

С 44Г  
Д - 81

3/11-72

12 - 6221

1088/2-72

И. Дуда, И.В. Дудова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ  
 $\text{Ge}^{76}(n, 2n) \text{Ge}^{75m}$  ДЛЯ ЭКСПРЕССНОГО  
АКТИВАЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕРМАНИЯ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

12 - 6221

И. Дуда, И.В. Дудова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ  
 $\text{Ge}^{76}(\text{n}, 2\text{n}) \text{Ge}^{75\text{m}}$  ДЛЯ ЭКСПРЕССНОГО  
АКТИВАЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕРМАНИЯ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Значение полупроводникового германия для современной техники, в том числе атомной, трудно переоценить. При получении германия сверхвысокой чистоты для производства транзисторов и изготовления полупроводниковых детекторов в последнее время все чаще используются германийорганические соединения, обладающие рядом и других ценных свойств. Некоторые из них используются как добавки, улучшающие спектрометрические свойства органических сцинтилляторов, другие являются катализаторами, активаторами ряда химических реакций. Многие из этих соединений образуют прочные защитные пленки или применяются в качестве смазок, теплоносителей, антиоксидантов.

Более быстрому развитию органической химии германия серьезно мешает отсутствие экспрессных методов анализа этих элементорганических соединений. Определение содержания германия в них производится обычно методами неорганического анализа после минерализации образца. Минерализацию осуществляют путем мокрого сжигания <sup>/1/</sup>, щелочным плавлением в бомбе <sup>/2,3/</sup> или термическим разложением в кислороде <sup>/4,5/</sup>. Описанные методы позволяют получать надежные результаты, но являются трудоемкими и недостаточно быстрыми. Потеря вещества при разложении может быть нежелательным фактом для химика-синтетика, особенно при анализе соединений, полученных путем сложного синтеза с малым выходом продукта. Кроме того, операцию разложения вещества, кажущуюся на первый взгляд несложной, далеко не всегда удается произвести количественно.

Процесс минерализации позволяют обойти разработанные к настоящему времени прямые методы определения германия в германий-органических соединениях – метод спектрального анализа /6/ и метод поглощения рентгеновских лучей /7/. При спектральном анализе, однако, происходит израсходование анализируемого вещества, а метод /7/ пригоден только для жидких образцов.

Требующие значительно меньшего количества вещества предлагаемые нами для определения германия инструментальные варианты метода нейтронно-активационного анализа с использованием как тепловых нейтронов реактора /8/, так и быстрых нейтронов генератора, этих недостатков лишены.

Быстрые нейтроны на ядрах стабильных изотопов германия вызывают ядерные реакции типа  $(n, p)$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, \alpha)$ , в результате которых образуется смесь радиоактивных и стабильных изотопов германия, галлия и цинка /9,10/.

Расчет и экспериментальные данные, полученные при облучении металлического германия и двуокиси германия быстрыми нейтронами, показывают, что определение германия по наведенной активности радионуклидов  $Ge^{75}$ ,  $Ga^{74}$  и изомера  $Ge^{75m}$  может быть достаточно быстрым и чувствительным /11,12/.

В данной работе описана методика и приведены результаты экспрессного неструктивного определения германия в органических соединениях инструментальным активационным методом с помощью быстрых нейтронов генератора по изомеру  $Ge^{75m}$  ( $T_{1/2} = 49$  сек,  $E_{\gamma} = 139$  кэв), образующемуся с сечением 730 мб в ядерной реакции  $Ge^{76}(n, 2n)Ge^{75m}$ .

#### Экспериментальная часть

Источником быстрых нейтронов служил нейтронный генератор НГ-200 с тритированной циркониевой мишенью. Поток быстрых нейтронов с энергией  $\approx 14,5$  Мэв, получаемых по ядерной реакции  $H^3(d, n)He^4 + 17,5$  Мэв, на минимальном расстоянии от мишени, на позиции облучения, составлял  $1-2 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup> сек в зависимости от ионного тока дейтронов и актив-

ности тритиевой мишени. Величина нейтронного потока определялась по наведенной активности позитронного излучателя  $Cu^{62}(\beta^+, E_{\gamma} = 511 \text{ кэВ}$   $T_{1/2} = 9,8 \text{ мин})$  медного монитора, облучаемого одновременно с образцом. В качестве мониторов использовалась фольга электролитической меди размерами  $10 \times 5 \times 0,07 \text{ мм}$ . Постоянство геометрии мишень-образец-монитор при всех облучениях строго соблюдалось. Независимым монитором служил счетчик протонов отдачи, возникающих в результате упругих столкновений быстрых нейтронов с атомами водорода полиметилметакрилата. Счетчик состоял из детектора ПММА- $ZnS/Ag$ , помещенного на расстоянии 2 м от мишени, и пересчетного прибора ПСТ-100.

