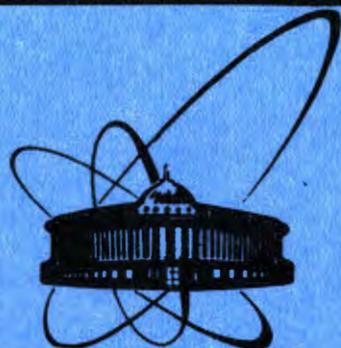


85-411



**объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна**

с 343 г  
5416/85

P15-85-411

**Фам Нгок Чыонг, Г.М.Тер-Акопьян, А.П.Кабаченко**

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕРИЛЛИЯ  
ПО РЕАКЦИИ ( $\alpha, n$ )**

Направлено в журнал "Атомная энергия"

**1985**

## ВВЕДЕНИЕ

Реакция  $(\alpha, n)$  на  ${}^9\text{Be}$  исследовалась рядом авторов<sup>1-4/</sup>. Она также давно используется для получения лабораторных источников нейтронов с помощью долгоживущих  $\alpha$ -радиоактивных изотопов  ${}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}^{226}\text{Ra}$ ,  ${}^{210}\text{Po}$  и др. Поперечное сечение реакции  ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$  оказывается  $>10^{-25}\text{см}^2$  уже при энергии  $\alpha$ -частиц  $>1,5$  МэВ, чем обусловлен относительно большой выход нейтронов, который достигается с помощью таких источников. В табл.1, взятой из<sup>5/</sup>, представлены данные о выходе нейтронов из ряда толстых мишеней при бомбардировке  $\alpha$ -частицами  ${}^{210}\text{Po}$ . Эти данные указывают на возможность применения реакции  ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$  для обнаружения малых количеств бериллия.

Таблица 1

Выход нейтронов из толстых мишеней при бомбардировке  $\alpha$ -частицами  ${}^{210}\text{Po}$

Мишень	Выход нейтронов нейт/ $10^6 \alpha$ -част.	Мишень	Выход нейтронов нейт/ $10^6 \alpha$ -част.
Li	2,60	Na	1,5
Be	80	Mg	1,4
B	24	Al	0,25
C	0,11	Si	0,16
N	0,01	Cl	0,11
O	0,07	Ar	0,38
F	12		

Задача обнаружения малых количеств бериллия представляет интерес для анализа элементного состава геологических образцов и для контроля чистоты окружающей среды. Высокая эффективность регистрации и низкий собственный фон детекторов нейтронов, основанных на пропорциональных счетчиках с  ${}^3\text{He}$ , позволяют, в принципе, достигнуть высокой чувствительности обнаружения бериллия<sup>6/</sup>. Однако при этом возникает необходимость выделения сигнала от бериллия на фоне реакции  $(\alpha, n)$ , протекающей на атомных ядрах многих легких элементов /см. табл.1/.



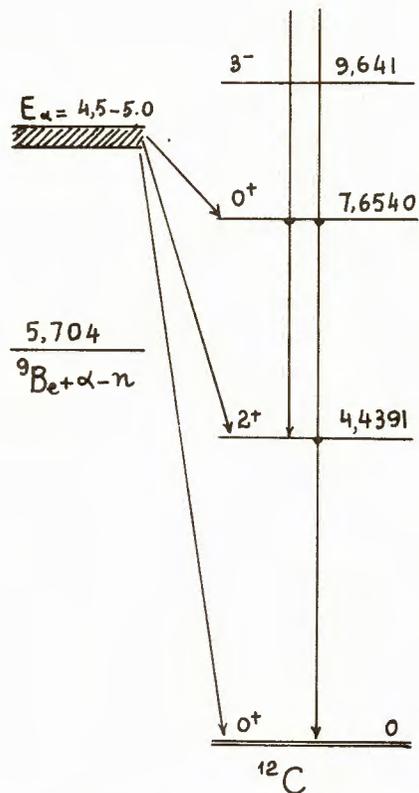


Рис.1. Схема уровней  $^{12}\text{C}$ , заселяемых в реакции  $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ .

