

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

88-911

P6-88-911

Н.Г.Зайцева, О.Кнотек, А.Ковалев, П.Микец,  
Э.Рураж, В.А.Халкин, В.А.Агеев\*,  
А.А.Ключников\*, Л.А.Кузина\*, А.Ф.Линев\*

ФУНКЦИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ  
РЕАКЦИЙ  $^{113,114}\text{прир}\text{-Cd}(p,xn)^{111}\text{In}$   
И ВЫХОДЫ  $^{111}\text{In}$   
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНЕЙ КАДМИЯ  
ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ  $\sim 65$  МэВ

Направлено в "International Journal Applied  
Radiation and Isotopes"

---

\* Институт ядерных исследований АН УССР, Киев

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время радионуклид  $^{111}\text{In}$  относится к группе пяти циклотронных радионуклидов, играющих важную роль в ядерной медицине / $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ /. Было показано, что  $^{111}\text{In}$  может быть успешно использован при локализации и определении опухолей, в исследованиях лимфатической системы, для получения многочисленных меченых соединений<sup>1/</sup>.

Для целого ряда in-vivo исследований медленных биологических процессов, которые необходимо наблюдать в течение 1-3 дней после введения препарата,  $^{111}\text{In}$  имеет благоприятные характеристики распада. Его период полураспада равен 2,83 дн., 100%-й электронный захват при распаде приводит к возбужденному состоянию  $^{111}\text{Cd}$ , которое снимается каскадом гамма-лучей с энергией 171,3 и 245,4 кэВ и интенсивностью 90,3% и 94%. Соответствующие усредненные энергии /и интенсивности/ конверсионных электронов низки: 144,6 кэВ /10%/ и 218,6 кэВ /6%/. Энергия Оже-электронов равна ~20 кэВ. Энергии гамма-лучей  $^{111}\text{In}$  находятся в оптимальной области для фотопиков, регистрируемых коммерческими гамма-камерами и скеннерами либо по отдельности, либо суммарно /184 фотона на 100 актов электронного захвата/. В последнем случае достигается лучшая статистика или более быстрое накопление данных.

Принципиальные способы получения  $^{111}\text{In}$ , как это иллюстрирует табл.1, включают прямые и косвенные реакции его образования. Этот список не исчерпывает всех возможностей, например,  $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn} \rightarrow ^{111}\text{In}$ <sup>2/</sup>.

Для расчета Q-величин были использованы значения атомных масс, взятые из работы<sup>3/</sup>. При определении необходимой лабораторной энергии налетающих частиц для заданных ядерных реакций рассчитывались их энергетические пороги. Другой важный фактор - кулоновский барьер и эффективный барьер, объясняющие туннельный эффект<sup>4/</sup>, высоты которых также приведены в табл.1. Рассмотрение энергетических порогов и барьеров различных ядерных реакций показывает, что  $^{111}\text{In}$  может быть получен на компактных циклотронах с энергией частиц  $\leq 20$  МэВ, но некоторые реакции требуют более высокоэнергетических машин.

Обычно  $^{111}\text{In}$  получают при облучении мишеней серебра  $\alpha$ -частицами в реакции  $^{109}\text{Ag}(\alpha, 2n)^{111}\text{In}$ <sup>5-11/</sup>, мишеней кадмия

Таблица 1

Пороги реакции и кулоновские барьеры для реакций, приводящих к образованию  $^{111}\text{In}$ 

№ п/п	Реакция	Природное содержание (%)	Q (МэВ)	Порог реакции (МэВ)	Высота кулоновского барьера (МэВ)	Эффективный кулоновский барьер (МэВ)
I	$^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$	12,75	-1,62	1,63	8,49	4,11
2	$^{112}\text{Cd}(p,2n)^{111}\text{In}$	24,07	-11,02	11,10	8,47	4,10
3	$^{113}\text{Cd}(p,3n)^{111}\text{In}$	12,26	-17,56	17,72	8,45	4,09
4	$^{114}\text{Cd}(p,4n)^{111}\text{In}$	28,86	-26,60	26,80	8,43	4,09
5	$^{110}\text{Cd}(d,n)^{111}\text{In}$	12,36	3,10	0	8,15	5,09
6	$^{111}\text{Cd}(d,2n)^{111}\text{In}$	12,75	-3,85	3,92	8,13	5,08
7	$^{109}\text{Ag}(^3\text{He},n)^{111}\text{In}$	48,65	6,55	0	15,52	10,92
8	$^{109}\text{Ag}(d,2n)^{111}\text{In}$	48,65	-14,03	14,50	15,17	10,71
9	$^{112}\text{Sn}(p,2n)^{111}\text{In}$ $^{111}\text{Sn} \xrightarrow{752} ^{111}\text{Sn} \xrightarrow{33, \beta^+} ^{111}\text{In}$ $^{111}\text{Sn} \xrightarrow{35M} ^{111}\text{In}$	0,95	-17,06	17,21	8,82	4,27
10	$^{114}\text{Sn}(p,4n)^{111}\text{In}$ $^{111}\text{Sn} \xrightarrow{111} ^{111}\text{Sn} \xrightarrow{111} ^{111}\text{In}$	0,65	-35,10	35,41	8,78	4,26
11	$^{115}\text{Sn}(p,5n)^{111}\text{In}$ $^{111}\text{Sn} \xrightarrow{111} ^{111}\text{Sn} \xrightarrow{111} ^{111}\text{In}$	0,34	-42,65	43,02	8,76	4,25
12	$^{116}\text{Sn}(p,6n)^{111}\text{In}$ $^{111}\text{Sn} \xrightarrow{111} ^{111}\text{Sn} \xrightarrow{111} ^{111}\text{In}$	14,24	-52,21	52,66	8,74	4,24
13	$^{117}\text{Sn}(p,7n)^{111}\text{In}$ $^{111}\text{Sn} \xrightarrow{111} ^{111}\text{Sn} \xrightarrow{111} ^{111}\text{In}$	7,57	-59,15	59,65	8,72	4,23
14	$^{118}\text{Sn}(p,8n)^{111}\text{In}$ $^{111}\text{Sn} \xrightarrow{111} ^{111}\text{Sn} \xrightarrow{111} ^{111}\text{In}$	24,01	-68,47	69,05	8,70	4,22
15	$^{110}\text{Cd}(^3\text{He},2n)^{111}\text{In}$ $^{111}\text{Sn} \xrightarrow{111} ^{111}\text{In}$	12,39	-5,62	5,77	15,82	11,13

