточном уровне, сенсбилизации организма для усиления действия радиации и т.п. Можно отметить и рост использования брахиотерапии с применением ^{125}I , ^{103}Pd , ^{67}Cu и др. За последнее десятилетие применение РН в томографической диагностике превышает их использование в диагностике на основе гамма-камер. Рост публикаций с использованием томографов можно объяснить расширением их диагностических возможностей путём использования короткоживущих изотопов, которые не используются при диагностике с помощью гамма-камер. По данным работы [1], для проведения диагностики с использованием позитрон-эмиссионных томографов (ПЭТ) к 2000г. в мире уже имелось 150 центров, оснащенных 200 установками ПЭТ.

Основными типами публикаций по применению РН в медицине также являются статьи, труды конференций и книги.

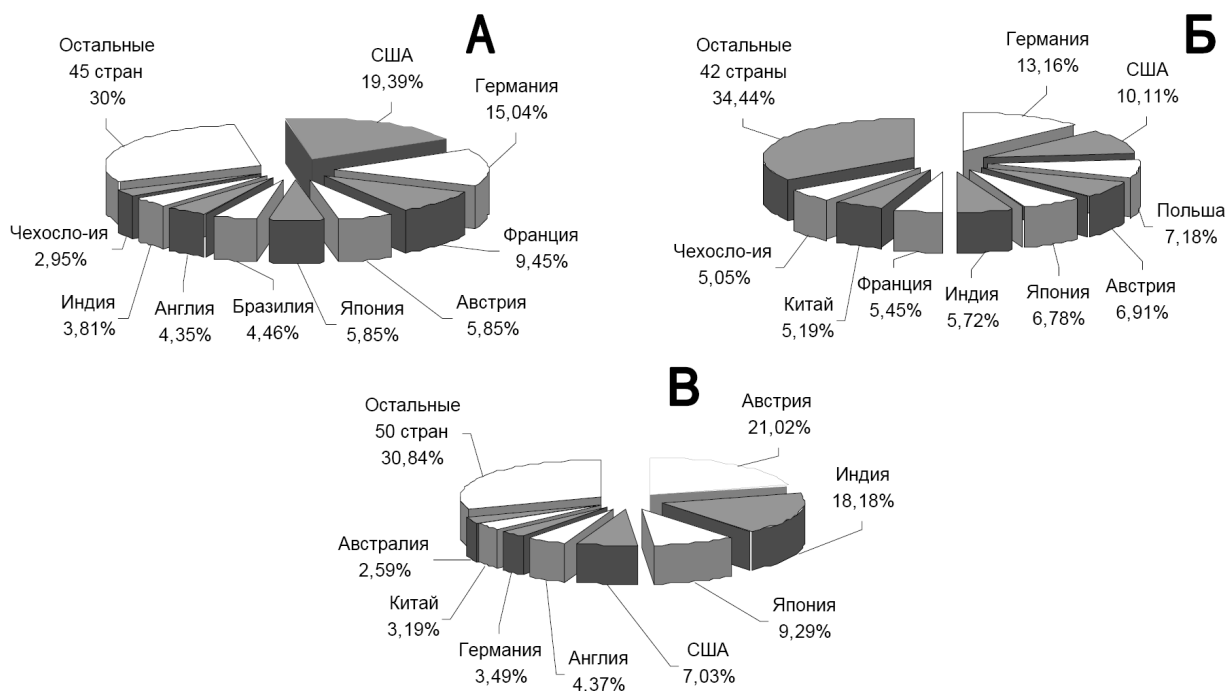


Рис.6. Интегральный вклад стран в публикации по применению радионуклидов в медицине (А), технике (Б) и сельском хозяйстве (В)

Сведения, приведенные на рис. 6 показывают вклад различных стран в число публикаций по применению РН в медицине, технике и сельском хозяйстве. Если по применению РН в медицине лидирующее место занимают США и Германия, то применение РН в технике характеризуется более равномерным распределением по различным странам. В публикациях по применению РН в сельском хозяйстве лидирующее положение занимают Австрия и Индия, а Япония и США занимают третье и четвертое места, соответственно. Лидирующее положение Австрии можно объяснить заметным вкладом публикаций от имени МАГАТЭ, которое регулярно проводит международные конференции по этой проблеме.

