

P12-2001-196

Д.В.Философов, Н.А.Королев, Н.А.Лебедев,  
Г.Я.Стародуб, А.Ф.Новгородов

РАДИОНУКЛИДНЫЙ ГЕНЕРАТОР  $^{111}\text{In} \rightarrow ^{111\text{m}}\text{Cd}$

Направлено в журнал «Радиохимия»

# 1 Введение

В последние годы расширяется область применения метода возмущенных угловых корреляций (ВУК) в исследованиях по химии, биологии, ядерной медицине.

Измеряемые этим методом параметры сверхтонкого взаимодействия (СТВ) позволяют получать ценную, а иногда и уникальную информацию о строении и динамических характеристиках локального окружения ядра-зонда.

В современных исследованиях ВУК широкое применение находят радионуклиды  $^{111}\text{In}$  ( $T_{1/2} = 2,83$  дня) и  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  ( $T_{1/2} = 48,6$  мин), схема распада которых приведена на рис. 1.

С  $^{111}\text{In}$  проведены исследования устойчивости комплексов с белковыми молекулами, комплексообразования в водных растворах и структуры конденсированных сред. Интерес к этому радионуклиду объясняется также его применением в ядерной медицине, например, для диагностики раковых заболеваний головного мозга. Однако при измерениях с ним необходимо учитывать возможное влияние постэффектов электронного захвата на возмущение угловой корреляции  $\gamma$ -квантов каскада 171,3–245,4 кэВ. Их роль может быть выяснена в контрольных экспериментах с  $^{111\text{m}}\text{Cd}$ ,  $\gamma\gamma$ -каскад 150,6–245,4 кэВ которого проходит через тот же уровень, что и каскад  $^{111}\text{In}$ . Для  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  влиянием постэффектов на измеряемые параметры СТВ можно пренебречь, поскольку при изомерном переходе не происходит изменения зарядового состояния ядра, а в случае протекания оже-процессов в результате конверсии ядро выбывает из ансамбля измеряемых ядер.

Помимо выяснения влияния постэффектов, исследования методом ВУК соединений кадмия представляют самостоятельный научный интерес.

Так как период полураспада  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  равен 48,6 мин, то измерения ВУК с ним должны проводиться в непосредственной близости от места его получения. Возможны несколько вариантов наработки этого изотопа:

- Облучение мишени, обогащенной по  $^{110}\text{Cd}$ , на реакторе с высоким потоком нейтронов ( $10^{14}$ – $10^{15}$  нейтронов/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ )). Однако даже в таких условиях удельная активность препарата  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  крайне низка ( $\sim 1$  Ки/г при потоке  $10^{14}$  и облучении в течение одного периода полураспада [1]), что недостаточно для его использования в экспериментах ВУК, связанных с ядерной медициной (в большинстве случаев содержание носителя кадмия в пробе не должно превышать 1 микрограмма, в то время как в эксперименте ВУК

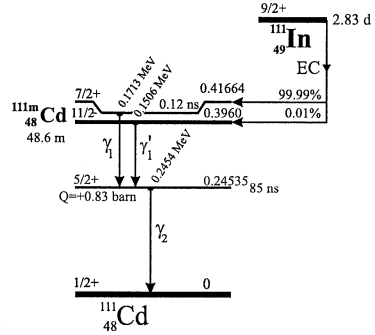


Рис. 1. Схемы распада радионуклидов  $^{111}\text{In}$  и  $^{111\text{m}}\text{Cd}$

активность образца обычно составляет 10 – 20 мкКи). При низкой удельной активности препарата усложняются также эксперименты по изучению комплексообразования, так как приходится работать с высокими концентрациями реагентов и необходимо учитывать эффекты концентрированных растворов. Затруднены твердотельные измерения, поскольку введение носителя кадмия в таких количествах может привести к изменению свойств исследуемой системы.

