

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



Ц8406
A-302

12/21-77
6 - 10892 e
+

4943/2-77

М.Адилбиш, Г.В.Винель, А.С.Ковалев, З.Ковач,
А.Ф.Новгородов, В.И.Фоминых, М.И.Фоминых

ЭКСПРЕССНАЯ ОБРАБОТКА ГАММА-СПЕКТРОВ
В РАДИОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ
С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ЭПОС-1 НА ЭВМ МИНСК-2

1977

6 - 10892

М.Адилбиш, Г.В.Винель, А.С.Ковалев, З.Ковач,

А.Ф.Новгородов, В.И.Фоминых, М.И.Фоминых

ЭКСПРЕССНАЯ ОБРАБОТКА ГАММА-СПЕКТРОВ
В РАДИОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ
С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ЭПОС-1 НА ЭВМ МИНСК-2



Адилбиш М. и др.

6 - 10892

Экспрессная обработка гамма-спектров в радиохимических исследованиях с помощью программы ЭПОС-1 на ЭВМ Минск-2

Обсуждаются погрешности определения относительного содержания радиоактивных элементов экспрессным γ -спектрометрическим методом анализа, основанным на использовании программы ЭПОС-1. Коэффициент вариации рассматриваемого метода, характеризующий его точность, лежит в пределах 2,5-8,0% для определения относительного содержания многих радиоизотопов в их сложной смеси, образующейся при облучении металлического серебра протонами с энергией 660 МэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

© 1977 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка быстрых и селективных химических методов выделения короткоживущих радионуклидов из их сложных смесей, образующихся в ядерных реакциях, немыслима без оперативного анализа химического поведения всех элементов в условиях эксперимента. Применение для этой цели полупроводниковых детекторов, обеспечивших развитие и широкое использование неdestructивных методов анализа /активационного и рентгенофлуоресцентного/ привело к необходимости существенного увеличения скорости обработки обширной спектрометрической информации. Так, например, обычный радиохимический эксперимент в отделе ядерной спектроскопии и радиохимии Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ по изучению газотермохроматографического поведения продуктов ядерных реакций глубокого расщепления требует проведения за 5-8 ч γ -спектрометрического анализа 100-150 образцов, содержащих несколько десятков радионуклидов, в том числе и генетически связанных. Обработка такого объема информации невозможна без ее хотя бы частичной автоматизации, причем желательно, чтобы она занимала время, не превышающее времени измерения образца /"on-line"-режим/, и обеспечивала получение достаточно надежных результатов в ходе эксперимента.

К настоящему времени известно несколько автоматических программ экспрессной обработки γ -спектров на ЭВМ различных мощностей и быстродействия^{/1-4/}. Наличие в ОЯС и РХ Лаборатории ядерных проблем

ЭВМ Минск-2 с оперативной памятью 8К, четырьмя магнитофонами и низкоскоростными выводными устройствами /перфоратор, узкая печать/ определило выбор автоматической программы обработки γ -спектров, использующей наиболее простые в математическом отношении алгоритмы. В течение ряда лет при проведении радиохимических исследований нами успешно использовалась первая часть экспресс-программы обработки спектров /ЭПОС-1/, алгоритмы которой описаны в работах ^{/5-7/} и с небольшими изменениями выполнены в кодах ЭВМ Минск-2. Выбор этой программы обусловлен еще и тем, что в дальнейшем предполагается использование автоматической программы ЭПОС в полном ее объеме ^{/8/} на ЭВМ с большими, чем у Минск-2, оперативной памятью и быстродействием.