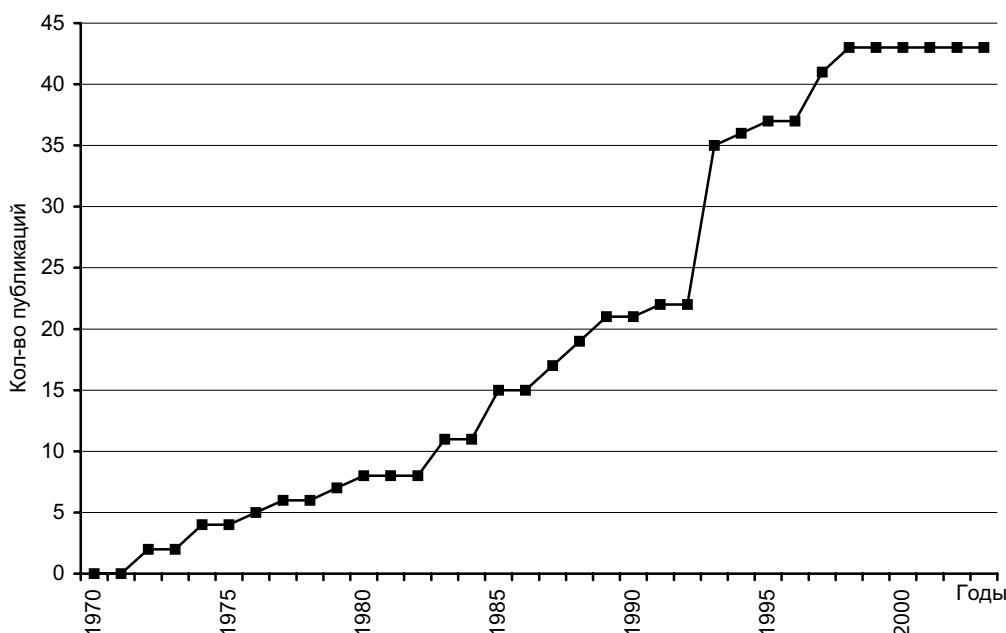


Рис.7. Кумулятивный рост публикаций стран по производству радионуклидов, их разделению и химической очистке

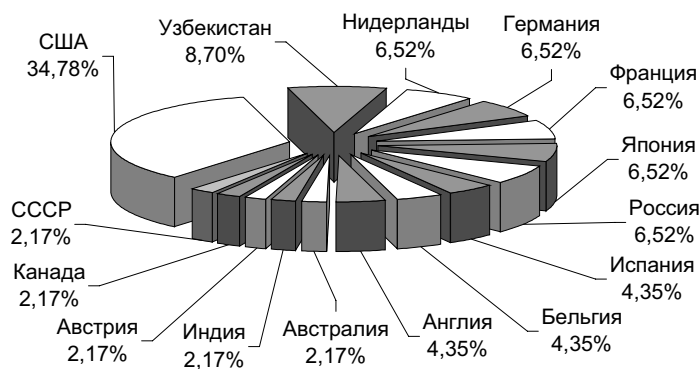


Рис.8. Интегральный вклад стран в публикации по производству радионуклидов, их разделению и химической очистке

Естественно, что общая картина производства РН, их разделения и химической очистки характеризуется также ростом числа публикаций, в особенности за последние 10 лет (см. рис.7). Здесь на первом месте США, на втором – Узбекистан, а Нидерланды, Германия и Франция занимают соответственно третье, четвертое и пятое место (см. рис.8).

Наиболее распространенным языком публикаций по всем рассмотренным проблемам является английский.