- Нарabотка  $^{111m}\text{Cd}$  на циклотроне, например, облучение палладиевой мишени (обогащенной изотопом  $^{108}\text{Pd}$ )  $\alpha$ -частицами с энергией 18 – 20 МэВ [2, 3]. Получаемый препарат  $^{111m}\text{Cd}$  обладает высокой удельной активностью, однако радиохимическая обработка мишени и очистка получаемого препарата  $^{111m}\text{Cd}$  занимает около одного часа работы высококвалифицированного специалиста. Кроме того, проведение более одного измерения ВУК на одном спектрометре из одного облучения практически невозможно.
- Использование ISOL-систем, предоставляющих достаточно интенсивные пучки ионов  $^{111m}\text{Cd}$ . Атомы радионуклида могут имплантироваться непосредственно в изучаемую систему (например, в твердотельных измерениях) или в подходящую матрицу, откуда выделение радиоактивного изотопа не представляет трудностей. В настоящее время единственной такой установкой является ISOLDE-2 в ЦЕРН (Женева), где были выполнены и выполняются измерения ВУК с  $^{111m}\text{Cd}$  (см., например, [4]). Получаемый  $^{111m}\text{Cd}$  имеет высокую удельную активность ( $\sim 10^4$  Ки/г), однако этот метод характеризуется относительно высокой стоимостью получаемого изотопа.

Перечисленные методы имеют один общий недостаток – измерения с использованием  $^{111m}\text{Cd}$  должны проводиться одновременно с работой реактора или ускорителя и в непосредственной близости от него. Единственный путь получения  $^{111m}\text{Cd}$ , свободный от этого недостатка, – радионуклидный генератор  $^{111}\text{In} \rightarrow ^{111m}\text{Cd}$ . Впервые на возможность его создания было указано еще в обзоре [5], однако практическому его воплощению препятствовала низкая доля электронного захвата на изомерный уровень 396 кэВ ( $^{111m}\text{Cd}$ ) при распаде  $^{111}\text{In}$ , которая составляет  $\sim 10^{-4}$  [6] на распад. Накладываются также очень жесткие требования на очистку  $^{111m}\text{Cd}$  от материнского  $^{111}\text{In}$  (например, для измерений ВУК его содержание  $^{111}\text{In}$  в получаемом препарате не должно превышать 1% по активности). Для решения этой задачи мы использовали классический принцип генератора, часто встречающийся в коммерческих генераторах (таких, как  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  и  $^{113}\text{Sn}/^{113m}\text{In}$ ). В его основу нами был положен метод колоночной экстракционной хроматографии, с использованием в качестве экстрагента ди-2-этилгексил фосфорной кислоты (Д2ЭГФК). Коэффициенты распределения индия и кадмия в системе Д2ЭГФК – 0,1М HCl различаются в  $10^5$  раз ( $10^3$  для

$\text{In}^{3+}$  и  $10^{-2}$  для  $\text{Cd}^{2+}$ ][7], что позволяло надеяться на высокую эффективность их разделения.

## 2 Экспериментальная часть

В работе использовались реактивы марки “осч”. Материнский изотоп –  $^{111}\text{In}$  получали по реакции  $^{109}\text{Ag}(\alpha, 2n)^{111}\text{In}$  облучением на ускорителе У-200 (ОИЯИ, ФЛЯР)  $\alpha$ -частицами с энергией 32 МэВ мишени из природного серебра или серебра, обогащенного по  $^{109}\text{Ag}$ . Радиохимическое выделение и очистка  $^{111}\text{In}$  проводилась по методике, описанной нами ранее [8].

В работе использовался также радионуклид  $^{109}\text{Cd}$ , полученный как побочный продукт при радиохимической обработке облученного серебра.

### 2.1 Экстракционно-хроматографическая колонка

В качестве носителя для экстракционной хроматографии был использован силикагель марки КСК-2,5 с размером частиц 75 – 100 мкм. Гель промывали бензолом для удаления органических загрязнений и сушили в течение двух суток при температуре  $120^{\circ}\text{C}$ . Перед нанесением экстрагента силикагель гидрофобизировали, для чего к нему по каплям при постоянном перемешивании добавляли диметилдихлорсилан (ДМДХС) в количестве 2 мл 100% ДМДХС на 10 г геля. Для удаления паров  $\text{HCl}$  и избытка ДМДХС силикагель сушили 2 часа при  $120^{\circ}\text{C}$ .

Используемая Д2ЭГФК была предварительно очищена от моноалкильных производных по методике, рассмотренной в [7].

