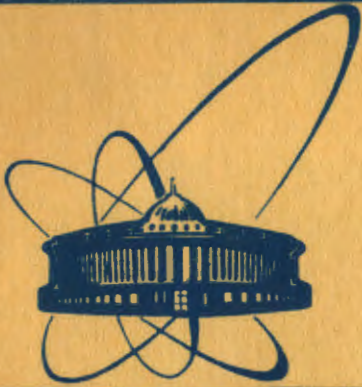


82-20



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

1906/82

19/4-82

18-82-20

И.Звара

ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ  $^{123}\text{J}$   
ДЛЯ РАДИОИЗОТОПНОЙ ДИАГНОСТИКИ  
НА УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ

1982

В медицинской практике широко используют препараты, содержащие радиоактивный нуклид  $^{131}\text{I}$ , прежде всего при обследовании щитовидной железы и почек, а также других органов. Однако, так как  $^{131}\text{I}$  имеет довольно большой период полураспада, 8 суток, и испускает  $\beta^-$ -частицы /см. табл.1/, диагностическая процедура приводит к небезопасной дозе облучения. Так, например, при сканировании щитовидной железы, когда вводится  $^{131}\text{I}$  активностью около 0,5 мКи, ее ткани получают дозу ~100 рад /1/. С особенно большим риском связано такое обследование органов младенцев.

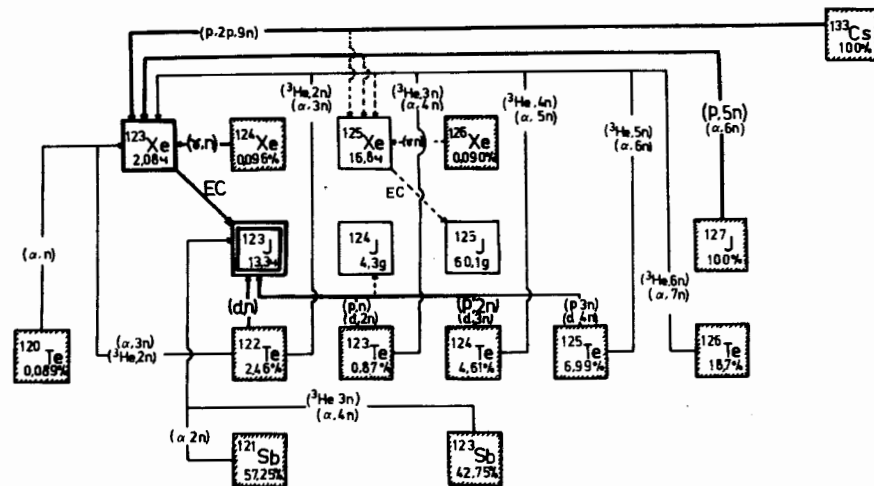
С середины семидесятых годов в ряде стран быстро развивается производство другого радиоактивного изотопа иода -  $^{123}\text{I}$ , призванного заменить  $^{131}\text{I}$  в диагностике /1-3/.  $^{123}\text{I}$  имеет период полураспада 13,3 часа, распадается электронным захватом и испускает практически только  $\gamma$ - и рентгеновское излучение /табл.1/. Поэтому радиационная доза при обследовании снижается почти в сто раз. В 1980 г. во всем мире уже около 0,5 млн. диагностических процедур было выполнено с применением короткоживущего  $^{123}\text{I}$  /3/, то есть суммарная активность выпускаемых препаратов должна достигать сотен кюри в год.

Нуклид  $^{123}\text{I}$  в настоящее время получают в ядерных реакциях под действием протонов с энергией в несколько сотен МэВ, ускоренных на синхроциклотронах, а также протонов, дейтронов и ядер  $^3\text{He}$  или  $^4\text{He}$  с энергией в несколько десятков МэВ, ускоренных на циклотронах. На рисунке схематически показаны практически все возможные пути получения  $^{123}\text{I}$  на этих установках. Отметим, что в ряде случаев предпочитают синтезировать  $^{123}\text{Xe}$  /  $T_{1/2} = 2,1$  часа / и извлекать  $^{123}\text{I}$  как продукт его распада.

Показателем высокого качества препаратов  $^{123}\text{I}$  является малое содержание в них  $^{124}\text{I}$  и  $^{125}\text{I}$ . Изотоп  $^{124}\text{I}$ , испускающий  $\gamma$ -излучение более высокой энергии /табл.1/ и позитроны, ухудшает разрешение сканограмм. Он же и долгоживущий  $^{125}\text{I}$ , испускающий малопроникающее излучение, увеличивают радиационную дозу.