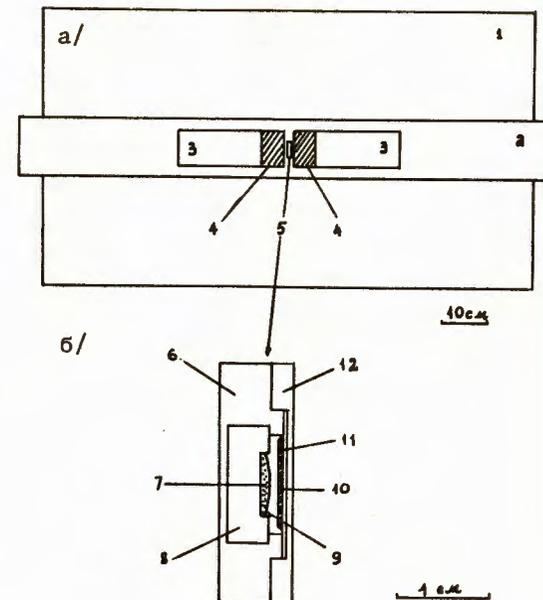
Однозначная идентификация бериллия в исследуемых пробах может быть осуществлена при регистрации нейтронов, совпадающих с  $\gamma$ -квантами с энергией 4,439 МэВ, которые испускаются с большой вероятностью в реакции  $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$  в результате образования ядра  $^{12}\text{C}$  в первом возбужденном состоянии. Схема низколежащих уровней  $^{12}\text{C}$ , взятая из /7/, показана на рис.1. Вероятность заселения этих уровней в реакции  $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$  изучалась в работе /4/, из данных которой следует, что при энергии бомбардирующих  $\alpha$ -частиц  $\leq 5$  МэВ  $\gamma$ -кванты с энергией 4,439 МэВ испускаются после вылета нейтрона с вероятностью 0,7-0,8.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Схема экспериментальной установки показана на рис.2. Для изучения реакции  $(\alpha, n)$  нами применялся источник  $^{210}\text{Po}$  с интенсивностью  $5,8 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$  в телесном угле  $2\pi$  ср. Кроме высокой удельной активности, выбор  $^{210}\text{Po}$  был обусловлен низким выходом  $\gamma$ -излучения - выход единственной  $\gamma$ -линии с энергией 0,803 МэВ составляет  $1,1 \cdot 10^{-5}$  на  $\alpha$ -распад. Препарат  $^{210}\text{Po}$  был нанесен на подложку из нержавеющей стали толщиной 4 мм в виде пятна диаметром 7 мм. Активный слой был покрыт слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 270 мкг.см $^{-2}$  для предотвращения возможного загрязнения полонием образцов и стенок камеры. Исследуемый образец помещался вместе с источником внутри камеры из нержавеющей стали. Расстояние между источником и образцом было меньше 1 мм, воздух из камеры не откачивался.

Камера с источником и образцом помещалась между двумя сцинтилляционными счетчиками со сцинтилляторами, представляющими монокристаллы из германата висмута. Диаметр сцинтилляторов равнялся 8 см, высота - 5 см, расстояние между ними - 0,8 см. Вся

Схема установки для измерения спектров  $\gamma$ -квантов в совпадении с нейтронами реакции  $(\alpha, n)$ ; а - общий вид установки, б - камера с  $\alpha$ -источником  $^{210}\text{Po}$  с образцом. 1 - нейтронный детектор, 2 - чувствительный объем, 3 - ФЭУ, 4 - сцинтилляторы, 5 - камеры с  $\alpha$ -источником  $^{210}\text{Po}$  и образцом, 6 - корпус камеры, 7 - препарат  $^{210}\text{Po}$ , 8 - подложка, 9 - пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 10 - образец, 11 - подложка образца, 12 - крышка.



описанная аппаратура располагалась внутри чувствительного объема детектора нейтронов с 56 счетчиками, заполненными  $^3\text{He}$ . Вероятность регистрации одиночных нейтронов с энергией, отвечающей спектру нейтронов реакции  $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ , составляла 0,48. Детальное описание нейтронного детектора дано в /8/.

При регистрации совпадений  $\gamma$ -квантов и нейтронов использовалась электронная схема, подробно описанная в /9/. В случае, когда в одном из двух сцинтилляционных счетчиков /или одновременно в обоих счетчиках/ появлялся импульс с амплитудой, превышающей заданную величину порога, схема ожидала в течение 128 мкс появления нейтронного сигнала с  $^3\text{He}$ -счетчиков. О каждом событии в память микро-ЭВМ МАКАМАК записывалась информация о величине суммы импульсов, поступивших с выходов двух сцинтилляционных счетчиков и о времени задержки между сигналами  $\gamma$ -счетчиков и счетчиков нейтронов. Схема позволяла также регистрировать спектры  $\gamma$ -квантов, не совпавших с нейтронами, а также определять скорость счета нейтронов независимо от их совпадений с  $\gamma$ -квантами.

В связи с тем, что  $\gamma$ -активность  $\alpha$ -источника  $^{210}\text{Po}$  составляла  $\sim 10^4 \text{ c}^{-1}$  порог регистрации  $\gamma$ -квантов при измерении совпадений устанавливался на уровне не менее 1,5 МэВ.