Настоящая работа посвящена применению автоматической программы ЭПОС-1 в экспрессном γ -спектрометрическом методе анализа сложных по радионуклидному составу смесей. В работе дан анализ ошибок, возникающих не только при определении площадей под фотопиками в реальных γ -спектрах программой ЭПОС-1, но и вызванных методикой измерения и самой спектрометрической аппаратурой. Воспроизводимость /или точность/ рассмотренного γ -спектрометрического метода характеризовалась, согласно ^{/9/}, коэффициентом вариации, значение которого позволяет рассчитывать погрешности определенных этим методом величин для заданных доверительных вероятностей /например, для принятых в химическом анализе $\alpha = 0,95$ или $\alpha = 0,99$ ^{/10/}.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММЫ ЭПОС-1

Простая в обращении программа ЭПОС-1 обрабатывает спектр за 2-3 мин с учетом времени, необходимого для записи спектра на магнитную ленту, вывода результатов на цифropечать и операций экспериментатора за пультом ЭВМ Минск-2. Память ЭВМ распределяется во время работы ЭПОС-1 следующим образом:

4К занимает обрабатываемый γ -спектр; 2,5К - программа, причем 1К отведено под управляющую программу, а 1,5К - под осуществляющие отдельные алгоритмы обработки подпрограммы, которые из-за ограниченности оперативной памяти Минск-2 выполнены в двух частях и попеременно вызываются управляющей программой с магнитной ленты. Оставшиеся 1,5К занимают результаты обработки спектра - параметрами найденных пиков /не более 200 в спектре/.

Исходные данные, требуемые от экспериментатора перед обработкой очередного спектра, минимальны и сообщаются программе набором ключей и клавиш на пульте ЭВМ. Они включают в себя номер магнитофона и зоны записи-считывания спектра, а также выбранный режим работы программы - режим внешней или внутренней энергетической калибровки. В последнем случае коэффициенты прямой, характеризующие зависимость энергии от номера канала, получаются путем автоматического установления соответствия найденных программой положений максимумов пиков в калибровочном спектре и вводимых через фотоввод значений энергий некоторых γ -линий /не менее шести/ в этом спектре^{/7/}. При обработке серии спектров коэффициенты энергетической калибровки, найденные в режиме внешней калибровки, могут сохраняться в памяти ЭВМ. Если обработка по какой-либо причине прерывается, то существует возможность ввода коэффициентов энергетической калибровки с пульта ЭВМ или через фотоввод. Порог чувствительности к поиску пиков программой ЭПОС-1 может задаваться либо с пульта ЭВМ, либо автоматически выбирается программой так, что пиками считаются отклонения от фона, превышающие значения статистической ошибки в 5 раз.

Результатами обработки, которые выдаются на цифropечать, являются полуширины найденных пиков /в каналах/, положения максимумов пиков /в каналах/, амплитуды пиков /в импульсах/, энергии пиков /в кэВ/, площади под пиками - ППП /в импульсах/ оценки ошибок определения энергий /в кэВ/ и площадей /в %/.

Программа ЭПОС-1 включена в библиотеку рабочих программ ЭВМ Минск-2. К настоящему времени с ее

помощью обработано свыше 10000 реальных спектров, измеренных на полупроводниковых γ -спектрометрах^{/11,12/}.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения γ -спектров проводились на спектрометре /разрешение 2,0-2,5 кэВ/, основными элементами которого являлись Ge(Li) - детектор /объем - 38 см³/ и многоканальный анализатор АИ-4096, связанный с ЭВМ Минск-2^{/13/}. Спектрометрический тракт включал в себя прецизионный блок, обеспечивающий определение и индикацию отношения величин "живого" и реального времени измерений, а при работе в автоматическом режиме - проведение измерений по фиксированному "живому" времени в диапазоне от 1 до 40 мин. Проверка работы этого блока проводилась путем измерения площадей под фотопиками отдельных γ -линий образцовых спектрометрических гамма-источников /ОСГИ/ - ⁶⁰Со, ⁵⁴Mn и ¹³⁹Ce в фиксированной "геометрии". Загрузка тракта менялась в широком диапазоне одновременной "подсветкой" детектора γ -излучением других радиоизотопов - ⁵⁷Со, ¹³⁷Cs и ²⁰³Hg, а "живое" время измерений составляло 122 с, что приблизительно равно времени обработки спектра на ЭВМ Минск-2 с помощью программы ЭПОС-1. Площади под пиками /ППП/ определялись с помощью программы КАТОК^{/14/}, которая в течение последних лет успешно применяется для прецизионной обработки γ -спектров^{/15/}. Из результатов, приведенных в табл. 1, можно видеть, что погрешности определения ППП в широком диапазоне загрузки характеризуются коэффициентом вариации /квадратичным отклонением/, равным 1,2%.