В качестве стандартов использовались тонкие пластинки ( $d = 0,07 - 0,3 \text{ мм}$ ) металлического германия полупроводниковой чистоты (Тесла Рожнов, ЧССР) и двуокись германия квалификации "ос. ч". Образцами являлись смеси двуокиси германия с порошкообразными органическими веществами квалификации "х. ч", имитирующие германий-органические соединения.

Объекты облучались в тройных полиэтиленовых пакетах размерами  $1 \times 1 \text{ см}$ , изготовленных из пленки  $d = 0,08 \text{ мм}$  обычного промышленного качества.

Для измерения наведенной активности объектов использовался сцинтилляционный гамма-спектрометр, основными частями которого являлись кристалл  $NaJ/Tl$   $40 \times 40 \text{ мм}$  с фотоумножителем  $RCA - 6342A$  и анализатор импульсов АИ-128 с цифропечатающим устройством. Кристалл с фотоумножителем размещались в защитном свинцовом домике с внешними размерами  $25 \times 30 \times 35 \text{ см}$  и толщиной стенки 5 см. Внутренняя часть домика была облицована листовым кадмием ( $d = 1 \text{ мм}$ ) и медью ( $d = 0,2 \text{ мм}$ ) для снижения интенсивности паразитного рассеянного излучения.

Энергетическая калибровка прибора производилась с помощью спектрометрических стандартов  $Am^{241}$  (60 кэВ),  $Ce^{144}$  (80 и 134 кэВ),  $Ba^{133}$  (356 кэВ),  $Na^{22}$  ( $\beta^+$ , 511 кэВ),  $Cs^{137}$  (662 кэВ) и  $Co^{60}$  (1170 и 1330 кэВ). Энергетическая шкала была линейной, один канал в зависимости от работы спектрометра соответствовал 5,8 - 12,4 кэВ. Разрешающая способность прибора по линии 662 кэВ  $Cs^{137} \approx 11,2\%$ .

Геометрия объект-кристалл была строго фиксирована. Через минуту после измерения активности объектов измерялась активность медных мониторов. Медная фольга при этом находилась между двумя пластинками фторопласта-4 размерами 30x30x 5 мм, которые обеспечивали полную аннигиляцию позитронов уже в непосредственной близости от мониторов.

На рис. 1 представлены типичные гамма-спектры в области 0-700 кэВ образца германия весом 138,7 мг, облученного в течение 5 мин потоком  $2,1 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup>сек, снятые через 1,41, 61 и 345 мин. после конца облучения при времени набора 5 мин. В спектре отчетливо выделяются 4 фотопика с энергиями 139, 265, 500 - 511 и 600 кэВ.

В данных условиях с наибольшим выходом образуется короткоживущая активность с энергией фотопика 139 кэВ. Для определения периода ее полураспада было проведено 5-минутное облучение образца германия весом 126,0 мг. Гамма-спектры образца измерялись через 60, 100, 140, 175, 220, 260, 295, 335, 415, 460 и 520 секунд после конца облучения при времени набора 15 секунд. На рис. 2 приведены спектры, полученные в первых шести измерениях, и кривая распада "1" исследованного пика 139 кэВ. Кривая "2", полученная вычитанием фона, приводит к значению  $T_{1/2} = 49$  сек, совпадающему с табличным значением <sup>13/</sup> периода полураспада изомера  $Ge^{75m}$ .

В отличие от фотопика 139 кэВ, принадлежащего исключительно радиоактивному изомеру  $Ge^{75m}$ , фотопики 2,3 и 4 (рис. 1) оказались сложными. Для выяснения их природы были проведены дополнительные кратковременные облучения (5-10 мин.) двух очередных образцов германия с последующими 5-15-минутными многократными измерениями гамма-спектров в течение продолжительного времени. В результате анализа полученных кривых распада было найдено, что фотопик 265 кэВ является суперпозицией интенсивной гамма-линии 265 кэВ радиоизотопа  $Ge^{75g}$  и значительно менее интенсивной линии 295 кэВ радиоизотопа  $Ga^{73}$ . Изотоп  $Ge^{75g}$  образуется путем изомерного перехода из  $Ge^{75m}$ , а также в ядерной реакции  $Ge^{76}(n,2n)Ge^{75g}$ , изотоп  $Ga^{73}$  образуется в реакции  $Ge^{73}(n,p)Ga^{73}$ .