ВЫВОДЫ

1. Анализ введенных в Базу Данных INIS публикаций по производству и применению РН в различных областях свидетельствует о неуклонном росте их числа, а следовательно, об актуальности этой проблематики.
2. Наиболее широкое применение РН находят в сельском хозяйстве и медицине, что свидетельствует о повышенном интересе мирового сообщества к проблемам производства продуктов питания и охраны здоровья.
3. Доля публикаций по производству РН для ядерной медицины с помощью ускорителей заряженных частиц, и, в частности, ускорителей электронов, за последнее десятилетие заметно возросла, приблизившись количественно к числу публикаций, связанных с производством РН в реакторах. Несмотря на то, что в Украине

функционирует ряд энергоблоков атомных электростанций, возможности производства РН на этих реакторах практически отсутствуют. Отсутствуют также предприятия по переработке отработавшего топлива этих реакторов, в процессе которой могут извлекаться некоторые РН, в частности, ^{90}Sr и ^{137}Cs . Учитывая также то обстоятельство, что некоторые европейские страны (Бельгия, Германия) сворачивают использование реакторов как источников энергии, а США не планируют на ближайшие годы его расширение, представляется что применение ускорителей электронов для наработки РН, как альтернатива “реакторному методу”, будет обретать ещё большую значимость в обозримом будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е. Бертел. Производство радионуклидов: состояние и тенденции // *Атомная техника за рубежом*.—2003.— №8.— С.31-33.
2. E. Bertel. Beneficial uses and production of isotopes: Status and trends // *Nuclear News*.—1999.—V.42.—№9.—P.30-32.
3. Beneficial uses and production of isotopes-2000 Update, NEA, ISBN 92-64-18417-1. code 662000201P1, p.84, tabl.36, charts 5.
4. Т.А. Катунина, О.Е. Колясник, Н.С. Марченков и др. О возможности получения изотопно-модифицированных соединений на линейном ускорителе электронов «Факел» // *ВАНТ. Серия: Общая и ядерная физика*.—1987.—Вып.4(40).—Москва.—С.53-54.
5. К.И. Балашов, В.Ф. Герасимов, В.С. Зенкевич и др. Оптимизация условий получения йода-123 на линейном ускорителе электронов “Факел” // *ВАНТ. Серия: Общая и ядерная физика*.—1987.—Вып.4(40).— Москва.— С.49.
6. Н.В. Завьялов, И.А. Иванов, В.И. Иньков и др. Линейный ускоритель электронов ЛУ-50 ВНИИЭФ как источник тормозного излучения для исследования радиационной стойкости материалов при поглощенных дозах до 10^9 рад // *ВАНТ. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*.—1992.—Вып.1(58).—2(59).—Харьков.— С.126-128.
7. A.N. Dovbnya, M.I. Ayzatsky, Ye.Z. Biller et al. Electron Linacs Based Radiation Facilities of Ukrainian National Science Center “KIPT” // *Bull. of Amer. Phys. Soc.*—1997.—V.42.—№3.—P.1391.
8. V.L. Uvarov, N.P. Dikiy, A.N. Dovbnya et al. Electron Accelerator Based Production of Technetium-99m for Nuclear Medicine // *Ibid.*—1997.—V.42.—P.123.
9. В.В. Ганн, А.Н. Довбня, В.И. Дубинко и др. Применение линейных ускорителей электронов в радиационной физике твердого тела и радиационных технологиях // *ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования*.—1997.—Вып.2,3(29,30).—Харьков.—Т.2.—С.157.
10. Н.В. Завьялов, Ю.А. Хохлов, В.И. Иньков и др. Промышленный линейный ускоритель электронов ЛУ-10-20. // *ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования*.—1997.—Вып.2,3 (29,30).—Харьков.—Т.1.— С.39-41.
11. М.А. Воинов, А.И. Герасимов, В.С. Гордеев и др. Комплексы на базе сильноточных линейных индукционных ускорителей и импульсных ядерных реакторов // *ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования*.—1999.— № 3.— С.82-84.
12. К.И. Antipov, M.I. Ayzatsky, Yu.I. Akhchurin et al. Electron linacs in NSC KIPT: R&D and application // *ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования*.—2001.—№ 1(37).— С.40-47.
13. N.P. Dikiy, A.N. Dovbnya, V.L. Uvarov et al. Use of accelerators in geology, medicine, isotopes production and atomic power energetics // *ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования*.—2001.— № 1(37).— С.26-35.
14. А.Н. Довбня, Г.Д. Пугачев, Д.Г. Пугачев и др. Получение мощных фотонных пучков для наработки медицинских радионуклидов // *ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования*.—1997.—Вып.2, 3(29,30).—Т.2.—Харьков.— С.154-156.
15. R.G. Bennet, J.D. Christian, D.A. Petti et al. A system of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ production based on distributed electron accelerators and thermal separation // *Nuclear Tehnology*.—1999.—Vol.126.—P.102-121.
16. Н.П. Дикий, А.Н. Довбня, Е.П. Медведева и др. Опыт наработки на ЛУЭ технеция-99m для ядерной медицины // *ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования*.—1997.—Вып.2,3(29,30).— Т.2.—Харьков.— С.165-167.
17. Н.П. Дикий, А.Н. Довбня, С.В. Марехин и др. Об эффективности производства медицинских и биофизических изотопов с использованием ускорителя электронов // *ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования*.—1999.— № 3.— С.91-92.
18. А.Н. Довбня, А.С. Задворный, Б.И. Шраменко. Производство короткоживущих радионуклидов на электронном ускорителе для ПЭТ // *ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования*.—1999.— № 3.— С.105-106.
19. А.М. Довбня, М.П. Дикий, А.С. Задворный и др. Проект Харківського регіонального Центру позитрон-емісійної томографії // *Український радіологічний журнал*.—1999.— № 3.— С.316.
20. Г.Л. Бочек, А.Н. Довбня, А.С. Задворный и др. Нарботка короткоживущих изотопов на ускорителе ЭПОС ННЦ ХФТИ для позитрон-эмиссионной томографии // *ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования*.—1999.— № 3.— С.66-67.
21. Н.П. Дикий, А.Н. Довбня, Ю.В. Ляшко и др. Получение медицинских изотопов при помощи ускорителей электронов // *ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования*.—2000.— № 2.— С.58-61.
22. А.Н. Довбня, Н.П. Дикий, А.С. Задворный и др. Исследование возможности получения изотопов ^{184}Re , ^{186}Re , ^{188}Re на линейных ускорителях электронов ННЦ ХФТИ // *Вісник Харківського університету*.—2001.— № 510.— С.87-90.
23. Б.И. Шраменко, А.В. Торговкин. Расчет оптимальных параметров конвертора тормозного излучения для производства радионуклидов медицинского назначения // *Вісник Харківського університету*.—2002.— № 569.— С.79-82.
24. Н.П. Дикий, А.Н. Довбня, В.Л. Уваров. Основы технологического цикла по производству $^{99\text{m}}\text{Tc}$ на ускорителе электронов. *Тезисы XVIII международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. Алушта, Крым, 2003, с.195.
25. В.С. Скуридин, Е.В. Чибисов, Е.А. Нестеров и др. Получение технеция 99m из молибденовой мишени, облученной на ускорителе электронов. *Тезисы XVIII международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. Алушта, Крым, 2003, с.222.
26. А.Н. Довбня, Б.И. Шраменко, А.В. Торговкин. Оптимизация условий облучения мишеней для производства радионуклидов. *Тезисы XVIII международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. Алушта, Крым, 2003, с.194.