Гидрофобизированный силикагель обрабатывали 40%(об) раствором Д2ЭГФК в толуоле в количестве 1,5 мл раствора на 1 г сухого носителя. Толуол удаляли при пониженном давлении, создаваемом водоструйным насосом, затем гель просушивали при  $70^{\circ}\text{C}$  в течение суток.

Стекланную колонку (внутренний диаметр 4 мм) предварительно гидрофобизировали с помощью ДМДХС, чтобы исключить проскок жидкости вдоль стенок. Для удаления паров  $\text{HCl}$ , образовавшихся при гидрофобизации, колонка была промыта бидистиллированной водой.

Для заполнения колонки носителем использовался суспензионный метод. Силикагель с нанесенной Д2ЭГФК заливали 0,1М  $\text{HCl}$  и для удаления пузырьков воздуха на сутки оставляли при пониженном давлении, создаваемом водоструйным насосом. Полученную суспензию переносили в колонку небольшими порциями. После внесения каждой новой порции носитель в колонке слегка перемешивали для более равномерного ее заполнения. Носитель сверху и снизу фиксировали пробками из фторопластовой ваты. Высота слоя носителя составила  $\sim 80$  мм, а свободный объем колонки  $\sim 0,4$  мл.

Колонку промывали 11М  $\text{HCl}$  (3 мл) и затем 0,2М  $\text{HCl}$  (3 мл).

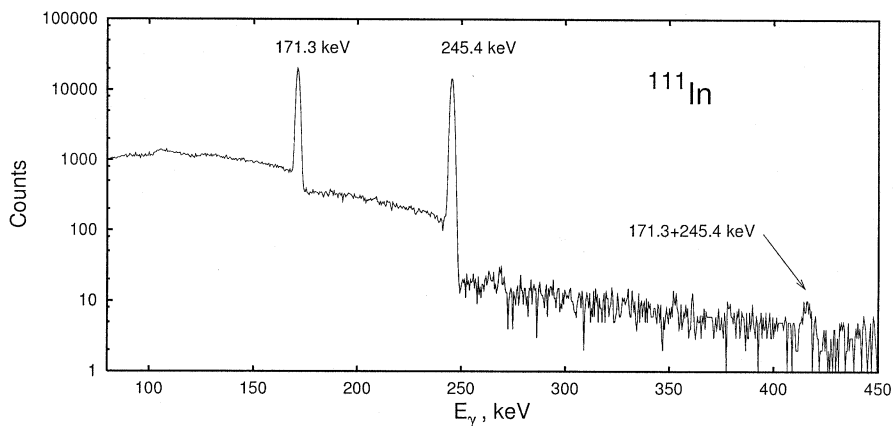


Рис. 2. Спектр  $^{111}\text{In}$

## 2.2 Определение доли электронного захвата на изомерный уровень 396 кэВ ( $^{111\text{m}}\text{Cd}$ ) при распаде $^{111}\text{In}$

При создании радионуклидного генератора  $^{111}\text{In} \rightarrow ^{111\text{m}}\text{Cd}$  и определении его химического выхода необходимой является информация о доле электронного захвата на изомерный уровень 396 кэВ при распаде  $^{111}\text{In}$  (далее в тексте обозначена как  $\chi^{cd111m}$ ). По данным разных авторов эта величина составляет  $10^{-4}$  [6] и даже  $(5 \pm 5) \cdot 10^{-5}$  [9]. Поэтому параллельно с созданием радионуклидного генератора нами был проведен ряд экспериментов по уточнению величины  $\chi^{cd111m}$ .

Из-за слишком низкого выхода линии 150,6 кэВ при распаде  $^{111}\text{In}$  значение  $\chi^{cd111m}$  не может быть определено с достаточной точностью из  $\gamma$ -спектров (пример  $\gamma$ -спектра, полученного на HPGe-детекторе объемом  $65 \text{ см}^3$ , приведен на рис. 2) и спектров конверсионных электронов. Для определения величины  $\chi^{cd111m}$  нами была разработана методика, в которой отделение кадмия от материнского изотопа производится химическим способом (химический выход контролируется по метке –  $^{109}\text{Cd}$ ). И дочерний, и материнский изотопы измерялись в идентичных условиях, что позволяет исключить ошибку, связанную с калибровкой абсолютной эффективности спектрометра.