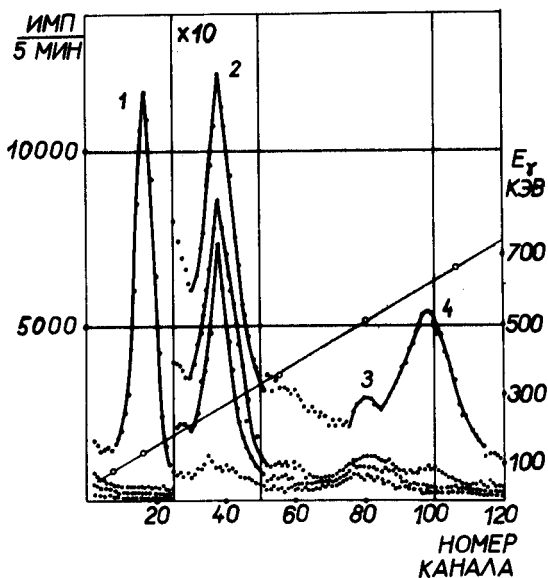


Рис. 1. Участок гамма-спектра германия 0 - 700 кэв. 1,2,3,4, - фотопики 139, 265, 500 - 510 и 600 кэв соответственно. Кристалл  $NaI/Tl$  40x40 мм, разрешающая способность 11,2% (по линии 662 кэв).

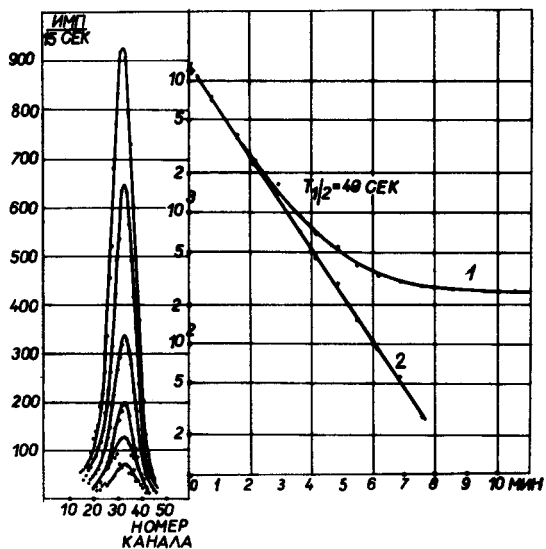


Рис. 2. Распад фотопика 139 кэв. 1 - кривая распада, полученная в эксперименте, 2 - кривая после вычитания фона.

Структура фотопика в области 500 – 510 кэв еще более сложна. Кроме найденных нами  $Ga^{74}$  (линия 500 кэв),  $Zn^{71}$  (линия 510 кэв) и аннигиляционного излучения  $Ge^{69}$  ( $E_\gamma = 511$  кэв) некоторый вклад в этот фотопик вносят и  $Ge^{75g}$  (слабая линия 477 кэв) и аннигиляционное излучение позитронного излучателя  $N^{13}$ . Перечисленные изотопы образуются в реакциях быстрых нейтронов или протонов отдачи:

$Ge^{74}(n,p)Ga^{74}$ ;  $Ge^{74}(n,\alpha)Zn^{71}$ ;  $Ge^{70}(n,2n)Ge^{69}$ ;  $N^{14}(n,2n)N^{13}$ ;  $C^{13}(p,n)N^{13}$ ;  $O^{16}(p,\alpha)N^{13}$ .

Фотопик 600 кэв является наложением интенсивной  $\gamma$ -линии  $Ga^{74}$  (600 кэв) и двух линий (601 и 630 кэв) более долгоживущего  $Ga^{72}$ , образующегося в реакции  $Ge^{72}(n,p)Ga^{72}$ .

Найденные в данной работе периоды полураспада радиоизотопов (табл. 1) находятся в пределах ошибок эксперимента в хорошем согласии с табличными данными.

Так как выход короткоживущего  $Ge^{75m}$  превышал на 1 – 2 и более порядков выходы других радиоизотопов, количественное определение германия производилось по этому изомеру.