Из рисунка видно, что  $^{123}\text{I}$  может быть получен из  $^{124}\text{Xe}$  с помощью реакции ( $\gamma, n$ ), вызываемой жесткими  $\gamma$ -квантами /4/. Возможности этого способа для выработки достаточного для практики количества  $^{123}\text{I}$  до сих пор не рассматривали. Ниже будет показано, что использование существующих ускорителей электро-

Изотоп	$^{123}\text{J}$	$^{124}\text{J}$	$^{125}\text{J}$	$^{131}\text{J}$
$T_{1/2}$	13,3 ч	4,18 сут	60,0 сут	8,05 сут
Вид распада	EC	EC/ $\gamma$ %, $\beta^+$ /23%/	EC	$\beta^-$
Энергия излучения, кэВ /интенсивность, % распада/	$E_{\beta^+}$ = 529/1/ 159/63/ КХ 28/87/	$E_{\beta^+}$ = 2140/11/ 1530/12/ $E_{\beta^+}$ = 1691/11/ 723/10/ 603/63/ 511/46/ КХ 28/56/ и др.	$E_{\beta^+}$ = 36/7/ КХ 28/150/	$E_{\beta^-}$ = 606/89/ 334/7/ и др. $E_{\beta^-}$ = 723/2/ 637/7/ 364/82/ 284/6/ и др.



нов /энергия электронов более 20 МэВ/ - микротронов и линейных ускорителей, которые являются источниками жесткого / $^{11}\text{тор-мозного}$ / электромагнитного излучения, может решить проблему создания сети территориальных центров по производству  $^{123}\text{J}$  для медицинской диагностики.

#### СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА $^{123}\text{J}$

При производстве  $^{123}\text{J}$  для медицинской диагностики в настоящее время используют лишь немногие из возможностей, показанных на рисунке. В табл.2 приведены некоторые сведения, взятые нами из опубликованной литературы [2,5-7]. Мы обращали внимание прежде всего на те примеры, когда производство ведется регулярно на протяжении нескольких лет. Видно, что за одно облучение, длящееся, как правило, несколько часов, получают не более 1 Ки  $^{123}\text{J}$ .

Отметим прежде всего некоторые достоинства и недостатки используемых способов.

В принципе, на ускорителях типа ТРИУМФа может быть получен  $^{123}\text{J}$  много большей активности, чем указано в табл.2, так как толщину мишени можно увеличить в несколько раз при сохранении эффективного сечения реакции. С другой стороны, в процессе облучения образуются нежелательные побочные радионуклиды большой активности, в тысячи раз превышающей активность  $^{123}\text{Xe}$ - $^{123}\text{J}$ .

В частности, на 1 Ки  $^{123}\text{J}$  возникает примерно 20 Ки газообразных изотопов  $\text{Xe}^{135}$ . В результате значительно усложняется конструкция мишенного узла /необходимо предусмотреть дистан-

Производство изотопа-123 на некоторых ускорителях

Город, страна ускоритель	Бомбард. частицы E	Реакция	Мишень	Активность в поставках из одного облучения милликюри х	Ссылка
Ванкувер, Канада синхроциклотрон ТРИУМФ	P, МэВ 482 10 мкА	$^{137}\text{Cs} (p, 2p9) ^{123}\text{Xe}$ $^{123}\text{Xe} \xrightarrow{\text{EC}} ^{123}\text{J}$	0,9кг мет. Cs Ø 70мм х 100мм	1000	/5/
Карлсруэ, ФРГ циклотрон ХХ	P, МэВ 26 15 мкА	$^{124}\text{Te} (p, 2n) ^{123}\text{J}$	450мг/см <sup>2</sup> TeO <sub>2</sub> обогащение <sup>124</sup> Te 96,5%	400	/2/
Дэйвис, Калифорния, США, изохр.циклотр.	P, МэВ 66 20 мкА	$^{127}\text{J} (p, 5) ^{123}\text{Xe}$ $^{123}\text{Xe} \xrightarrow{\text{EC}} ^{123}\text{J}$	расплав.	200-300	/6/
Россендорф, ГДР циклотрон У-120	P, МэВ 14 10 мкА	$^{122}\text{Te} (d, n) ^{123}\text{J}$	70мг/см <sup>2</sup> TeO <sub>2</sub> 3 см <sup>2</sup> обогащение <sup>122</sup> Te 87%	30 рххх	/7/

х Наша оценка по неполным данным соответствующих статей.

хх Примерно такие же показатели получены в Манитобе, Канада /8/, а также на нескольких ускорителях в США.

ххх Опытное производство.

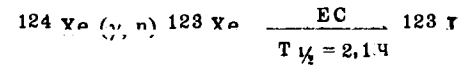
+ А также Харуэлл, Англия.