Предварительно были выбраны "стандартные" условия измерения: образец – микропробирка Ерпендорф объемом 2,0 мл; объем раствора – 1,5 мл. Были подготовлены держатели, обеспечивающие установку образца с ошибкой не более 0,5 мм на расстояниях 5,8 см ("геометрия 1"), 7,5 см ("геометрия 2") и 187,0 см ("геометрия 3") от поверхности Ge(Li)-детектора объемом  $60 \text{ см}^3$ .

Схема определения  $\chi^{cd111m}$  включала несколько этапов:

- образец (1,5 мл 0,2М раствора HCl), содержащий  $\sim 5$  мкКи  $^{109}\text{Cd}$ , – измерялся на гамма-спектрометре в "геометрии 1" и "геометрии 2";
- измеренным раствором снимается  $\sim 2$  мКи  $^{111}\text{In}$  с тefлоновой подложки, и полученный таким образом раствор  $^{109}\text{Cd} + ^{111}\text{In} (^{111\text{m}}\text{Cd})$  измерялся в "геометрии 3";
- суммарный раствор пропускfлся через экстракционную колонку (подготовленную по методике, описанной выше), и 1,5 мл элюата, содержащего  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  и  $^{109}\text{Cd}$ , измерялись в "геометрии 1" и "геометрии 2" в "стандартных" условиях сериями по 5 минут до полного распада  $^{111\text{m}}\text{Cd}$ . Скорость пропускания раствора выбирается так, чтобы ошибка определения начального момента элюирования была не более 30 с (в наших экспериментах  $\sim 1,5$  мл/мин). Из отношения интенсивностей пиков  $\gamma$ -линии 88,0 кэВ ( $^{109}\text{Cd}$ ) до и после разделения можно непосредственно определить долю кадмия, прошедшего через колонку (химический выход), поскольку условия измерений абсолютно идентичны. Интенсивность (скорость счета) линии 150,6 кэВ  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  с учетом его распада во время измерения (период полураспада принят равным 48,54(5) мин [10]) пересчитывалась на момент элюирования;
- материнский изотоп вымывали из колонки 1,5 мл 4М HCl (в наших экспериментах на колонке и используемом в эксперименте оборудовании оставалось не более 0,1%  $^{111}\text{In}$  и поэтому его потери на этой стадии в дальнейшем не учитывались);
- когда активность вымытого из колонки  $^{111}\text{In}$  снизилась до уровня активности  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  (при этом поправки, учитывающие мертвое время спектрометра, одинаковы), он измерялся в "геометрии 1" и "геометрии 2" в "стандартных" условиях. При пересчете интенсивности линии 245,4 кэВ на момент очистки использовался период полураспада  $^{111}\text{In}$ : 2,8047(5) дня [10].

Таким образом долю электронного захвата на уровень 396 кэВ ( $^{111\text{m}}\text{Cd}$ ) при распаде  $^{111}\text{In}$  можно найти по формуле

$$\chi^{cd111\text{m}} = \frac{I_{150,6}^{Cd}}{I_{245,4}^{In}} \cdot \frac{\varepsilon_{245,4}}{\varepsilon_{150,6}} \cdot \frac{\gamma_{245,4}^{In}}{\gamma_{150,6}^{Cd}} \cdot \frac{1}{\eta_{chem.}},$$

где  $I_{150,6}^{Cd}$  и  $I_{245,4}^{In}$  – интенсивности  $\gamma$ -линий 150,6 кэВ ( $^{111\text{m}}\text{Cd}$ ) и 245,4 кэВ ( $^{111}\text{In}$ ), имп./с;  $\frac{\varepsilon_{245,4}}{\varepsilon_{150,6}}$  – отношение эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов с энергией 245,4 и 150,6 кэВ для используемого детектора;  $\gamma_{245,4}^{In}$  и  $\gamma_{150,6}^{Cd}$  – выходы  $\gamma$ -квантов при распаде  $^{111}\text{In}$  и  $^{111\text{m}}\text{Cd}$ ;  $\eta_{chem.}$  – доля кадмия, прошедшая через экстракционную колонку, определенная по радиоактивной метке ( $^{109}\text{Cd}$ ).