Вероятность регистрации нейтронов определялась с помощью источника  $^{239}\text{Pu} + ^9\text{Be}$  интенсивностью  $5,3 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$ . Калибровка  $\gamma$ -спектрометрического тракта проводилась с помощью источников  $\gamma$ -

излучения  $^{88}\text{Y}/E = 1,836 \text{ МэВ/}$  и  $^{239}\text{Pu} + ^9\text{Be}$  источника. На рис.3 показан калибровочный спектр  $^{239}\text{Pu} + ^9\text{Be}$  источника, который был зарегистрирован с помощью двух сцинтилляционных счетчиков в геометрии, аналогичной той, в которой проводились все измерения. Из рассмотрения этого спектра следует, что роль каскада  $\gamma$ -квантов, испускаемых в реакции  $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$  /см.рис.1/ невелика. Этот результат согласуется с результатами, полученными в [4].

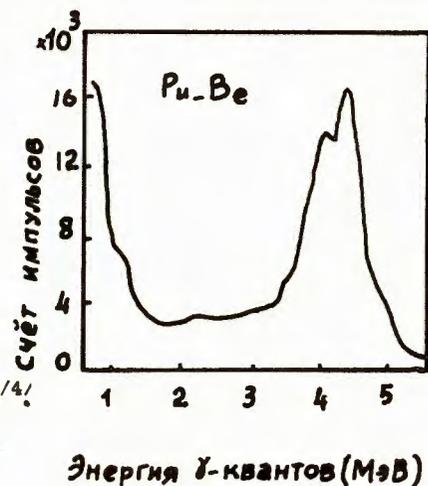


Рис.3. Калибровочный спектр  $\gamma$ -квантов источника  $^{239}\text{Pu} - \alpha - \text{Be}$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Были проведены измерения скорости счета нейтронов реакции  $(\alpha, n)$  с двумя образцами: с толстым металлическим бериллием и с тонким слоем металлического бериллия, нанесенным на подложку из чистого алюминия /99,99%/. Слой металлического бериллия был получен на масс-сепараторе ЛЯР ОИЯИ [10]. Сепарированные ионы  $^9\text{Be}$  замедлялись до энергии 150 эВ и принимались на Al-подложку. Толщина слоя составляла  $20 \text{ мкг. см}^{-2}$ . Она оценивалась по току ионов  $^9\text{Be}$ , который периодически измерялся в фокальной плоскости масс-сепаратора с помощью цилиндра Фарадея. Ошибка в оценке толщины слоя бериллия равнялась 30%.

Кроме бериллия выход нейтронов определялся также для толстых образцов фтористого свинца ( $\text{PbF}_2$ ), керамики (BNAl), кремния, алюминия /99,99%/, магния, меди, графита, окиси свинца ( $\text{PbO}$ ), платины, нержавеющей стали.

Результаты измерений приведены в табл.2. В шестой колонке этой таблицы для различных изученных образцов указаны скорости счета нейтронов, измеренные без совпадений с  $\gamma$ -квантами. Очевидно, что наибольшая скорость счета в случае толстых образцов наблюдалась для бериллия. Наименьшая скорость счета была зарегистрирована с образцом нержавеющей стали. Практически такая же низкая скорость счета нейтронов была получена для платиновой фольги. Незначительное превышение по отношению к образцу нержавеющей стали может быть вызвано небольшим загрязнением поверхности фольги. Скорость счета нейтронов, зарегистрированная с этими двумя образцами, очевидно, обусловлена реакцией  $(\alpha, n)$ , протекающей на атомных ядрах элементов, присутствующих в соста-

Результаты измерений скорости счета  $\gamma$ - $n$  совпадений при различных порогах регистрации  $\gamma$ -квантов. Цифры - скорость счета за 1 с