дейтронами в реакциях  $^{110}\text{Cd}(d,n)^{111}\text{In}$ ,  $^{111}\text{Cd}(d,2n)^{111}\text{In}$  /6,10-12/ или протонами в реакциях  $^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$  и  $^{112}\text{Cd}(p,2n)^{111}\text{In}$  /5,6,13-15/ Выходы  $^{111}\text{In}$  в ядерных реакциях на серебре гораздо ниже, чем из мишеней кадмия, облученных протонами /см.табл.6/. Однако  $^{111}\text{In}$ , полученный из Cd мишеней, содержит на конец облучения также и другие нуклиды индия:  $^{109}\text{In} /T_{1/2} = 4,3 \text{ ч}/$ ,  $^{110}\text{In} /T_{1/2} = 4,9 \text{ ч}/$  и  $^{114m}\text{In} /T_{1/2} = 49,5 \text{ дн.}/$ . Последний нуклид, имеющий основные гамма-лучи следующих энергий /кэВ/ и интенсивностей %/: 191,6 /16,7/; 558 /3,6/ и 725,2 /3,5/, заметно увеличивает радиационную дозу для пациента: доза от 1 мКи  $^{111}\text{In}$  в 80 раз меньше, чем от 1 мКи  $^{114m}\text{In}$  /15/. Уровень примеси  $^{114m}\text{In}$  в препарате, получаемом из облученного протонами Cd, меняется от 0,003% /14/ до 3% /5/ от активности  $^{111}\text{In}$ . Этот уровень зависит от степени обогащения материала мишени и вклада от соответствующих ядерных реакций. То же имеет место и при облучении дейтронами, когда загрязнения от  $^{114m}\text{In}$  в ряде случаев достигают 6%.

Облучение серебра  $^3\text{He}$  и  $\alpha$ -частицами приводит к образованию  $^{111}\text{In}$  без следов  $^{114m}\text{In}$ . Однако реакция  $^{109}\text{Ag}(^3\text{He},n)^{111}\text{In}$  не подходит для получения  $^{111}\text{In}$  из-за слишком низкого выхода, ~2 мКи/мкА-ч на конец облучения /5,16/.

Сравнительное исследование перечисленных путей получения  $^{111}\text{In}$  на компактных медицинских циклотронах показывает, что наиболее высокий выход  $^{111}\text{In}$  получается в реакции  $^{112}\text{Cd}(p,2n)^{111}\text{In}$  с высокообогащенным  $^{112}\text{Cd}$  /5/.

Для того, чтобы выбрать наилучшие условия для получения  $^{111}\text{In}$ , требуется информация о функциях возбуждения реакций образования  $^{111}\text{In}$  и побочных продуктов, а также об их выходах из толстых мишеней /13,16-25/. Такие данные известны не для всех реакций, которые приводят к образованию  $^{111}\text{In}$ . В частности, до настоящего времени нет такой информации для реакций  $^{113,114}\text{Cd}$  с высокоэнергетическими протонами  $E_p > 30 \text{ МэВ}$ , прямой путь получения  $^{111}\text{In}$ , табл.1/.

Исследованию этих реакций и разработке метода отделения  $^{111}\text{In}$  от кадмия посвящено настоящее исследование.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### А. Мишени и облучение

Сечения  $\text{Cd}(p,xn)\text{In}$  реакций определяли методом стопки фольг. Этот метод позволяет исследовать функции возбуждения каждого типа реакций и выбрать оптимальный энергетический интервал для получения искомого продукта с минимальным количеством примесей.

Таблица 2

Изотопный состав /%/ мишеней Cd

Изоотоп \ Мишень	прир. Cd	$^{113}\text{Cd}$	$^{114}\text{Cd}$
$^{106}\text{Cd}$	1,25	0,01	0,01
$^{108}\text{Cd}$	0,89	0,01	0,01
$^{110}\text{Cd}$	12,5	0,12	0,10
$^{111}\text{Cd}$	12,8	0,12	0,11
$^{112}\text{Cd}$	24,1	1,98	0,34
$^{113}\text{Cd}$	12,2	95,8±0,3	0,28
$^{114}\text{Cd}$	28,7	2,47	98,9±0,1
$^{116}\text{Cd}$	7,5	0,21	0,27

Были использованы стопки металлических фольг природного и обогащенного кадмия. Металлический кадмий, обогащенный изотопами  $^{113}\text{Cd}$  и  $^{114}\text{Cd}$ , получен из Государственного фонда стабильных изотопов СССР. Изотопный состав материала мишеней приведен в табл. 2.

Стопка состояла из 23÷25 пронумерованных дисков диаметром 10 мм, вырезанных из фольг толщиной ~0,13 г/см<sup>2</sup> для  $^{113}\text{Cd}$  и  $^{114}\text{Cd}$  и 0,24 г/см<sup>2</sup> для природного кадмия. Для облучения собиралась стопка чередующихся друг с другом дисков  $^{113}\text{Cd}$  и  $^{114}\text{Cd}$  общей толщиной ~6,8 г/см<sup>2</sup> и стопка дисков из природного Cd толщиной ~6,3 г/см<sup>2</sup>.