Гамма-спектрометрическое определение выхода и селективности радиохимических методов выделения элементов из сложных по радионуклидному составу смесей предполагает измерения образцов, отличающихся по суммарной активности в 100-1000 раз, что вызывает необходимость сопоставления измерений в различной "геометрии". Поэтому было проведено определение зависи-

Т а б л и ц а 1
Проверка работы блока, задающего фиксированное "живое" время измерений. $\tau = 122$ с.

Радионуклид.	Энергия измеряемого γ -перехода, кэВ.	Радионуклиды, создающие "искусственный" фон.	Загрузка, имп/с.	Реальное время измерения, с.	Площадь под фотопиком измеряемого γ -перехода.*
⁶⁰ Со	1332,5	⁵⁷ Со, ¹³⁷ Cs, ¹³⁹ Ce, ²⁰³ Hg	$1,31 \cdot 10^3$	145,95	4159±67
	1332,5	- " -	$1,21 \cdot 10^4$	247,98	4197±71
	1332,5	- " -	$1,20 \cdot 10^5$	1360,96	4219±80
⁵⁴ Mn	834,8	⁶⁰ Со	$5,2 \cdot 10^2$	130,12	5100±85
	834,8	- " -	$9,3 \cdot 10^3$	175,76	5140±86
¹³⁹ Ce	165,8	⁶⁰ Со	$1,50 \cdot 10^3$	142,24	49078±512
	165,8	- " -	$1,48 \cdot 10^4$	338,96	50587±497

*) Площадь определялась программой КАТОК.

мости эффективности регистрации γ -квантов от расстояния между используемым нами детектором и точечными источниками /ОСГИ/. Обработка γ -спектров проводилась с помощью программы КАТОК. Результаты могут быть представлены следующей эмпирической зависимостью:

$$K_{\alpha=0,99} = [1 + (0,421 \pm 0,009) \cdot R]^2, \quad /1/$$

где K - коэффициент пересчета на "О"-геометрию, а R - расстояние от крышки детектора до источника /см/. Квадратичное отклонение значений коэффициента пересчета на "О"-геометрию с учетом отклонений определения "живого" времени, равно 1,7%.

4. ПРОВЕРКА РАБОТЫ ЭПОС-1

Программа ЭПОС-1 предназначена для предварительной обработки γ -спектров. Наиболее достоверные результаты поэтому могут быть получены для одиночных неперекрывающихся пиков. Из всех параметров пиков, найденных при обработке спектров программой ЭПОС-1, нас интересовали прежде всего ППП определенных γ -линий, служащие в дальнейшем основой интерпретации поведения отдельных элементов.

Ранее программа ЭПОС-1 проверялась на большом количестве конструированных спектров^{/16/}, пики в ко-

торых описывались гауссианами^{16/}. Вычисленное для одиночных пиков среднее квадратичное отклонение определенных в этой работе^{16/} ППП от истинного задаваемого значения составляло 3,5%. В работе^{17/} приведены определенные с помощью ЭПОС-1 интенсивности γ -линий ²²⁶Ra, среднеквадратичное отклонение которых от табличных значений составляет 8,5%. Следует, однако, учитывать, что ошибка эта включает погрешности и табличных значений и определения эффективности полупроводникового детектора. В данной работе рассмотрены ошибки определения ППП программой ЭПОС-1 при обработке реальных γ -спектров как отдельных радионуклидов, так и их смесей. Для сравнения использовались ППП, определенные программой КАТОК.