ционное управление и операции с мишенью, требуется мощная биологическая защита/. Возникает проблема удаления отходов с большой активностью. Ускорители протонов на энергии в сотни МэВ являются дорогостоящими установками. Близкие к ТРИУМФу ускорители работают в ЛИЯФ<sup>/9/</sup> под Ленинградом и в ЛЯП ОИЯИ. На этих синхроциклотронах предполагается наладить производство <sup>123</sup>J /10,15/.

Среди циклотронных методов реакция  $^{127}\text{J} (p, 5n) ^{123}\text{Xe} \xrightarrow{\text{EC}} ^{123}\text{J}$  дает препарат наиболее высокого качества, не содержащий заметных примесей <sup>124</sup>J и <sup>125</sup>J. В странах-участницах ОИЯИ протоны необходимой энергии в настоящее время имеются на циклотроне У-240 ИЯФ УССР<sup>/11/</sup> в Киеве. Наибольшее распространение получили циклотроны У-120 и У-150, на которых можно реализовать реакции  $^{122}\text{Te} (d, n) ^{123}\text{J}$  и  $^{124}\text{Te} (p, 2n) ^{123}\text{J}$ . В этих случаях для мишеней требуются разделенные изотопы с обогащением, по-видимому, больше 90%. Облучение дейтронами дает препарат, содержащий несколько процентов <sup>124</sup>J /по активности/. Выход нежелательных нуклидов других элементов более чем на порядок превышает выход <sup>123</sup>J.

#### ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ <sup>123</sup>J НА УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ

Обсудим теперь возможности ускорителей электронов. <sup>123</sup>J можно получить в результате превращений



В соответствии с общими закономерностями /12,13/ эффективное сечение этой пороговой /E<sub>γ</sub> ≥ 10 МэВ/ реакции достигает максимума при E<sub>γ</sub> = 15 МэВ и равно примерно 450 мб.

Ширина кривой возбуждения на половине высоты равна 5 МэВ. Электроны с энергией E<sub>e</sub> при торможении в какой-либо мишени генерируют γ-кванты с энергетическим распределением в пределах от E<sub>γ</sub> = 0 до E<sub>γ</sub> = E<sub>e</sub>. Выход "тормозных" γ-квантов при E<sub>e</sub> = 20-50 МэВ достигает 50% от числа электронов, однако квантов с E<sub>γ</sub> > 10 МэВ - лишь несколько процентов. Точных формул для расчета спектра и углового распределения тормозного излучения нет, поэтому выход <sup>123</sup>J можно только оценить. Приближенные расчеты показывают, что энергия электронов должна быть больше 20 МэВ, чтобы получить достаточный выход жестких квантов, но не выше 50 МэВ /с ростом E<sub>e</sub> растет относительный выход нежелательных ядерных реакций/. Оптимальным диапазоном является, по-видимому, E<sub>e</sub> = 25-35 МэВ. В этом случае "эффективное сечение" реакции /в расчете на один ускоренный электрон/ будет 1-2 мб и выход <sup>123</sup>J может превысить 200 мкКи/мкАч.г <sup>124</sup>Xe. Эта оценка согласуется с данными работы /4/. Существующие микро-

троны /в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, Праге и др./ дают токи электронов около 20 мкА, поэтому за 8 часов облучения 10 г  $^{124}\text{Xe}$  можно получить до 200 мКи  $^{123}\text{J}$ . Серийно производятся линейные ускорители с током порядка 100 мкА  $^{14}$ , которые соответственно могут вырабатывать  $^{123}\text{J}$  активностью до 0,5 Ки за рабочую смену.

Отметим некоторые принципиальные технические и экономические преимущества использования электронных ускорителей для производства  $^{123}\text{J}$ :

- продукт будет содержать лишь малые примеси  $^{124}\text{J}$  и  $^{125}\text{J}$ ;
- затраты на биологическую защиту при обработке мишени минимальны;
- ускорители электронов в несколько раз дешевле циклотронов, они компактны, эксплуатационные затраты низки.

К недостаткам способа можно отнести, пожалуй, лишь то, что стоимость мишени /10 г  $^{124}\text{Xe}$  высокого обогащения/ в несколько раз выше, чем стоимость циклотронных мишеней из разделенных изотопов  $\text{Te}$ , хотя, по-видимому, не превысит 30000 рублей. В то же время относительные потери в одном цикле регенерации  $\text{Xe}$  могут быть существенно ниже, чем в случае  $\text{Te}$ .