Ввиду ограниченности времени рабочего цикла тритиевой мишени нейтронного генератора и практической в данных условиях невозможности одновременного облучения и измерения наведенной активности нескольких объектов было необходимо выбрать оптимальный режим работы – комбинацию времени облучения, охлаждения и измерения активности объекта с целью получения максимальной наведенной активности изомера  $Ge^{75m}$  при минимальной затрате времени на одно определение. Ограничивающим фактором при этом было отсутствие у генератора НГ-200 системы пневмопочты и невозможность сокращения в наших экспериментальных условиях времени охлаждения объектов до значения ниже 1 минуты.

Серия проведенных облучений с использованием 10 различных режимов работы подтвердила расчет, что оптимальным в наших условиях является режим 5 – 1 – 5 минут. При этом возникает  $\approx 98,5\%$  насыщенной активности  $Ge^{75m}$  и после минутного охлаждения образца для распада активных продуктов реакций на ядрах неопределяемых элементов  $C^{12}(n,p)B^{12}$  ( $T_{1/2} = 0,02$  сек),  $O^{16}(n,p)N^{16}$  ( $T_{1/2} = 7,35$  сек) и  $O^{18}(n,\alpha)C^{15}$  ( $T_{1/2} = 2,5$ сек)



Таблица 1

Изотоп изомер	Период полураспада	
	найденный	по [13]
Ge <sup>75m</sup>	49 ± 2 сек.	48 , 49 , 42 сек.
Ge <sup>75g</sup>	81 ± 3 мин.	82 , 89 , 79 мин.
Ga <sup>73</sup>	5,3 ± 0,3 час.	4,9 , 5,1 , 5,0 час.
Ga <sup>74</sup>	8,0 ± 0,2 мин.	8,0 , 7,8 мин.
Zn <sup>71</sup>	2,3 ± 0,1 мин.	2,4 , 2,2 мин.
Ge <sup>69</sup>	37 ± 1 час.	36,0 , 40,4 , 38,5 , 40 час.
N <sup>13</sup>	10,0 ± 0,3 мин.	9,96 , 10,05 , 10,08 , 9,93 мин.
Ga <sup>72</sup>	14,8 ± 0,5 час.	14,12 , 14,08 , 14,3 , 14,1 час.

для регистрации остается  $\approx 42\%$  насыщенной активности изомера  $Ge^{75m}$ . Все последующие облучения объектов производились в выбранном оптимальном режиме.

Для облучения использовались навески германия и двуокиси германия, содержащие от 3 до 100 мг германия и навески 80 - 150 мг смесей с содержанием германия 16,90 - 26,86%.

Определение содержания германия производилось методом калибровочного графика по площади фотопика  $E_\gamma = 139$  кэв, нормированной на одинаковый нейтронный поток после вычитания фона. Определение германия без построения калибровочного графика, с облучением одной навески стандарта путем сравнения количества импульсов в фотопиках образца и стандарта, нормированных по потоку, также возможно.

На рис. 3 представлен калибровочный график для диапазона 3-40 мг германия, полученный для  $Ge$  и  $GeO_2$ . Нормирование на поток  $1,3 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup> сек производилось обычным способом.

Результаты определения германия в смесях, представленные в табл. 2, являются среднеарифметическими трех определений, проводившихся с интервалом 3-5 дней между отдельными определениями. Квадратичная ошибка единичного результата не превышает 0,35. Обработка результатов методом статистики производилась для  $|1-\alpha| = 0,95$ . Исключение грубых ошибок - согласно критерию Дина и Диксона /14/.

#### Обсуждение результатов

Малые различия в толщине облучаемых объектов, их воспроизводимые минимальные расстояния от мишени, а также одинаковые условия при измерениях по гамма-излучению позволяют не вводить для отдельных объектов поправок на ослабление потока быстрых нейтронов и поглощение гамма-излучения в их объеме за счет чисто геометрического фактора. Расчет ослабления потока нейтронов с энергией  $\approx 14,5$  Мэв, приводящего к изменению энергии нейтронов до значений ниже пороговой энергии реакций  $Ge^{76}(n, 2n)Ge^{75m}$  (9,68 Мэв) и к их рассеянию вне образца,