Мишени облучались выведенным пучком протонов с энергией  $63\pm 1$  МэВ в течение 0,5 ч на изохронном циклотроне У-240 в Институте ядерных исследований АН УССР. Поглощение энергии протонов каждым диском Cd рассчитывалось по данным таблиц <sup>28/</sup>. Интенсивность протонного пучка ограничивали несколькими сотнями наноампер для избежания локального перегрева Cd / $T_{\text{пл}} = 321^\circ\text{C}$ / и его испарения. В качестве мониторинговой реакции для определения интенсивности протонного пучка, проходящего через мишень, служила реакция  $^{27}\text{Al}(p, 3pn)^{24}\text{Na}$ , сечение которой для  $E_p = 65$  МэВ равно 10 мб <sup>27/</sup>.

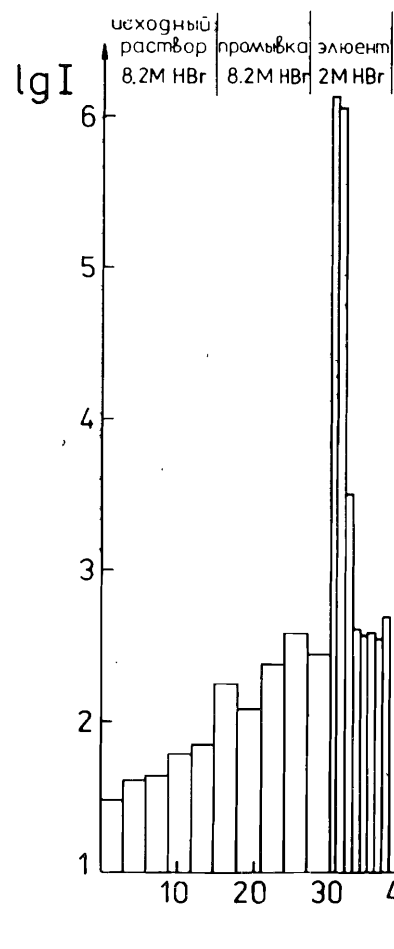
Для облучения стопку фольг помещали в держатель мишени, вставляемый в блок, охлаждаемый водой. После облучения мишени транспортировали в тяжелом свинцовом контейнере в радиохимическую лабораторию ОИЯИ. Работа с мишенью начиналась через ~50 ч

после конца облучения, за это время полностью распались короткоживущие радионуклиды.

#### Б. Измерения и анализ результатов

Измерения активности каждого диска Cd из мишенной сборки образцов проводили с помощью гамма-спектрометра, состоящего из Ge(Li)-детектора /объем 40 см<sup>3</sup>, разрешение 1,2 кэВ на линии  $E_\gamma = 122$  кэВ  $^{57}\text{Co}$ / и 4096-канального анализатора, соединенного с ЭВМ ЕС-1010. Эффективность детектора определяли с помощью набора стандартных источников / $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ /. Радиоактивные нуклиды в облученных образцах идентифицировали по энергиям соответствующих фотопиков. Активность каж-

дого диска определяли по результатам серии измерений /5÷8 раз/ в интервале от 60 до 500 ч после конца облучения. Такой длительный интервал измерения позволил достоверно определить примесь  $^{114}\text{mIn}$ . Обработку измеренных гамма-спектров проводили по программе ЭТАП <sup>28/</sup>, полученные значения активностей использовали для расчета сечений реакций образования и выходов нуклидов индия.



#### В. Радиохимическое выделение индия из облученных мишеней кадмия

Метод отделения радиоиндия в состоянии без носителя от макроколичеств облученного кадмия был разработан на основе данных о различии коэффициентов распределения ионов индия и кадмия между катионитом типа Дауэкс

Рис. 1. Гистограмма элюирования радиоактивного индия в состоянии без носителя из колонки с Дауэкс-50x4 раствором 2 М HBr.

50x4 и растворами бромистоводородной кислоты в зависимости от ее концентрации <sup>129</sup>. Облученный металлический кадмий растворяли в горячей 8 М НВr, полученный раствор пропускали через колонку с Дауэкс 50x4 /Br<sup>-</sup>-форма/. В соответствии с величинами K<sub>D</sub> ионов Ag<sup>+</sup>, Cd<sup>2+</sup> и In<sup>3+</sup> в виде комплексных бромидных анионов [InBr<sub>4</sub>]<sup>-</sup>, равных соответственно <1, <1 и ~80, ионы индия сорбировались на смоле, а кадмий и возможные примеси радиоактивных нуклидов серебра оставались в растворе. Для полного удаления следов Cd колонку тщательно промывали концентрированной НВr. Радиоиндий вымывали из колонки раствором 2 М НВr /рис.1/. Химический выход индия был равен ~90%. Радионуклидную чистоту проверяли, измеряя гамма-спектр препарата, выделенного из облученного кадмия через 5 дн. после конца облучения. В спектре были видны гамма-линии, принадлежащие только <sup>111</sup>In/171 и 245 кэВ и суммарный пик от их совпадения при измерении детектором 417 кэВ/ и <sup>114m</sup>In /190 кэВ/.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### А. Экспериментальные функции возбуждения

Сечения реакций <sup>113</sup>Cd(p,3n)<sup>111</sup>In, <sup>114</sup>Cd(p,4n)<sup>111</sup>In и <sup>114</sup>Cd(p,n)<sup>114m</sup>In были определены в зависимости от энергии падающих протонов. Полученные результаты приведены в табл.3 и 4 и на рис.2 и 3. Величины представляют среднеарифметические значения нескольких измерений. Ошибки измеренных сечений и выходов оценены в ±20%. Они определяются ошибками статистики счета, измерений эффективности регистрации гамма-лучей Ge(Li)-детектором, геометрии измерений, данных распада, определения толщины фольг Cd, энергетических потерь протонов, времени облучения и ошибками, связанными с мониторингом пучка протонов.

Известно, что функции возбуждения характеризуются такими параметрами, как максимальное значение сечения реакций, его положение в зависимости от энергии, значение его ширины на половине высоты. Измерения показывают, что реакция <sup>113</sup>Cd(p,3n)<sup>111</sup>In имеет σ<sub>макс</sub> = 682 мб при E<sub>p</sub> = 32 МэВ и E<sub>1/2 h<sub>макс</sub></sub> = 14 МэВ в интервале 24÷38 МэВ; реакция <sup>114</sup>Cd(p,4n)<sup>111</sup>In имеет σ<sub>макс</sub> = 500 мб при E<sub>p</sub> = 42 МэВ и E<sub>1/2 h<sub>макс</sub></sub> = 17 МэВ в интервале 35÷52 МэВ.