**THE PRESENT STATE OF THE ART OF PRODUCING VARIOUS-PURPOSE
RADIONUCLIDES AT ACCELERATORS AND REACTORS**

**A.N. Dovbnya, N.P. Dikiy, O.V. Nemashkalo, A.I. Tutubalin,
B.L. Uvarov, A.G. Shepelev, B.I. Shramenko, L.D. Yurchenko**

*National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkov, Ukraine
e-mail: bshram@kipt.kharkov.ua*

The review presents scientific analysis of the current status of radionuclide (RN) production and application. A particular attention was paid to the problem of RN production at charged particle accelerators in comparison with RN production at reactors. The data on the use of RN for nuclear medicine, agriculture and engineering are compared. In addition to the evidence found in the surveys devoted to the topic, we have used the information contained in the IAEA International DataBase "International Nuclear Information System" (INIS) for the period from 1970 to 2003. Analysis was performed with the data files include more than 16000 sources of information, about 30 key words and notions were used. The paper contains the information about RN production by different methods - at reactors, accelerators of heavy particles (ions, protons), and electron accelerators, RN separation and refining, as well as, the information about distribution of publications in the fields of application, by years, countries and kinds of publications. The conclusions about trends of research on the problem under consideration are drawn.

KEY WORDS: radioisotopes, accelerators, reactors, nuclear medicine, science of science.