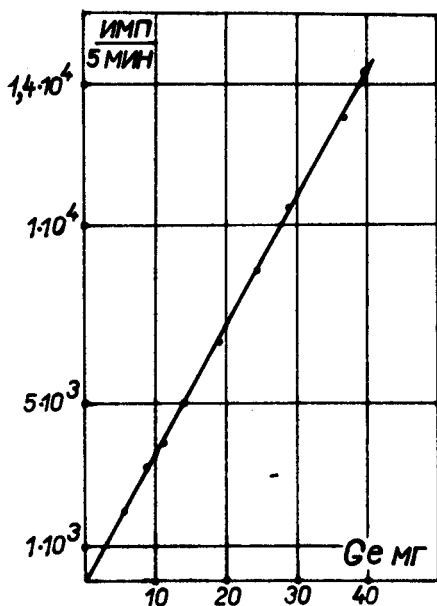


Рис. 3. Калибровочный график для определения германия.

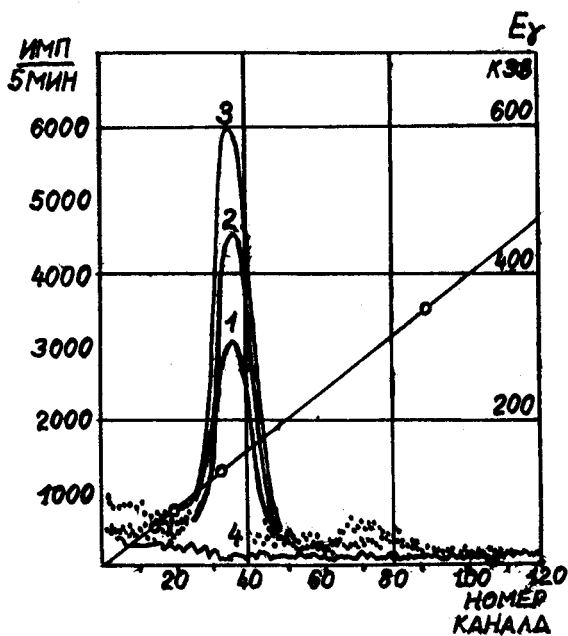


Рис. 4. Гамма-спектры некоторых изучаемых объектов. 1 - двуокись германия, 2 - смесь  $GeO_2$  с гидрохиноном, 3 - металлический германий, 4 - полиэтиленовая упаковка (x10).

Таблица 2

Результаты определения германия

№ п/п	Образец	Навеска мг	Ge% вычисл.	n	$\bar{x}$	$S_x$	$\bar{S}_x$	$ \mu - \bar{x} $	$\bar{x} \pm t \cdot \bar{S}_x$
1.	$C_6H_{12}O_6 + GeO_2$ глюкоза	80,1	16,90	3	16,85	0,34	0,20	0,05	$16,85 \pm 0,86$
2.	$C_{18}H_{36}O_2 + GeO_2$ стеариновая к-та	94,9	19,60	3	19,81	0,22	0,13	0,21	$19,81 \pm 0,56$
3.	$C_{10}H_{16}O + GeO_2$ камфарная к-та	84,5	26,86	3	26,15	0,35	0,19	0,71	$26,15 \pm 0,86$
4.	$C_6H_6O_2 + GeO_2$ гидрохинон	112,4	21,67	3	21,50	0,33	0,19	0,17	$21,50 \pm 0,82$
5.	$C_6H_8O_7 + GeO_2$ лимонная к-та	149,6	20,74	3	20,36	0,15	0,09	0,38	$20,36 \pm 0,39$

проводящийся аналогично /15/, показывает, что отношение возмущенного и невозмущенного рассеянием нейтронных потоков  $F = 0,995$  для пластинок германия и  $F = 0,990$  – для порошкообразных смесей. Использованием в качестве стандартов тонких пластинок германия при работе с германий-органическими образцами вводится относительная ошибка определения максимально в 1%. В данной работе, однако, калибровочный график, все точки которого находятся на одной прямой, был построен по результатам измерения фотопиков 139 кэв  $Ge^{75m}$  как облученных пластинок германия, так и порошкообразной двуокиси германия.