За счет реакции  $^{126}\text{Xe}(\gamma, n)$   $^{125}\text{Xe}$  /в мишени неизбежно содержится  $^{126}\text{Xe}$  / продукт будет иметь примесь  $^{125}\text{J}$  /см. рисунок/, который образуется путем распада  $^{125}\text{Xe}$  /  $T_{1/2} = 17$  ч; ЕС/. Если в мишени содержатся даже равные количества  $^{124}\text{Xe}$  и  $^{126}\text{Xe}$ , активность  $^{125}\text{J}$  по окончании облучения длительностью в несколько часов составит примерно 0,3% от активности  $^{123}\text{J}$ , и этот процент соответственно падает с уменьшением относительного содержания  $^{126}\text{Xe}$ . Выход  $^{124}\text{J}$  по реакции  $^{124}\text{Xe}(\gamma, pn)$  при  $E_\gamma < 35$  МэВ мал. Поэтому препарат  $^{123}\text{J}$ , полученный на ускорителях электронов, должен быть по качеству сравним с лучшими коммерчески доступными в настоящее время препаратами. Требования по содержанию в мишени более тяжелых изотопов  $\text{Xe}$  при обогащении  $^{124}\text{Xe}$  выполняются автоматически.

Из изложенного следует, что линейные ускорители электронов, а также микротроны в проблеме производства  $^{123}\text{J}$  могут успешно конкурировать с такими дорогостоящими установками, как синхротрон, ТРИУМФ и др. По-видимому, только на базе электронных ускорителей можно достаточно быстро создать сеть региональных центров по производству  $^{123}\text{J}$ . Централизованное снабжение нуклидом с  $T_{1/2} = 13$  ч многих медицинских учреждений на большой территории экономически целесообразно и вряд ли технически возможно. Следует отметить, что наряду с  $^{123}\text{J}$  на таких установках можно производить и другие короткоживущие изотопы для медицинской диагностики.

Автор приносит благодарность академику Г.Н.Флерову за инициирование и обсуждение настоящей работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Application of Iodine-123 in Nuclear Medicine. Proc. Conf. Rockville, May 19-20, 1975. HEW Publication (FDA), 76-8033, Rockville, 1976.
2. Assmus K.H. et al. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1979, NS-26, p.2265.
3. Lamb J.F. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1981, NS-28, p.1916.
4. Levin V.I. et al. Radiochem.Radioanal.Lett., 1981, 49, p.111.
5. Vincent J.S. et al. J.Radioanal.Chem., 1981, 65, p.11.
6. Jungerman J.A., Lagunas Solar M.C. J.Radioanal.Chem., 1981, 65, p.31.
7. Beyer G.J. et al. Radiochem.Radioanal.Lett., 1981, 47, p.151.
8. Billinghamurst M.W. et al. J.Radioanal.Chem., 1981, 65, p.57.
9. Абросимов Н.К. и др. В кн.: Труды 7 Всесоюзн. совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т.2, с.75.
10. Adelbich M. et al. Int.J.Appl.Radiat.Isot., 1980, 31, p.163; Зайцева Н.Г. и др. ОИЯИ, Р6-81-178. Дубна, 1981.
11. Kolotiy V.V. et al. Proc. 6th Int.Cyclotron Conf., Vancouver, 1972.
12. Matsumoto K. et al. Nucl.Instr. Meth., 1978, 157, p.567.
13. Lutz G.J. Anal.Chem., 1971, 43, p.93.
14. Вахрушин Ю.П. и др. В кн.: Труды 7 Всесоюзн. совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т.1, с.23.
15. Alekseev E.G. et al. Radiochem.Radioanal.Lett., 1978, 36, p.133; Алексеев Е.Г. и др. Препринт ЛИЯФ, 726, Л., 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 января 1982 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д1,2-9224	IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1975.	3 р. 60 к.
Д-9920	Труды Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1976.	3 р. 50 к.
Д9-10500	Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна, 1976.	2 р. 50 к.
Д2-10533	Труды X Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Баку, 1976.	3 р. 50 к.
Д13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
Д17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
Д6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Звара И. 18-82-20  
Возможности получения  $^{129}\text{J}$  для радиоизотопной диагностики на ускорителях электронов

На основе расчетов и опубликованных данных показано, что на пучках тормозного излучения многих имеющихся микротронов и линейных ускорителей можно получать достаточные количества  $^{129}\text{J}$  с помощью процесса  $^{124}\text{Xe}(\gamma, n)^{129}\text{Xe} \xrightarrow{\text{EC}} ^{129}\text{J}$ . Стоимость облучения низка, выход нежелательных радиоизотопов очень мал.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Zvara I. 18-82-20  
Possibilities of  $^{129}\text{J}$  Production for Radioisotope Diagnostics Using Electron Accelerators

It is shown on the basis of calculations and some published data, that bremsstrahlung beams of many existing microtrons and linear accelerators can produce enough of  $^{129}\text{J}$  via the process  $^{124}\text{Xe}(\gamma, n)^{129}\text{Xe} \xrightarrow{\text{EC}} ^{129}\text{J}$ . The bombardment cost is low, the yield of radioisotope impurities is very small.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.