В табл. 2 представлены результаты обработки этими программами γ -спектров излучения ОСГИ - ²²Na, ⁸⁸Y, ¹³⁷Cs и ²⁰³Hg, измеренных в фиксированной "геометрии" сначала отдельно, а затем всех вместе. Обработка γ -спектров программой ЭПОС-1 проводилась при двух порогах чувствительности: 1,000 и автоматическом. Видно, что ППП, определенная программой ЭПОС-1, меньше "истинной" /определенной программой КАТОК/. Кроме того, она ближе к ППП /КАТОК/ для более сложных спектров /суммарные измерения/, чем для простых /отдельные измерения/. Это можно объяснить, вероятно, "сглаживанием" фона за счет суммирования комптоновского рассеяния многих γ -квантов. В радиохимических исследованиях интерес, как правило, представляют не абсолютные, а относительные измерения, поэтому в табл. 2 включены отношения ППП /суммарные измерения/ к ППП /отдельные измерения/. Квадратичное отклонение этих отношений зависит от порога чувствительности программы ЭПОС-1 к поиску пиков и составляет 6-9%, причем очевидно преимущество работы с автоматическим порогом. Следует помнить, что в ошибку определения отношений ППП, представленных в табл. 2, входит ошибка определения "живого" времени.

Более полно влияние порога чувствительности на результаты обработки γ -спектра программой ЭПОС-1 демонстрируется табл. 3, в которой представлены ППП

Т а б л и ц а 2

Результаты обработки программой КАТОК и ЭПОС-1 гамма-спектров ОСГИ, измеренных в фиксированной геометрии отдельно и вместе. Пороги чувствительности программы ЭПОС-1 - 1,000 и автоматический. $\tau = 418$ с.

Радионуклид.	Энергия измеряемого γ -пиксела, кэВ.	ППП, определенные различными программами.				Отношение ППП, определенных по программе ЭПОС-1, к ППП, определенным по программе КАТОК.		Отношение ППП в суммарных измерениях к ППП в отдельных измерениях при использовании различных программ.				
		отдельные измерения		суммарные измерения		суммарные измерения		различные программы.				
		ЭПОС-1	КАТОК	ЭПОС-1	КАТОК	1,000	автом.	ЭПОС-1	КАТОК			
²⁰³ Hg	279,2	4681	4468	4550	4243	1,019	0,972	1,002	0,934	0,972	0,950	0,989
		±129	±149	±110	±111							
²² Na	511,0	5688	49690	53411	53411	0,903	0,789	0,933	0,855	1,025	1,075	0,992
		±657	±681	±741	±729							
¹³⁷ Cs	661,6	35682	42034	42256	40892	0,822	0,968	0,999	0,967	1,184	0,973	0,974
		±584	±470	±475	±498							
⁸⁸ Y	894,0	3940	3748	3844	3756	1,020	0,970	1,003	0,974	0,976	0,997	0,992
		±156	±154	±199	±201							
²² Na	1274,5	9670	7980	9067	8679	0,925	0,851	0,981	0,939	1,046	1,089	0,986
		±244	±243	±222	±238							
⁸⁸ Y	1836,1	1616	1393	1467	1324	0,964	0,851	0,947	0,855	0,908	0,950	0,924*
		±99	±120	±113	±122							
ЗНАЧЕНИЯ ОТНОШЕНИЙ ППП ($\Delta = 0,95$)		0,942	0,897	0,942	0,942	0,942	0,897	0,978	0,921	1,019	1,006	0,986
ЗНАЧЕНИЯ ОТНОШЕНИЙ ППП ($\Delta = 0,99$)		±0,080	±0,087	±0,056	±0,056	±0,125	±0,136	±0,050	±0,088	±0,155	±0,101	±0,015

*) Значение исключено при статистической обработке результатов.

Таблица 3

Зависимость ППП, определенных программой ЭПОС-1, от порога чувствительности и сравнение их с ППП, определенными программой КАТОК. Источник γ -излучения - серебро, облученное протонами с энергией 660 МэВ. $\tau = 418$ с.