При облучении быстрыми нейтронами образцов, содержащих водород, происходит образование протонов и дейтронов отдачи в результате упругих столкновений быстрых нейтронов с ядрами  $H^1$  и  $H^2$  (99,98 и 0,02% в естественной смеси). Это взаимодействие вносит самый большой вклад в процесс термализации быстрых нейтронов. Однако практически возникающие при этом в органическом соединении потоки тепловых нейтронов /16/ недостаточны для заметной активации  $Ge^{74}$  по реакции  $Ge^{74}(n, \gamma)Ge^{75m}$ . Вклад этой реакции во всех определениях, проводившихся в одинаковом режиме, будет приблизительно одинаков, близок к нулю и может внести в результаты лишь незначительную положительную систематическую ошибку.

Реакции протонов и дейтронов отдачи характеризуются низкими сечениями и активности их продуктов также не вносят в результаты определенный заметный вклад. При облучении полиэтиленовых упаковок весом около 100 мг потоками  $1 - 2 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup> сек в энергетической области 110–170 кэв было зарегистрировано, например, всего лишь на 30–40 имп/5 мин больше, чем составлял фон гамма-спектрометра в этой области за то же время (350 имп/5 мин). Фотопик аннигиляционного гамма-излучения  $N^{13}$  ( $T_{1/2} = 10$  мин), возникающего в результате вторичных реакций этих частиц на ядрах  $C^{12}$  и  $C^{13}$  в спектрах пустых упаковок, вообще не был замечен и отчетливо наблюдался только при облучениях существенно больших навесок полиэтилена в течение значительно более продолжительного времени. Сказанное относится и к  $N^{13}$ , образуемому по ядерным реакциям  $(p, \alpha)$  и  $(n, 2n)$  на ядрах  $O^{16}$  и  $N^{14}$  двуокиси германия, органических веществ и заключенного в упаковке воздуха.

Определению германия по изомеру  $Ge^{75m}$  мешает мышьяк, создающий вклад от дополнительной активности  $Ge^{75m}$  по реакции на быстрых нейтронах  $As^{75}(n, p)Ge^{75m}$ , а также те стабильные изотопы, например,  $Sn^{120}$ ,  $Ho^{165}$ ,  $Er^{168}$ ,  $F^{19}$ ,  $W^{186}$ , в результате облучения которых быстрыми нейтронами образуются радионуклиды с периодами полураспада и энергиями гамма-квантов, близкими соответствующим ядерным характеристикам  $Ge^{75m}/9, 10/$ . В процессе работы мешающего влияния примесей этих элементов как в исследуемых объектах, так и в материале упаковки обнаружено не было.

На рис. 4 приведены идентичные по форме гамма-спектры образцов двуокиси германия "1", смеси, приготовленной из двуокиси германия и гидрохинона "2", металлического германия "3". Кривая "4" представляет спектр упаковки. В энергетической области 110-170 кэВ гамма-спектров этих образцов в условиях режима 5 - 1 - 5 минут наблюдается фотопик только изомера  $Ge^{75m}$ , площадь которого являлась мерой содержания германия в веществе.

Найденная чувствительность определения равнялась 357 имп/мг германия для режима 5 - 1 - 5 минут и среднего потока нейтронов  $1,3 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup> сек, или 0,15 мг при условии 3-кратного превышения активностью в фотопике квадратичной ошибки измерения фона на том же участке спектра при одинаковом времени регистрации. Длительность определения без учета времени, затраченного на подготовительные работы, 12 - 15 минут.

Метод пригоден для полумикро- и микроопределения германия в органических соединениях состава  $C, H, O, Ge$  и позволяет в принципе одновременно с германием из одной навески определять хлор по реакции  $Cl^{37}(n, p)S^{37}$  ( $T_{1/2} = 5,1$  мин,  $E_{\gamma} = 3090$  кэВ,  $\sigma = 50$  мб) или бром по реакции  $Br^{79}(n, 2n)Br^{78}$  ( $T_{1/2} = 6,5$  мин,  $E_{\gamma} = 511, 613$  кэВ,  $\sigma_{акт} = 950$  мб).