Порог	2800 кэВ	3200 кэВ	3600 кэВ	4000 кэВ	Общий счет нейтронов
$^9\text{Be}$	$368,8 \pm 24,0$	$313,7 \pm 20,4$	$221,6 \pm 14,4$	$142,6 \pm 2,6$	$2195,7 \pm 7,5$
20 мкг $^9\text{Be}$ на Al-подл.	$5,117 \pm 0,200$	$4,306 \pm 0,153$	$3,033 \pm 0,130$	$1,967 \pm 0,100$	$119,37 \pm 1,23$
$\text{PbF}_2$	$0,539 \pm 0,054$	$0,482 \pm 0,052$	$0,262 \pm 0,033$	$0,203 \pm 0,026$	$144,05 \pm 1,56$
BNAl		$0,762 \pm 0,058$	$0,292 \pm 0,035$	$0,242 \pm 0,030$	$230,77 \pm 1,90$
Si	$0,238 \pm 0,024$	$0,130 \pm 0,014$	$0,088 \pm 0,012$	$0,067 \pm 0,010$	$79,86 \pm 1,16$
Al	$0,171 \pm 0,017$	$0,098 \pm 0,013$	$0,060 \pm 0,009$	$0,055 \pm 0,007$	$87,92 \pm 1,21$
Mg	$0,123 \pm 0,014$	$0,078 \pm 0,012$	$0,046 \pm 0,009$	$0,023 \pm 0,006$	$101,76 \pm 1,30$
Cu	$0,052 \pm 0,009$	$0,016 \pm 0,005$	$0,008 \pm 0,003$	$0,007 \pm 0,003$	$78,85 \pm 1,14$
C	$0,048 \pm 0,009$	$0,022 \pm 0,006$	$0,020 \pm 0,006$	$0,015 \pm 0,005$	$84,17 \pm 1,20$
PbO	$0,032 \pm 0,007$	$0,020 \pm 0,006$	$0,010 \pm 0,004$	$0,013 \pm 0,005$	$82,03 \pm 1,09$
Pt	$0,027 \pm 0,007$	$0,018 \pm 0,005$	$0,015 \pm 0,005$	$0,002 \pm 0,002$	$79,83 \pm 1,32$
ФИЛЬТР на $\text{Pb}$	$0,037 \pm 0,008$	$0,025 \pm 0,007$	$0,015 \pm 0,005$	$0,013 \pm 0,005$	$80,71 \pm 1,32$
НЕРЖ.СТАЛЬ	$0,027 \pm 0,007$	$0,013 \pm 0,005$	$0,010 \pm 0,003$	$0,002 \pm 0,001$	$76,71 \pm 1,13$

ве  $\alpha$ -источника  $^{210}\text{Po}$ . По-видимому, это ядра алюминия, входящие в слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которым покрыт препарат  $^{210}\text{Po}$ .

В 2-5 колонках табл.2 указаны скорости счета совпадений  $\gamma$ -квантов с нейтронами при четырех значениях порога регистрации  $\gamma$ -квантов: 2800, 3200, 3600 и 4000 кэВ. Зависимость скорости счета  $\gamma$ - $n$  совпадений от порога регистрации  $\gamma$ -квантов для различных толстых образцов приведены на рис.4. На рис.5 показаны спектры энергии  $\gamma$ -квантов, зарегистрированных в совпадении с нейтронами. Кроме спектра фона / $\alpha$ -источник  $^{210}\text{Po}$  с мишенью из нержавеющей стали/, здесь показаны  $\gamma$ -спектры, полученные с тремя мишенями -  $\text{Be}$ ,  $\text{PbF}_2$  и BNAl, для которых была получена наибольшая скорость счета  $\gamma$ - $n$  совпадений.

Полученные результаты показывают, что в отношении скорости счета совпадений бериллиевая мишень резко выделяется среди других мишеней, в особенности в области максимума в  $\gamma$ -спектре при энергии 4,44 МэВ. Отношение скорости счета  $\gamma$ - $n$  совпадений с бериллиевой мишенью к скоростям счета, полученным с другими мишенями при пороге  $E_\gamma = 3600 \text{ кэВ}$  приведены в табл.3.

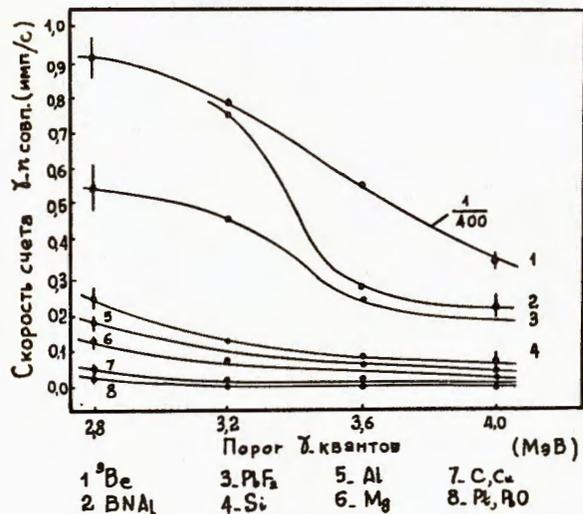


Рис.4. Зависимость скорости счета  $\gamma$ - $\pi$  совпадений от энергетического порога регистрации  $\gamma$ -квантов, полученная с  $\alpha$ -источником  $^{210}\text{Po}$  интенсивностью  $5,8 \cdot 10^8 \text{с}^{-1} / 2\pi \text{ ср} / -1$  для толстых мишеней.