Поскольку  $\gamma_{245,4}^{In} = \gamma_{245,4}^{Cd}$  (этот переход общий для  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  и  $^{111}\text{In}$ ), то вместо  $\gamma_{245,4}^{In}/\gamma_{150,6}^{Cd}$  можно использовать отношение  $\gamma_{245,4}^{Cd}/\gamma_{150,6}^{Cd}$ .

Таблица 1. Определение доли электронного захвата на изомерный уровень 396 кэВ ( $^{111m}\text{Cd}$ ) при распаде  $^{111}\text{In}$  ( $\chi^{cd111m}$ )

Данные измерений	Геометрия	Эксперимент			
		1	2	3	4
$\eta_{chem.}$	7,5 см	0,77(6)	0,75(6)	0,747(18)	0,73(6)
	5,8 см	0,80(2)	0,78(3)	0,77(2)	0,76(6)
$I_{150,6}^{Cd}$	7,5 см	9,84(18)	10,00(25)	7(1)	5,9(3,7)
	5,8 см	15,2(4)	14,4(5)	10,1(4)	9,4(4)
$I_{245,4}^{In}, (\cdot 10^3)$	7,5 см	433 ± 4	425 ± 6	299 ± 1	266 ± 1
	5,8 см	640 ± 8	634 ± 9	441 ± 7	390 ± 4
$\left(\frac{\varepsilon_{245,4}}{\varepsilon_{150,6}} \cdot \frac{\gamma_{245,4}^{Cd}}{\gamma_{150,6}^{Cd}}\right)$	7,5 см	1,973(45)			
	5,8 см	2,022(18)			
$\chi^{cd111m}, (\cdot 10^{-5})$	7,5 см	5,8 ± 0,7	6,2 ± 0,9	6,2 ± 1,2	6,0 ± 4,4
	5,8 см	6,0 ± 0,5	5,9 ± 0,6	6,0 ± 0,6	6,4 ± 0,9

Произведение  $\left(\frac{\varepsilon_{245,4}}{\varepsilon_{150,6}} \cdot \frac{\gamma_{245,4}^{Cd}}{\gamma_{150,6}^{Cd}}\right)$  может быть найдено экспериментально, поскольку оно равно отношению площадей пиков  $\gamma$ -линий 245,4 и 150,6 кэВ в спектре  $^{111m}\text{Cd}$  для "стандартных" условий измерения.

Экспериментальные данные и результаты расчета для четырех экспериментов по определению величины  $\chi^{cd111m}$  сведены в табл. 1. Активность  $^{111}\text{In}$  в каждом опыте составляла 1,5–2 мКи.

Величина  $\left(\frac{\varepsilon_{245,4}}{\varepsilon_{150,6}} \cdot \frac{\gamma_{245,4}^{Cd}}{\gamma_{150,6}^{Cd}}\right)$  была определена в независимых экспериментах с изотопом  $^{111m}\text{Cd}$ , полученным с радионуклидного генератора и дополнительно очищенным от материнского изотопа  $^{111}\text{In}$ .

Полученное среднее значение выхода  $^1$ :  $\chi^{cd111m} = (6,01 \pm 0,14_{\text{стат.}} \pm 0,18_{\text{сист.}}) \cdot 10^{-5}$ .

## 2.3 Определение характеристик генератора

При изучении характеристик генератора нами была разработана схема измерений, в которой не используется значение  $\chi^{cd111m}$ , полученное на предыдущем этапе.

Подготовка экстракционной хроматографической колонки для генератора

<sup>1</sup> Систематическая ошибка в полученном значении включает ошибку определения начала элюирования, ошибки периодов полураспада материнского и дочернего изотопов и ошибку определения  $\left(\frac{\varepsilon_{245,4}}{\varepsilon_{150,6}} \cdot \frac{\gamma_{245,4}^{Cd}}{\gamma_{150,6}^{Cd}}\right)$

проводилась по методике, описанной выше. Перед нанесением активности  $^{111}\text{In}$  измеряли в тех же условиях, что и при изучении ветки распада (микропробирка Eppendorf на 2,0 мл, объем раствора 1,5 мл, 0,2М HCl, "геометрия 3").