Найденное значение чувствительности определения германия является более высоким по сравнению с результатами работы /12/ для потока  $4 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup> сек. Это расхождение можно объяснить тем, что авторы упомянутой работы измеряли нейтронный поток на поверхности охлади-

тельной камеры напротив тритиевой мишени, а облучение образцов проводили на расстоянии 1,65 см от нее, где, по их мнению, нейтронный поток равен  $2 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup>·сек. Использованный коэффициент ослабления потока с увеличением расстояния от камеры 0,5 не имеет в работе экспериментального основания и является проблематичным, так как результаты исследований, посвященных данному вопросу, сильно расходятся. В одной из выполненных недавно работ /17/, в которой исследовалось разложение нейтронного потока на поверхности охлаждающего цилиндра тритиевой мишени и его изменение с расстоянием от поверхности цилиндра, было, например, найдено, что значения нейтронных потоков на расстоянии 0 и 1,65 см от поверхности охлаждающей камеры различаются более, чем на порядок ( $4 \cdot 10^8$  и  $2,6 \cdot 10^7$  н/см<sup>2</sup> сек). В нашей работе монитор и облученный образец находились на одинаковом расстоянии от охлаждающей камеры, причем соблюдалось постоянство их расположения относительно мишени. Это в определенной мере элиминировало имеющее место при работах с невращающимися тритиевыми мишенями и фокусированными дейтронными пучками неравномерное распределение нейтронного потока по поверхности камеры.

Повышения чувствительности и точности определения данным методом можно достичь при увеличении нейтронного потока генератора применением для бомбардировки тритиевых мишеней смешанных дейтерий-тритиевых пучков, некоторым сокращением времени охлаждения образца использованием системы пневмопочты, повышением эффективности измерения наведенной активности применением кристаллов с колодцем  $NaI/Tl$  больших размеров, повышением равномерности облучения посредством использования вращающихся тритиевых мишеней или держателей образцов, применением дефокусированного дейтронного пучка и другими способами.

Повышения точности определения можно достигнуть при использовании для измерения наведенной активности полупроводниковых детекторов высокого разрешения. Первое применение  $Ge/Li$  детектора объемом 22см<sup>3</sup> при определении германия активацией быстрыми нейтронами генератора не дало, однако, положительных результатов из-за низкой эффективности счета. В гамма-спектрах, полученных для граммовых навесок элемента

в режиме 400 - 10 - 500 секунд (поток  $5 \cdot 10^{10}$  н/сек) , практически не было обнаружено фотопиков, по которым можно было бы производить определение  $^{18}$ .

Нами для тех же целей был использован полупроводниковый *Ge/Li* детектор объемом 40 см<sup>3</sup>, обладающий более высокими эффективностью счета и разрешающей способностью (рис. 5). Предварительные данные показывают, что применение этого детектора по сравнению с использованным кристаллом *NaJ/Tl* действительно приводит к повышению абсолютной точности определения, а приблизительно трехкратное понижение чувствительности определения окупается  $\approx$  20-кратным повышением разрешающей способности *Ge/Li* детектора по отношению к кристаллу *NaJ/Tl* . Этот факт делает возможным одновременное с германием определение и значительно большего числа других элементов в его соединениях, сплавах и концентратах, чем в случае работы с кристаллом *NaJ/Tl* . Наилучших результатов при этом следует ожидать для *F, Na, Al, P, Sc, V, Ni, Cu, Zn, Ga, Se, Br, Rb, Zr, Mo, Ru, Ag, Cd, In, Sb, Ba, Ce, Pr, Nd, Hf* и некоторых других элементов, непродолжительное облучение которых приводит к образованию короткоживущих изотопов с фотопиками в мягкой области гамма-спектра, где *Ge/Li* детекторы обладают максимальной эффективностью счета.

При наличии пневмопочты и возможности машинной обработки гамма-спектров из *Ge/Li* детектора по программе, включающей поправки на флюктуацию нейтронного тока, вычет фона и т.д., метод может быть в принципе оформлен как автоматизированный процесс с программным управлением.

Авторы выражают признательность академику Г.Н. Флерову за предоставление возможности выполнения данной работы, А.М. Кучеру за проведение облучений на НГ-200 и Б. Бочеву за помощь при работе с *Ge/Li* детектором.