Эти данные для указанных реакций получены впервые.

Как видно, начальная энергия изученных реакций (p, xn) находится в хорошем согласии с величиной энергетического порога реакций, а измеренные функции возбуждения, согласно

Сечения <sup>113</sup>Cd(p,3n)<sup>111</sup>In -реакции и выходы <sup>111</sup>In и <sup>114m</sup>In для тонких мишеней как функция энергии протонов

Таблица 3

№ образцов	Энергия протонов (МэВ)		Сечение образования <sup>111</sup> In (мб)	Выход <sup>111</sup> In (мкКи/мкА-ч)	Выход <sup>114m</sup> In (мкКи/мкА-ч)
	вход/выход	середина			
I	63,4-62,7	63,0	78	I22	
2	61,8-61,1	61,5	78	I27	
3	60,3-59,5	59,9	82	I38	
4	58,6-57,8	58,2	85	I44	
5	56,9-56,1	56,5	92	I43	
6	55,2-54,4	54,8	101	I55	
7	53,5-52,6	53,0	102	I72	
8	51,6-50,7	51,2	111	I85	
9	49,7-48,8	49,3	I22	I99	0,05
10	47,8-46,9	47,3	I38	224	
11	45,9-44,9	45,4	I59	254	0,06
12	43,8-42,8	43,3	I86	311	0,06
13	41,6-40,6	41,1	245	411	0,09
14	39,4-38,3	38,8	326	539	0,14
15	37,1-36,0	36,6	461	725	0,12
16	34,9-33,6	34,2	606	1005	0,29
17	32,3-31,0	31,7	682	1143	0,27
18	29,7-28,4	29,0	629	1045	0,31
19	26,9-25,3	26,1	518	868	0,30
20	23,8-22,3	23,0	263	409	0,18
21	20,5-18,7	19,6	37	64	0,18
22	16,6-14,4	15,5	14	23	0,51
23	12,0-9,2	10,6	3,0	5	0,40
24	5,8	3,3	4,0	7	0,03

Таблица 4

Сечения  $^{114}\text{Cd}(p, 4n)^{111}\text{In}$ ,  $^{114}\text{Cd}(p, 4n)^{114m}\text{In}$  реакций и выходы  $^{111}\text{In}$  и  $^{114m}\text{In}$  для тонких мишеней как функция энергии протонов

№ образцов	Энергия протонов (МэВ)		Сечение образования $^{111}\text{In}$ (мб)	Выход $^{111}\text{In}$ (мкКи/мкА-ч)	Сечение образования $^{114m}\text{In}$ (мб)	Выход $^{114m}\text{In}$ (мкКи/мкА-ч)
	вход/выход	середина				
I	62,7-61,8	62,3	119	208	8	0,8
2	61,1-60,3	60,7	129	210	8	0,8
3	59,5-58,6	59,0	142	244	9	0,8
4	57,8-56,9	57,3	160	279	9	1,0
5	56,1-55,2	55,6	178	308	9	0,9
6	54,4-53,5	54,0	207	366	12	1,2
7	52,6-51,6	52,1	257	459	11	1,1
8	50,7-49,7	50,2	309	548	10	1,0
9	48,8-47,8	48,3	367	638	11	1,1
10	46,9-45,9	46,3	451	773	11	1,1
11	44,9-43,8	44,3	486	864	12	1,2
12	42,8-41,6	42,2	500	881	15	1,5
13	40,6-39,4	40,0	462	814	14	1,4
14	38,3-37,1	37,7	385	651	16	1,6
15	36,0-34,9	35,4	243	406	15	1,4
16	33,6-32,3	33,0	98	166	18	1,8
17	31,0-29,7	30,4	22	37	22	2,1
18	28,4-26,9	27,6	10	17	26	2,6
19	25,3-23,8	24,6	8	14	29	2,8
20	22,3-20,5	21,4	6	10	38	3,7
21	18,7-16,6	17,6	5	6	90	9,1
22	14,4-12,0	13,2	3	8	178	17,2
23	9,2-5,8	7,5	1	2	39	3,9

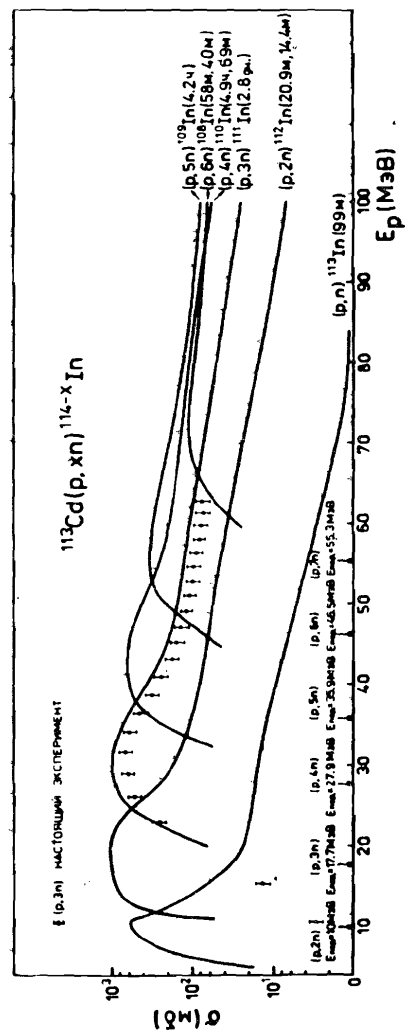


Рис. 2. Измеренные сечения и теоретические функции возбуждения  $^{113}\text{Cd}(p, xn)\text{In}$  реакций, рассчитанные по программе ALICE. Стрелки на шкале энергий указывают теоретические значения энергетических порогов реакций.