Энергия, кэВ.	Радио-нуклид.	ППП, определенные программой ЭПОС-1 при различных порогах чувствительности.										ППП, определенные программой КАТОК.
		автомат.	0,75	0,975	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	16,000	
74,9	¹⁰⁰ Pd	15711	14250	14290	14139	14130	13473	13395	13395	-	-	15297
94,0	¹⁰⁰ Pd	20754	18409	18409	14581	18357	18171	18332	18305	-	-	19573
126,1	¹⁰⁰ Pd	4390	4390	4390	4390	4329	-	-	-	-	-	4751
141,2	⁹⁰ Nb	6362	6362	6340	6021	6021	6021	6021	-	-	-	6313
215,2	¹⁰⁷ Ru	53463	53463	53463	53272	51423	51423	51423	49862	46819	-	52635
280,3	¹⁰⁵ Ag	3785	3924	3924	3942	3942	3942	-	-	-	-	3930
306,8	^{101m} Rh	38710	38710	38710	37860	37860	37860	37860	37788	32023	-	38956
324,4	⁹⁷ Ru	2969	2704	2703	2822	2822	2822	2822	-	-	-	3099
344,2	¹⁰⁵ Ag	3098	3098	3054	3054	3159	3170	-	-	-	-	3181
450,6	^{106m} Ag	3310	3345	3345	3310	3310	1888*	1888*	-	-	-	3453
494,7	⁸⁷ Y	12282	12282	12282	12282	12208	11369	12208	12208	11969	-	12507
539,6	¹⁰⁰ Pd(¹⁰⁰ Ru)	9646	9672	9672	9966	9656	9656	9656	9656	9252	-	9760
615,9	^{106m} Ag	1447	1487	1487	1487	1422	-	-	-	-	-	1913
774,3	⁹⁶ Tc	3366	3366	3310	3311	3311	3311	3311	3311	-	-	3366
812,8	⁹⁶ Tc	2854	2854	2854	2834	2904	2597	2597	-	-	-	2830
850,3	⁹⁶ Tc	3162	3162	3162	3162	3096	3096	3117	-	-	-	3279
909,1	⁸⁹ Zr	5948	5948	5948	5948	5948	5471	5766	5766	-	-	6182
1045,1	^{106m} Ag	1082	1082	1082	1082	1034	-	-	-	-	-	1121
Комплексно найденных пиков.		86	73	62	52	32	20	16	10	7	2	
Средние полуширины пиков, кэВ.		4,45	4,57	4,62	4,34	4,22	4,20	4,27	4,24	4,12	3,70	
Отношение ППП(ЭПОС-1) и ППП(КАТОК), \pm 40,95.		0,386 20,1018	0,370 20,1019	0,370 20,1014	0,365 20,1014	0,359 20,1022	0,346 20,1019	0,351 20,1019	0,357 20,1022	0,359 20,1014	0,356 20,1026	
Отношение ППП(ЭПОС-1) и ППП(КАТОК), \pm 40,95.		0,386 20,1022	0,370 20,1024	0,370 20,1024	0,365 20,1019	0,359 20,1020	0,346 20,1031	0,351 20,1027	0,357 20,1033	0,359 20,1025	0,356 20,1130	

* Значения исключены при статистической обработке результатов.

только для одиночных пиков. Можно показать, что значения ППП, определенные с автоматическим порогом чувствительности, наиболее близки к "истинным" /КАТОК/, а погрешности определения их отношения к ППП /КАТОК/ характеризуются квадратичным отклонением 3,3%. Таким образом, благодаря обработке γ -спектров программой ЭПОС-1 с автоматическим порогом чувствительности:

а/ значения ППП более близки к "истинным" и определяются с меньшей погрешностью;

б/ отпадает необходимость дублирования обработки одного и того же спектра с различными порогами чувствительности;

в/ возрастает вероятность нахождения программой слабовыраженных пиков.

Приведенные в табл. 1-3 результаты позволили оценить случайные ошибки экспрессного γ -спектрометрического анализа, применяемого в радиохимических исследованиях. Вклады отдельных операций в общую погрешность этого анализа /определения ППП в γ -спектрах/ можно охарактеризовать следующими коэффициентами вариации /средними квадратичными отклонениями/:

1. Задание фиксированного "живого" времени измерений - 1,2%.