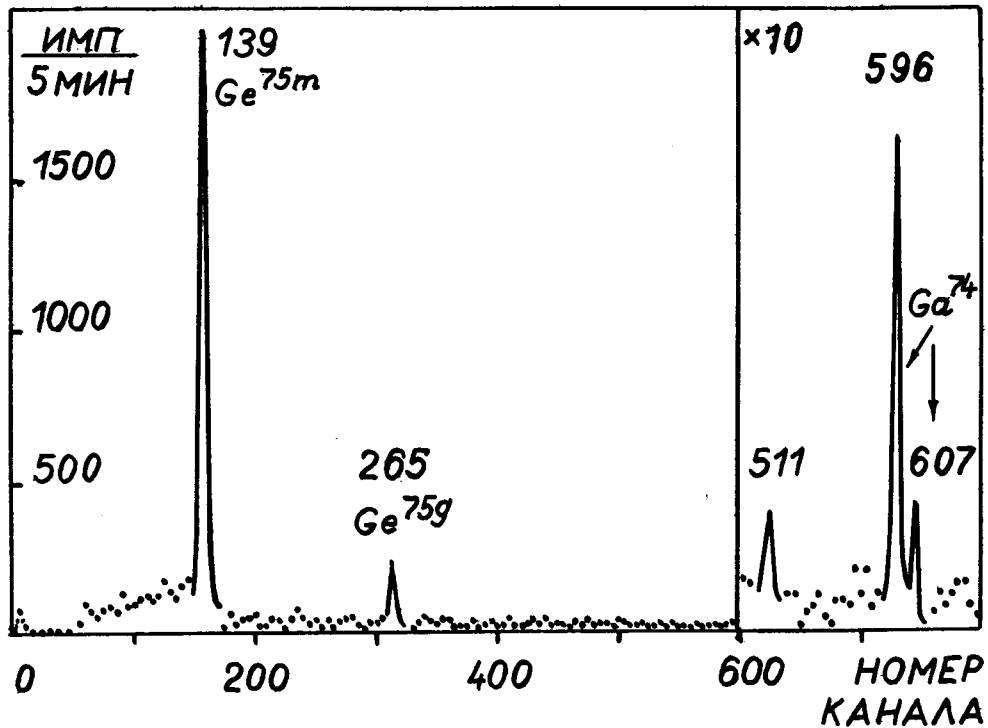


Рис. 5. Участок гамма-спектра германия 0 - 700 кэв. 118,8 мг германия, режим 5 - 1 - 5 минут, нейтронный поток  $1,3 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup> сек. Полу-проводниковый детектор *Ge/Li*, объем 40 см<sup>3</sup>, разрешающая способность 3,7 кэв (по линии 662 кэв). 4096-канальный амплитудный анализатор *Intertechnique*; 139 кэв - аналитический фотопик для определения германия, 596 и 607 кэв - линии дублета *Ga<sup>74</sup>*.

## Литература

1. H.Gilman, C.W.Gerow, J.Amer.Chem.Soc., 77, 5740, 1955.
2. В.А. Климова, М.Д. Виталина. Журнал аналитической химии, 17, 1105 1962.
3. В.А. Климова, М.Д. Виталина. Журнал аналитической химии, 19, 1254, 1964.
4. С.И. Обтемперанская, И.В. Дудова, Г.Ф. Дикая. Журнал аналитической химии, 23, 785, 1968.
5. С.И. Обтемперанская, И.В. Дудова, Вестник Московского университета, сер. 11, Химия, 4, 461, 1970.
6. А.П. Крешков, В.А. Кучкарев. Заводская лаборатория, 32 558, 1966.
7. Х. Оикава, Т. Окуда. J.Chem.Soc., Japan, Ind.Chem.Sec., 64, 34-37A, 1961, РЖХим, 24, Д42, 1961.
8. И. Дуда, И.В. Дудова. ОИЯИ, 12-6220, Дубна, 1972.
9. И.В. Меднис. Справочные таблицы для нейтронно-активационного анализа. Изд-во Зинэте, Рига, 1969.
10. А.И. Алиев, В.И. Дрынкин, Д.И. Лейпунская, В.А. Касаткин. Ядерно-физические константы для нейтронного активационного анализа. Атомиздат, Москва, 1969.
11. J.Perdijon. Analyt. Chem., 39, 448, 1967.
12. M.Cuypers, J.Cuypers. J. Radioanal.Chem., 1, 243, 1968.
13. C.M.Lederer, J.M.Hollander, I.Perlman. Table of Isotopes, Sixth Ed. John Willey and Sons, Inc., New York, London, Sydney, 1967.
14. K.Eckschlager. Chyby chemických rozborů. SNTL Praha, 1961.
15. D.Brune, K.Jirlow. J. Radioanal.Chem., 2, 49, 1969.
16. E.Ricci. J. Inorg.Nucl.Chem., 27, 44, 1965.
17. T.Nakanishi, M.Sakanoue. Radiochem.Radioanal.Lett., 2, 313, 1969.
18. I.Fujii, T. Inouye, H.Muto, K.Onodera, A. Tani. Analyst, 94, 189, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 января 1972 года.