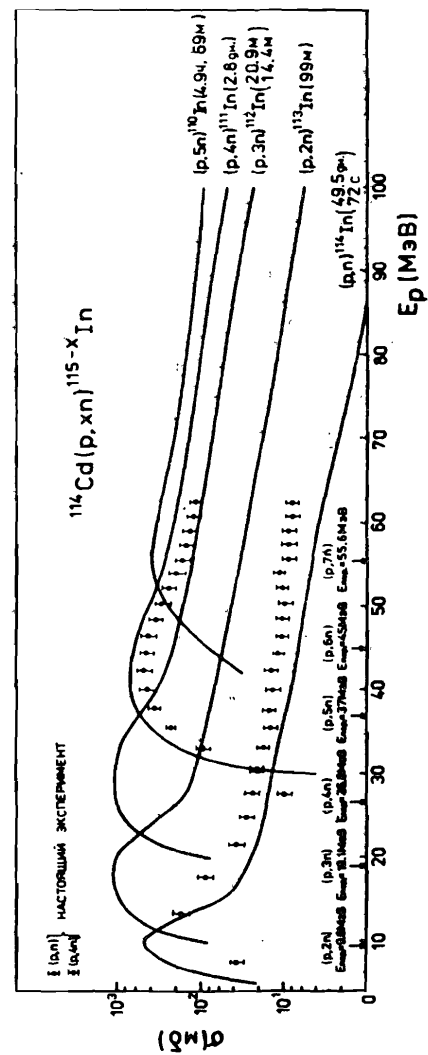


Рис. 3. Измеренные сечения и теоретические функции возбуждения  $^{114}\text{Cd}(p, xn)\text{In}$  реакций, рассчитанные по программе ALICE. Стрелки на шкале энергий указывают на теоретические значения энергетических порогов реакций.

теории, начинаются выше кулоновского барьера с очень низких значений. Затем сечения  $^{113}\text{Cd}(p, 3n)^{111}\text{In}$  и  $^{114}\text{Cd}(p, 4n)^{111}\text{In}$  быстро растут с увеличением энергии протонов, достигают максимального значения, после чего уменьшаются, сохраняя "хвостовую" часть в высокоэнергетической области. Сечения этих реакций, как показывают полученные результаты, близки сечениям реакций  $^{111}\text{Cd}(p, n)^{111}\text{In}$  и  $^{112}\text{Cd}(p, 2n)^{111}\text{In}$  /13, 17/, обычно используемых для получения  $^{111}\text{In}$ . Следует отметить, что в низкоэнергетической области имеется неопределенность в результатах, которую можно приписать вкладу от реакций  $(p, xn)$  на примесях  $^{111}\text{Cd}$  и  $^{112}\text{Cd}$  в обогащенных  $^{113}\text{Cd}$  и  $^{114}\text{Cd}$  /табл. 2/.

### Б. Теоретические функции возбуждения

Теоретические функции возбуждения реакций  $^{113}\text{Cd}(p, xn)$ ,  $x = 1\div 5$ , и  $^{114}\text{Cd}(p, xn)$ ,  $x = 1\div 6$ , были рассчитаны по известной программе ALICE, основанной на механизме равновесных и неравновесных ядерных реакций в соответствии с гибридной моделью /30/. Расчеты проведены на CYBER-компьютере в Институте ядерных исследований /Сверк, Польша/.

Рассчитанные по программе ALICE функции возбуждения показаны на рис. 2 и 3, откуда видно, что они следуют ожидаемому ходу кривой. В высокоэнергетической области функции возбуждения отражают предравновесные процессы. Явно выраженный максимум функций возбуждения  $^{113}\text{Cd}(p, 3n)$  и  $^{114}\text{Cd}(p, 4n)$  реакций подтверждает предположение, что в рассматриваемом энергетическом интервале реакции протекают главным образом через образование компаунд-ядер. Экспериментальная функция возбуждения  $^{113}\text{Cd}(p, 3n)$  реакции хорошо согласуется с расчетной как по форме, так и по абсолютным значениям величин /рис. 2/. В случае  $^{114}\text{Cd}(p, 4n)^{111}\text{In}$  /рис. 3/ экспериментальные сечения перекрываются расчетными по всей исследованной энергетической области. Противоположная ситуация наблюдается для реакции  $^{114}\text{Cd}(p, n)^{114m}\text{In}$ . Здесь следует отметить, что рассматривается образование только  $^{114m}\text{In}$ , так как сечение образования  $^{114}\text{In}$   $T_{1/2} = 72$  с /неизвестно, и оно не определялось в этой работе.

### В. Выходы $^{111}\text{In}$ и $^{114m}\text{In}$

Выходы  $^{111}\text{In}$  и  $^{114m}\text{In}$ , измеренные в ядерных реакциях на мишенях природного кадмия и кадмия, обогащенного изотопами  $^{113}\text{Cd}$  и  $^{114}\text{Cd}$ , как функция энергии протонов, приведены в табл. 3-5 и на рис. 4-6. Ошибка определения выходов равна  $\pm 20\%$  и включает те же неопределенности, как и при определении сечений реакций образования этих нуклидов.