2. Пересчет на "О"-геометрию - 1,7%.

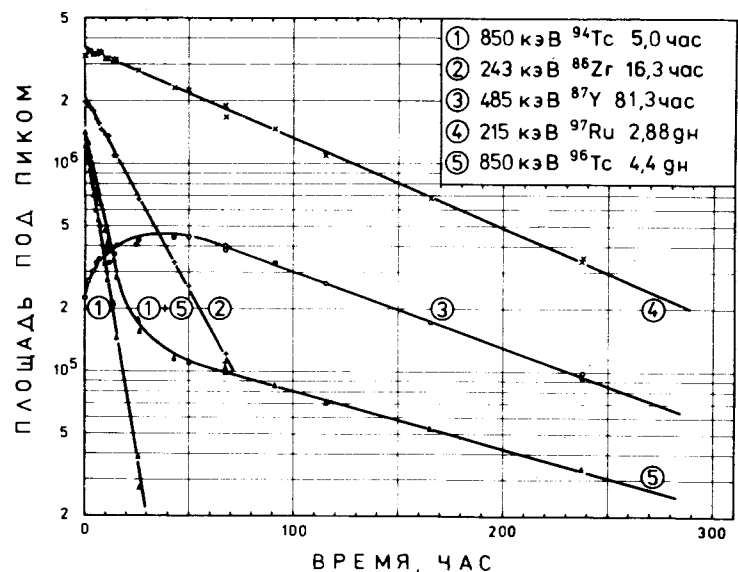
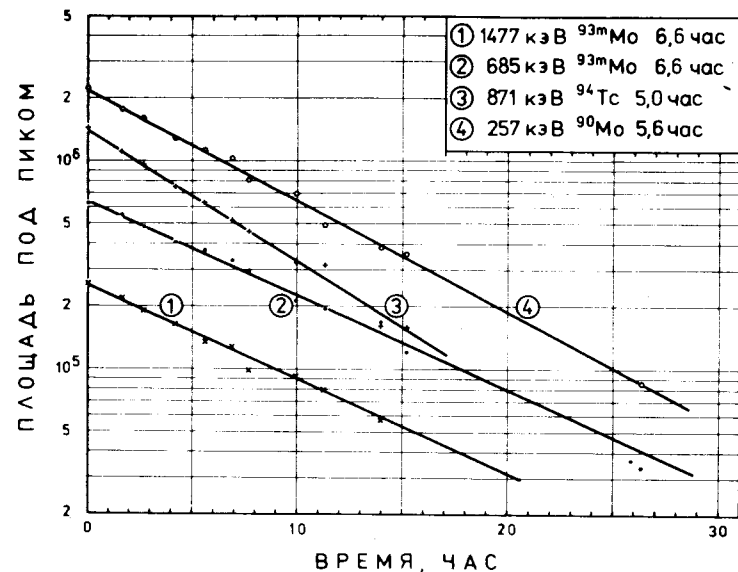
3. Обработка γ -спектров программой ЭПОС-1 - 3,3%.

Таким образом, коэффициент вариации рассматриваемого метода определения относительного содержания радионуклидов в модельных смесях равен 3,9%. Он зависит от многих факторов, и, в первую очередь, от качества спектрометра, сложности изучаемой смеси, схемы распада определяемого радионуклида, времени измерения и используемых в программе обработки спектра алгоритмов. Поэтому воспроизводимость применяемого нами в радиохимических исследованиях экспрессного γ -спектрометрического метода проверялась на реальной смеси продуктов ядерных реакций глубокого расщепления. На рисунках представлены результаты многодневных измерений и обработки γ -спектров излучения образца металлического серебра, облученного протонами с энергией 660 МэВ. Измерения начинались спустя 7 ч после конца облучения, обработка γ -спектров проводилась программой ЭПОС-1 с автоматическим порогом чувствительности. Общая активность облучаемого образца падала за время измерений ~ в 100 раз, поэтому первое измерение проводилось при R = 40 см, а последнее - при R = 3 см. ППП пересчитывались на "О"-геометрию по /1/. На рисунках даны также периоды полураспада ряда радионуклидов, которые определялись по наклону прямолинейных зависимостей логарифмов ППП от времени, найденных методом наименьших квадратов /МНК/. Определенные таким образом $T_{1/2}$ не отличаются от табличных более чем на 5%. Среднее