Скорость пропускания раствора при нанесении материнского изотопа поддерживали равной 0,2 мл/мин, при этом на колонке сорбировалось более 99%  $^{111}\text{In}$ . После нанесения материнского изотопа через колонку дополнительно пропустили 1 мл 0,2М HCl.

Накапливающийся  $^{111m}\text{Cd}$  вымывали в 1,5 мл 0,2М HCl и измеряли его в "стандартных" условиях (микропробирка Eppendorf на 2,0 мл, "геометрия 1", время измерения в серии – 5 минут) до полного распада радионуклида. Чтобы  $^{111m}\text{Cd}$  находился в равновесии с материнским изотопом, элюирование проводили с интервалом не менее 6 часов. Скорость счета  $^{111m}\text{Cd}$  пересчитывали на начало элюирования.

При такой постановке эксперимента химический выход генератора можно рассчитать по формуле

$$\eta_{gen} = \frac{\left( I_{150,6}^{Cd} / I_{245,4}^{In} \right)_{gen}}{\left( I_{150,6}^{Cd} / \left( I_{245,4}^{In} \cdot \eta \right) \right)},$$

где  $\left( I_{150,6}^{Cd} / I_{245,4}^{In} \right)_{gen}$  – отношение скоростей счета  $^{111m}\text{Cd}$  по линии 150,6 кэВ в "геометрии 1" к скорости счета  $^{111}\text{In}$  в "геометрии 3" для исследуемого генератора на момент элюирования, имп./с;

$\left( I_{150,6}^{Cd} / \left( I_{245,4}^{In} \cdot \eta \right) \right)$  – то же отношение из экспериментов по определению величины  $\chi^{cd111m}$ .

Химический выход генератора можно также рассчитать, используя линию 171,3 кэВ  $^{111}\text{In}$ :

$$\eta'_{gen} = \frac{\left( I_{150,6}^{Cd} / I_{171,3}^{In} \right)_{gen}}{\left( I_{150,6}^{Cd} / \left( I_{171,3}^{In} \cdot \eta \right) \right)}.$$

Интенсивности линий 171,3 кэВ и 245,4 кэВ материнского изотопа в "геометрии 3" на момент элюирования рассчитывались из данных измерения  $^{111}\text{In}$  в этой геометрии перед нанесением на колонку.

Было проведено два эксперимента с активностью материнского изотопа в генераторах 2–3 мКи. В экспериментах доля несорбировавшегося на колонке  $^{111}\text{In}$  была менее 1%, а содержание материнского изотопа в получаемом препарате не превышало 0,6% от активности  $^{111m}\text{Cd}$ .

Отношения  $\left( I_{150,6}^{Cd} / I_{245,4}^{In} \right)_{gen}$  и  $\left( I_{150,6}^{Cd} / I_{171,3}^{In} \right)_{gen}$ , использованные в расчетах, являются усредненными по 10 элюированиям радионуклида  $^{111m}\text{Cd}$  из генератора.

Данные измерений и результаты расчета химического выхода генератора представлены в табл. 2.



Таблица 2. Химический выход генератора  $^{111}\text{In} \rightarrow ^{111\text{m}}\text{Cd}$

Эксперимент	Определение $\chi^{cd111\text{m}}$		Генератор	
	$\left(\frac{I_{150,6}^{Cd}}{I_{245,4}^n \cdot \eta}\right)$	$\left(\frac{I_{150,6}^{Cd}}{I_{171,3}^n \cdot \eta}\right)$	$\left(\frac{I_{150,6}^{Cd}}{I_{245,4}^n}\right)_{gen}$	$\left(\frac{I_{150,6}^{Cd}}{I_{171,3}^n}\right)_{gen}$
1	0,0165(11)	0,0127(8)	0,0169(8)	0,0131(7)
2	0,0165(15)	0,0125(11)	0,0168(9)	0,0130(8)
3	0,0167(14)	0,0128(10)	—	—
4	0,0176(23)	0,0137(18)	—	—
среднее	0,0167(6)	0,0128(5)	0,0169(4)	0,0130(6)
Химический выход, %			101(6)	102(7)

Видно, что предлагаемая схема генератора обеспечивает близкий к 100% химический выход дочернего изотопа (при элюировании его в объеме элюата, равного примерно 3 свободным объемам колонки).