Таблица 5

Суммарные сечения образования  $^{111}\text{In}$  при  $^{113}\text{Cd}(p, xn)$  и  $^{114m}\text{In}$  реакций и выходы  $^{111}\text{In}$  и  $^{114m}\text{In}$  для тонких и толстых мишеней как функция энергии протонов

№ об-раз-цов	Энергия протонов (МэВ)		Суммарное сечение образования $^{111}\text{In}$ (мб)	Выход $^{111}\text{In}$ (мкКи/мкА-ч)		Суммарное сечение образования $^{114m}\text{In}$ (мб)	Выход $^{114m}\text{In}$ (мкКи/мкА-ч)	
	вход/выход	средина		тонкая мишень	толстая мишень		тонкая мишень	толстая мишень
1	63,9-62,5	63,2	91	266	266	9	1,2	1,2
2	62,5-61,0	61,7	92	274	540	10	1,3	2,5
3	61,0-59,5	60,3	95	285	825	10	1,4	3,9
4	59,5-58,0	58,8	94	279	1104	9	1,4	5,3
5	58,0-56,4	57,2	97	285	1389	10	1,4	6,7
6	56,4-54,8	55,6	103	300	1689	10	1,4	8,1
7	54,8-53,2	54,0	108	320	2009	9	1,4	9,5
8	53,2-51,5	52,4	119	347	2356	11	1,5	11,0
9	51,5-49,8	50,6	131	382	2738	10	1,5	12,5
10	49,8-48,1	48,9	149	442	3180	12	1,9	14,4
11	48,1-46,3	47,2	177	518	3698	12	2,0	16,4
12	46,3-44,4	45,3	193	575	4273	12	2,1	18,1
13	44,4-42,6	43,5	212	632	4905	14	2,4	20,5
14	42,6-40,6	41,6	210	624	5529	15	2,6	23,1
15	40,6-38,6	39,6	202	598	6127	19	2,8	25,9
16	38,6-36,5	37,6	187	555	6682	26	3,4	29,3
17	36,5-34,3	35,4	173	516	7198	37	4,0	33,3
18	34,3-32,0	33,2	161	475	7673	47	4,8	38,1
19	32,0-29,6	30,8	186	550	8223	53	5,5	43,6
20	29,6-27,0	28,3	229	685	8908	44	5,2	48,8
21	27,0-24,1	25,5	219	663	9571	17	2,7	51,5
22	24,1-21,2	22,6	168	510	10081	24	3,3	54,8
23	21,2-17,9	19,5	75	239	10320	37	7,3	62,1
24	17,9-14,1	16,0	22	66	10386	9	1,9	64,0
25	14,1-9,7	11,9	15	44	10430	1,0	0,2	64,2

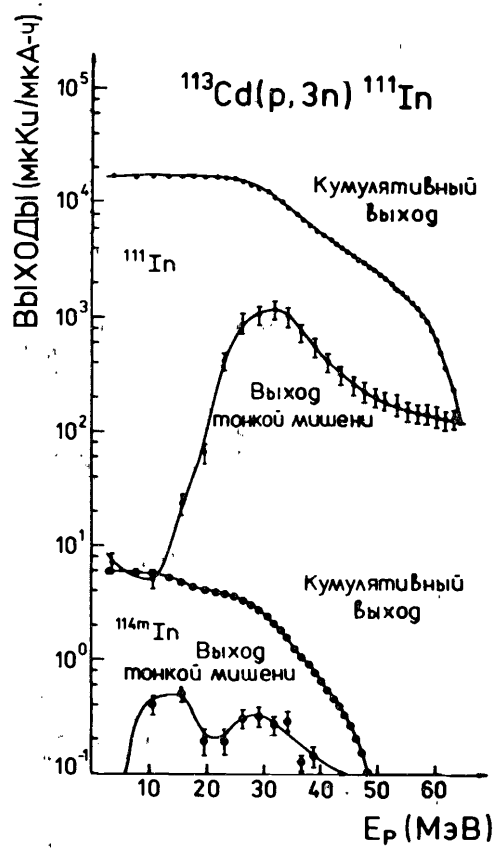


Рис.4. Выходы  $^{111}\text{In}$  и  $^{114\text{m}}\text{In}$  для тонких и толстых мишеней  $^{113}\text{Cd}$  как функция энергии протонов.

Сравнивая полученные результаты с выходами реакций  $^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$  и  $^{112}\text{Cd}(p,2n)^{111}\text{In}$  /табл.6/, можно видеть определенные преимущества в случае облучения  $^{113}\text{Cd}$  протонами с энергией  $\leq 65$  МэВ:  $^{111}\text{In}$  получается с хорошей радионуклидной чистотой и более высоким выходом. Образование нежелательного  $^{114\text{m}}\text{In}$  может быть понижено до минимума при использовании высокообогащенных мишеней.

При облучении обогащенного  $^{114}\text{Cd}$  загрязнения  $^{114\text{m}}\text{In}$ , образующегося в реакции  $(p,n)$ , получают на порядок величины выше по сравнению с  $^{111},^{112},^{113}\text{Cd}$  мишенями. Принимая во внимание тот факт, что большая часть

$^{114\text{m}}\text{In}$  образуется в низкоэнергетической области, реакция  $^{114}\text{Cd}(p,4n)^{111}\text{In}$  открывает возможность использования высокоэнергетической части протонного пучка /65  $\rightarrow$  36,5 МэВ/ для получения  $^{111}\text{In}$  почти такой же чистоты, как в случае  $^{113}\text{Cd}(p,3n)^{111}\text{In}$ , если использовать высокообогащенный материал мишени. Протонный пучок, выходящий из  $^{114}\text{Cd}$  мишени толщиной 3,9 г/см<sup>2</sup> / $E_p = 65 \rightarrow 36,5$  МэВ/, может быть направлен в  $^{113}\text{Cd}$  мишень толщиной 1,6 г/см<sup>2</sup> / $E_p = 36,5 \rightarrow 23$  МэВ/. Таким образом, обе реакции  $^{114}\text{Cd}(p,4n)$  и  $^{113}\text{Cd}(p,3n)$ , захватывающие энергетические интервалы со своими максимальными значениями функций возбуждения, могут быть использованы одновременно при облучении tandemной мишени  $^{114}\text{Cd} + ^{113}\text{Cd}$  и дать высокий выход  $^{111}\text{In}$  /до ~24 мКи/мкА-ч/.