квадратичное отклонение всех отдельных определений ППП /относительно полученных МНК прямых/ составляет 5,0% и близко к значению, определенному по отдельным операциям /3,9%/. Для различных γ -линий радионуклидов в изучаемой смеси оно может быть разным. Так, среднее квадратичное отклонение для γ -линий с энергией 257 кэВ (^{90}Mo) 485 кэВ (^{87}Y) и 909 кэВ (^{89}Zr) составляет соответственно 7,9; 2,6 и 4,1%.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенным результатом проведенной работы является оценка погрешностей определения величин, характеризующих радиохимические методы /химический выход, загрязнения и т.п./, рассмотренным экспрессным γ -спектрометрическим методом анализа. Ясно, что для $\alpha = 0,95$ при коэффициенте вариации 5% погрешность определения относительного содержания элемента не будет превышать 10% только в том случае, если в γ -спектрах сравниваемых образцов находится не менее 2-3 неперекрывающихся одиночных γ -линий, принадлежащих изотопам данного элемента. Поэтому при подготовке радиохимических исследований со сложными смесями относительно короткоживущих радионуклидов выбор γ -линий, пригодных для идентификации поведения изучаемых элементов, должен основываться не только на литературном анализе спектроскопических данных, например, по каталогу^{/18/}. Желательно проведение измерений $T_{1/2}$ выбранных γ -линий, что позволяет определить основную величину, характеризующую точность используемого метода анализа, - коэффициент вариации. При работе с искусственно создаваемыми смесями долгоживущих изотопов проверка точности метода может состоять в анализе результатов измерений и обработки γ -спектров образцов заранее известных варьируемых составов.



Определение $T_{1/2}$ некоторых спалогенных радионуклидов в их смеси, образующейся в облученном серебре. "Живое" время измерений - 418 с.

Авторы благодарят А.Колачковского за помощь при обработке результатов, а также Н.Г.Зайцеву, В.Г.Чумина и В.А.Халкина за ряд ценных замечаний при обсуждении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mariscotti M.A. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1967, 50, 2, p.309.
2. Philippot J.C. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, NS-17, 3, 446 (1970).
3. Фромм В.-Д. ОИЯИ, 10-9094, Дубна, 1975.
4. Schubiger P.A. e.a. *J.Radioanal. Chem.*, 1975, 25, 1, p.141.
5. Элер Г. и др. ОИЯИ, Р10-6817, Дубна, 1972.
6. Элер Г. и др. ОИЯИ, Р10-6818, Дубна, 1972.
7. Элер Г. и др. ОИЯИ, Р10-6819, Дубна, 1972.
8. Винель Г.В., Цупко-Ситников В.М., Элер Г. ОИЯИ, 10-10843, Дубна, 1977.
9. Алексеев Р.И., Коровин Ю.И. Руководство по вычислению и обработке результатов количественного анализа. Атомиздат, М., 1972.
10. Лайтинен Г.А. Химический анализ. Изд. "Химия", М., 1966.
11. Вахтель В.М. и др. *Isotopenpraxis*, 1976, 12, 11, p.441.
12. Баяр Б. и др. ОИЯИ, Р6-10305, Дубна, 1976.
13. Владимиров В.А. и др. ОИЯИ, 10-4630, Дубна, 1969.
14. Гаджоков В. ПТЭ, 1970, №5, с.82.
15. Вылов Ц. ОИЯИ, Р6-10417, Дубна, 1977.
16. Элер Г. и др. ОИЯИ, Р10-7365, Дубна, 1973.
17. Хабенихт В. и др. ОИЯИ, Р10-7614, Дубна, 1973.
18. Erdtmann G., Souka W. *Die γ -Linien der Radionuklide*. Jul-1003-AC, April, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 июля 1977 года.