Спектр одного из образцов  $^{111\text{m}}\text{Cd}$ , полученных из генераторов, приведен на рис. 3.

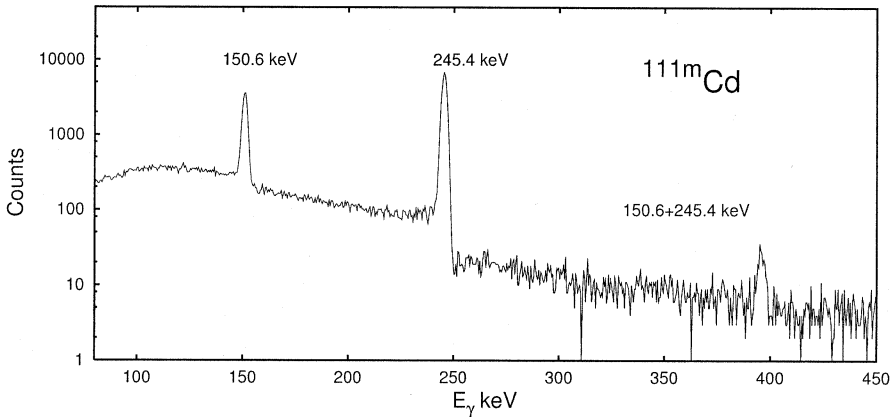


Рис. 3.  $\gamma$ -спектр  $^{111\text{m}}\text{Cd}$

В спектре  $\gamma$ -линия  $^{111}\text{In}$  171,3 кэВ отсутствует, что говорит о хорошей радиохимической чистоте получаемого изотопа.

Длительная (9 дней) эксплуатация генераторов показала, что в течение этого срока химический выход генераторов и загрязнение получаемого препарата материнским изотопом практически не изменяются.

---

Предлагаемый генератор  $^{111}\text{In} \rightarrow ^{111\text{m}}\text{Cd}$  с активностью материнского изотопа 200 мКи успешно эксплуатировался при проведении экспериментов по  $\gamma$ -ВУК с  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  в ЛЯП ОИЯИ [11].

### 3 Выводы

Впервые разработан изотопный генератор  $^{111}\text{In} \rightarrow ^{111\text{m}}\text{Cd}$ , который позволяет получать препараты  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  с высокой удельной активностью  $((1 \dots 2) \cdot 10^3$  Ки/г) и низким содержанием материнского радионуклида –  $^{111}\text{In}$  (менее 0,6% от основной активности  $^{111\text{m}}\text{Cd}$ ).

Используемая схема – экстракционная хроматографическая колонка на основе Д2ЭГФК – обеспечивает высокий химический выход ( $>95\%$ ) и стабильность характеристик генератора в течение его возможного срока эксплуатации (до 10 дней).

Естественный и не подлежащий изменению недостаток генератора – крайне низкая вероятность электронного захвата на изомерное состояние, которая по нашим данным составляет  $\chi^{cd^{111\text{m}}} = (6,01 \pm 0,14_{\text{стат.}} \pm 0,18_{\text{сист.}}) \cdot 10^{-5}$ . Из за этого для получения 20 мКи  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  необходима активность  $^{111}\text{In}$  в генераторе 300 – 400 мКи.

Предлагаемый радионуклидный генератор  $^{111}\text{In} \rightarrow ^{111\text{m}}\text{Cd}$  позволяет проводить эксперименты с  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  в лабораториях, находящихся на удалении от ядерных установок.