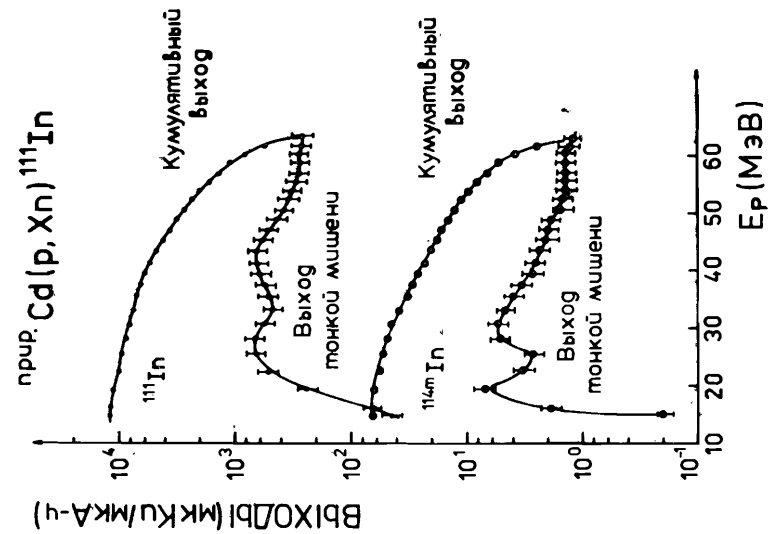


Рис.6. Выходы  $^{111}\text{In}$  и  $^{114\text{m}}\text{In}$  для тонких и толстых мишеней прир. Cd как функция энергии протонов.

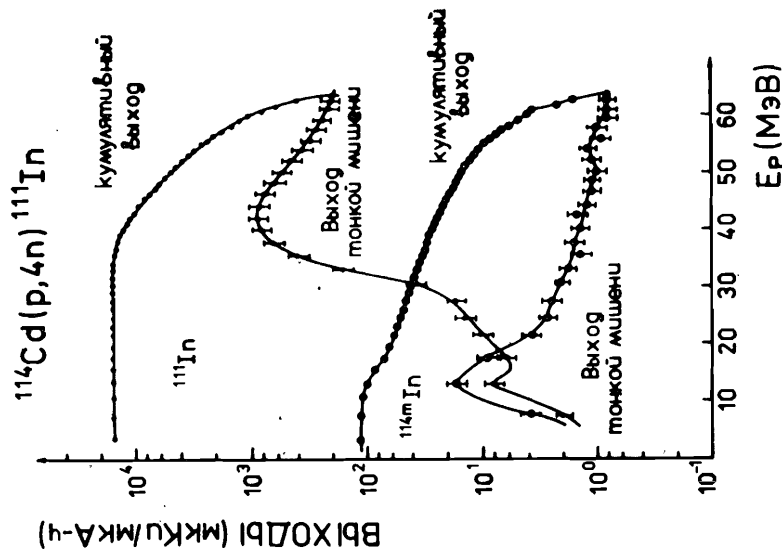


Рис.5. Выходы  $^{111}\text{In}$  и  $^{114\text{m}}\text{In}$  для тонких и толстых мишеней  $^{114}\text{Cd}$  как функция энергии протонов.



Измеренные выходы  $^{111}\text{In}$  в различных ядерных реакциях

Таблица 6

Материал мишени и его обогащение (%)	Энергия налетающих частиц (МэВ)	Ядерная реакция	Выход $^{111}\text{In}$ на конец облучения (мкКи/мкА-ч)	Примесь $^{114\text{m}}\text{In}$ (% от активности $^{111}\text{In}$ )	Вклад дозы от $^{114\text{m}}\text{In}$ (% от общей дозы)	Ссылка
прир. Cd	15	(p, n)	140	3	7	/13/
	22	(p, 2n)	1035	0,5	(29)*	/5/
	22	(p, 2n)	1150	0,25	(17)	/14/
	63	(p, xn)	10400	0,6	(33)	наст. работа
	12	(n, n)	117	5,7	(82)	/5/
$^{113}\text{Cd}$ (96,5)	16	(p, n)	515	0,012	(1)	/13/
$^{112}\text{Cd}$ (97)	27	(p, 2n)	6000	0,003	(0,24)	/14/
$^{113}\text{Cd}$ (95,8)	63	(p, 3n)	16500	0,024	(1,88)	наст. работа
$^{114}\text{Cd}$ (98,9)	63	(p, 4n)	15600	0,26	(17,2)	наст. работа
прир. Ag	32	( $^3\text{He}, n$ )	2	не определяется	-	/5/
	24	( $^4\text{He}, 2n$ )	64	не определяется	-	/5/

\* Данные в скобках были получены экстраполяцией результатов работы /4/

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые измерены функции возбуждения реакций  $^{113}\text{Cd}(p,3n)^{111}\text{In}$ ,  $^{114}\text{Cd}(p,4n)^{111}\text{In}$  и  $^{114}\text{Cd}(p,4n)^{114\text{m}}\text{In}$  при облучении мишеней кадмия, обогащенных изотопами  $^{113}\text{Cd}$  и  $^{114}\text{Cd}$ , протонами с энергией  $\leq 65$  МэВ. Показана возможность получения относительно больших количеств  $^{111}\text{In}$  при облучении этих мишеней на изохронных или линейных ускорителях с энергией частиц  $\sim 65$  МэВ.

Полученные результаты показывают, что из обогащенного кадмия  $^{113}\text{Cd}$  можно получить  $^{111}\text{In}$  с более высоким выходом и с относительно более низкими примесями /на один-два порядка/  $^{114\text{m}}\text{In}$  по сравнению с мишенью  $^{114}\text{Cd}$ . С целью увеличения выхода  $^{111}\text{In}$  может быть использована тандемная конструкция мишени из обогащенного /  $^{113}\text{Cd}$  и  $^{114}\text{Cd}$  / кадмия.

В заключение авторы выражают благодарность группе циклотрона У-240 /Киев/ за проведение облучений, В.Б.Бруданину и А.Ф.Новгородову за обеспечение работы измерительно-вычислительного центра отдела, один из нас /Э.Пураж/ выражает благодарность В.Г.Калинникову за интерес и поддержку работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Thakur M.L. - Int. J. Appl. Rad. Isotopes, 1977, 28, p.183.
2. Malinin A. et al. - Radiochem. Radioanal. Lett., 1983, 59, p.213.
3. Möller P., Nix J.R. - LA-UR-80-1996, L.A., 1980.
4. Münzel H. - KfK-1955, Karlsruhe, 1974.
5. McDonald N.S. et al. - Int. J. Appl. Rad. Isotopes, 1975, 26, p.631.
6. Дмитриев П.П. и др. - Атомная энергия, 1974, 37, с.496.
7. Thakur M.L., Nunn A.D. - Int. J. Appl. Rad. Isotopes, 1972, 23, p.139.
8. De Pasquali G., Von Goeler E., Peacock R.N. - J. Inorg. Nucl. Chem., 1959, 11, p.257.
9. Neirinckx R.D. - Radiochem. Radioanal. Lett., 1970, 4, p.153.
10. Helus F., Maier-Borst W. - Radiochem. Radioanal. Lett., 1973, 13, p.271.
11. Wood R.A., Wakakuwa S.I., MacDonald N.S. - J. Inorg. Nucl. Chem., 1972, 34, p.3517.
12. Gruverman I.J., Kruger P. - Int. J. Appl. Radiat. Isotopes, 1959, 5, p.21.
13. Brown L.C., Beets A.L. - Int. J. Appl. Rad. Isotopes, 1972, 23, p.57.

14. Beavrier J.E. et al. - Progr. Nucl. Medicine, 1978, 4, p.28.
15. Dahl J.R., Tilbury R.S. - Int. J. Appl. Radiat. Isotopes, 1972, 23, p.431.
16. Omori T. et al. - Radiochem. Radioanal. Lett., 1980, 44, p.307.
17. Otozai K. et al. - Nucl. Phys., 1966, 80, p.335.
18. Wing J., Huizenga J.R. - Phys.Rev., 1962, 128, p.280.
19. Usher O.H. et al. - Radiochim. Acta, 1977, 24, p.59.
20. Fukushima S. et al. - Nucl.Phys., 1963, 41, p.275.
21. Fukushima S. et al. - Nucl. Phys., 1965, 69, p.273.
22. Porges K.G. - Phys.Rev., 1956, 101, p.225.
23. Wasilevsky C., Vedoya M.V., Nassiff S.J. - Int. J. Appl. Rad. Isotopes, 1986, 37, p.319.
24. Smend F., Weirauch W., Schmidt-Ott W.D. - Z.Phys., 1968, 214, p.437.
25. Авчухов В.Д. и др. - Изв. АН СССР /серия физ./, 1980, 44, с.155.
26. Williamson C.F., Boujot J.P., Picard J. - CEA-R 3042, CEN, Saclay, 1966.
27. Grütter A. - Nucl. Phys., 1982, A383, p.98.
28. Гопыч П.М. и др. В кн.: Материалы совещания по программированию и математическим методам решения физических задач. ОИЯИ, Д-10,11-11264, Дубна, 1978, с.330.
29. Nelson F., Michelson D.C. - J. Chromotogr., 1966, 35, p.414.
30. Blann M. - Overlaid ALICE Code, CCO/3494-29, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел  
28 декабря 1988 года.

Зайцева Н.Г. и др.

P6-88-911

Функции возбуждения реакций  $^{113,114}\text{nat Cd}(p, xn)^{111}\text{In}$  и выходы  $^{111}\text{In}$  при облучении мишеней кадмия протонами с энергией - 65 МэВ

Методом стопки фольг измерены функции возбуждения  $^{113}\text{Cd}(p, 3n)^{111}\text{In}$  и  $^{114}\text{Cd}(p, 4n)^{111}\text{In}$  реакций в энергетическом интервале 63 → 3 МэВ. Экспериментальные результаты сравниваются с теоретическими функциями возбуждения, рассчитанными по программе ALICE, основанной на гибридной модели ядерных реакций. В том же энергетическом интервале определены эффективные сечения  $^{113}\text{Cd}(p, xn)^{111}\text{In}$  реакций. Определены выходы  $^{111}\text{In}$  и количество примесей  $^{114m}\text{In}$  в тонких и толстых мишенях  $^{113}\text{Cd}$ ,  $^{114}\text{Cd}$  и  $^{nat}\text{Cd}$ , облученных протонами с начальной энергией  $63 \pm 1$  МэВ. Кумулятивные выходы  $^{111}\text{In}$  из этих мишеней были равны 16,7; 15,7 и 10,4 мКи/мкА-ч соответственно. Разработан метод радиохимического выделения индия в состоянии без носителя из облученного кадмия, основанный на различном поведении ионов индия и кадмия в системе катионит Дауэкс 50x4 - растворы HBr различной концентрации. Определена радионуклидная чистота конечного препарата  $^{111}\text{In}$ .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод

Zaitseva N.G. et al.

P6-88-911

Excitation Functions and Yields for  $^{111}\text{In}$  Production Using  $^{113,114}\text{nat Cd}(p, xn)^{111}\text{In}$  Reactions with 65 MeV Protons

Excitation functions for the  $^{113}\text{Cd}(p, 3n)^{111}\text{In}$  and  $^{114}\text{Cd}(p, 4n)^{111}\text{In}$  reactions were measured by the stacked-foil technique in the energy range from 63 to 3 MeV. The results were compared with theoretical calculations based on the hybrid model using the well developed computer code ALICE. For the same energy range, the effective cross-sections were determined for the  $^{nat}\text{Cd}(p, xn)^{111}\text{In}$  reactions. At the initial proton energy of 63 MeV for production of  $^{111}\text{In}$  from  $^{113}\text{Cd}$ ,  $^{114}\text{Cd}$  and  $^{nat}\text{Cd}$  the cumulative yields were found as 16.7; 15.7 and 10.4 mCi/μAh, respectively. The contamination of the undesired nuclide  $^{114m}\text{In}$  was determined. The carrier-free  $^{111}\text{In}$  activity was separated from the cadmium cyclotron-target by procedure based on ion exchange chemistry. The radionuclide purity of the final radioindium was determined.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1988