## Список литературы

- [1] de Briun M., Bode P. Application of  $\gamma\gamma$ -directional correlation measurements in trace element research // *Analysis*. 1983. vol.11. №2. p. 49–54.
- [2] Bauer R. et al. Metal site structure in a protein studied by differential perturbed angular correlations // *Physical Review Letters*. 1974. vol.32. p.340–342.
- [3] Bauer R. Perturbed angular correlation spectroscopy and its application to metal sites in proteins: possibilities and limitations // *Quarterly review of biophysics*. 1985. vol.18. p.1–64.
- [4] Tröger W., Butz T. Inorganic biochemistry with short-lived radioisotopes as nuclear probes // *Hyperfine Interactions*. 2000. vol.129. p.511–527
- [5] Lieser K.H. Chemische Gesichtspunkte für die Entwicklung von Radionuklidgeneratoren // *Radochimica Acta*. 1976. vol.23. №2. p.57–78.
- [6] Table of Isotopes. Eighth edition / Ed.: Firestone R.B., Shirley V.S. Published by John Wiley & Sons, Inc. 1996. 3168 p.
- [7] Экстракционная хроматография / Ред.: Браун Т., Герсини Г. М.: Мир, 1978. 627 с.
- [8] Философов Д.В. и др. Получение, концентрирование и глубокая очистка радиопрепаратов In-111: Препринт ОИЯИ Р6-99-282. Дубна, 1999. 4 с.
- [9] Chechev V.P., Kuzmenko N.K. The evaluation of decay and radiation characteristics of  $^{93m}\text{Nb}$ ,  $^{111}\text{In}$  and  $^{170}\text{Tm}$  in the framework of the international research program "Standards of X- and  $\gamma$ -RAYS" // *Nuclear Shells – 50 years: 49th meeting on nuclear spectroscopy and nuclear structure, Dubna 21-24 April 1999.*: Proc. of Int. Conf. World Scientific Publishing Co. Singapore. 1999. p.534–543.
- [10] Nuclear data sheets. Academic press. 1996. vol.77. №2. p.299
- [11] Аксельрод З.З. и др. Исследование возмущенных угловых корреляций в  $^{111}\text{Cd}$  в замороженных водных растворах  $^{111}\text{In}$  и  $^{111m}\text{Cd}$  // *Известия Академии наук. Серия физическая*. 2001. том 65. №7. с.1077–1080.

---

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 сентября 2001 года.

Философов Д.В. и др.

P12-2001-196

Радионуклидный генератор  $^{111}\text{In} \rightarrow ^{111\text{m}}\text{Cd}$

Создан радионуклидный генератор  $^{111}\text{In} \rightarrow ^{111\text{m}}\text{Cd}$ , характеризующийся химическим выходом  $> 95\%$  и загрязнением препарата  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  материнским изотопом ( $^{111}\text{In}$ ) менее  $0,6\%$  (от активности  $^{111\text{m}}\text{Cd}$ ). Для радиохимического разделения материнского и дочернего изотопов используется экстракционная хроматография с ди-2-этилгексилфосфорной кислотой в качестве экстрагента. Определена доля электронного захвата на изомерное состояние  $396\text{ кэВ}$  ( $^{111\text{m}}\text{Cd}$ ) при распаде  $^{111}\text{In}$ , которая составляет  $(6,01 \pm 0,14_{\text{стат}} \pm 0,18_{\text{сист}}) \cdot 10^{-5}$ .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

#### Перевод авторов

Filossofov D.V. et al.

P12-2001-196

Radionuclide Generator  $^{111}\text{In} \rightarrow ^{111\text{m}}\text{Cd}$

Radionuclide generator  $^{111}\text{In} \rightarrow ^{111\text{m}}\text{Cd}$  with chemical yield  $> 95\%$  and contamination of the  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  by parent isotope ( $^{111}\text{In}$ ) less than  $0.6\%$  (of  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  activity) is developed. Extraction chromatography with di-2-ethylhexyl-phosphoric acid as an extragent is used for the radiochemical separation of the parent and the daughter radionuclides. Probability of the electron capture on the isomeric level  $396\text{ keV}$  ( $^{111\text{m}}\text{Cd}$ ) in the  $^{111}\text{In}$  decay process is determinated to be  $(6.01 \pm 0.14_{\text{stat}} \pm 0.18_{\text{sys}}) \cdot 10^{-5}$ .

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор М.И.Зарубина. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 04.10.2001  
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 0,78  
Тираж 210. Заказ 52885. Цена 78 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области