Рис.5. Спектры энергии  $\gamma$ -квантов, зарегистрированных в совпадении с нейтронами. 1 - толстый Be, 2 -  $\text{PbF}_2$ , 3 -  $\text{BAl}$ , 4 - фон источника.

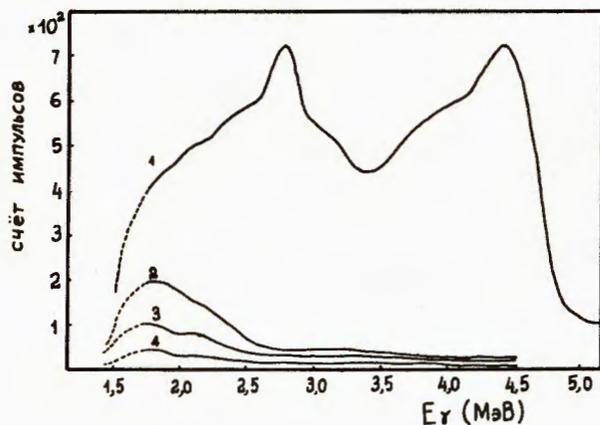


Таблица 3

Отношение скорости счета  $\gamma$ - $\pi$  совпадений на толстом бериллии к скорости счета на других мишенях

Мишень	BAl	$\text{PbF}_2$	Si	Mg	Al	PbO	C	Pt
$\frac{U_{\gamma\pi}(\text{Be})}{U_{\gamma\pi}(\text{мишень})}$	759	846	2518	4715	3693	22160	11080	14773
	$\pm 15\%$	$\pm 18\%$	$\pm 21\%$	$\pm 25\%$	$\pm 21\%$	$\pm 40\%$	$\pm 36\%$	$\pm 40\%$

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Совпадение нейтронов реакции  $(\alpha, n)$  с  $\gamma$ -квантами высокой энергии является признаком, характерным для  $^9\text{Be}$ . Этот вывод следует из табл.4, в которой для различных мишеней приведены данные о вероятности совпадений  $\gamma$ -квантов высокой энергии с нейтронами, испускаемыми при реакции  $(\alpha, n)$ . Измеренная нами вероятность совпадений  $\gamma$ - $\pi$  для случая  $^9\text{Be}$  /толстая и тонкая мишень/ согласуется с имеющимися данными /4/ о вероятности заселения различных уровней  $^{12}\text{C}$  в реакции  $^9\text{Be}(\alpha, n)$ . Для двух сцинтилляторов из германата висмута и той геометрии измерений, которая применялась в настоящей работе, вероятность ( $W_\gamma$ ) регистрации  $\gamma$ -квантов с энергией 4,44 МэВ изменялась следующим образом при изменении порога:

$E_\gamma / \text{МэВ} /$	2,8	3,2	3,6	4,0
$W_\gamma / \%$	39	33	26	15

Таблица 4

Вероятность совпадения  $\gamma$ -квантов высокой энергии с нейтронами /в процентах/

Мишень	Порог E 2,80 МэВ	Порог E 3,20 МэВ	Порог E 3,60 МэВ	Порог E 4,00 МэВ
Be	16,0	14,0	10,0	7,0
20 мкг Be	16,0	14,0	9,5	6,0
BAl		0,5	0,2	0,2
$\text{PbF}_2$	0,9	0,7	0,4	0,3
Pt	0,9	0,6	0,5	0,1
Фильтр	0,9	0,6	0,4	0,1

Из табл.4 видно, что небольшой счет  $\gamma$ - $\pi$  совпадений, который наблюдался со всеми остальными мишенями кроме бериллия, обусловлен случайными совпадениями. По-видимому, основную роль играют наложения  $\gamma$ -квантов с энергией 803 кэВ, испускаемых из  $^{210}\text{Po}$ , с каскадом  $\gamma$ -квантов, которые испускаются в результате реакции  $(\alpha, \gamma n)$  при взаимодействиях  $\alpha$ -частиц с ядрами Al, B, F, N и др.

Из сравнения данных табл.2 о скорости счета  $\gamma$ - $\pi$  совпадений для тонкой бериллиевой мишени и для ряда толстых мишеней /Cu, C, PbO, Pt, нержавеющая сталь/ видно, что при изучении тонких

препаратов, нанесенных на подходящие подложки, чувствительность обнаружения бериллия составляет  $\sim 0,1$  мкг. Подобная схема измерения содержания бериллия представляется естественной, когда речь идет об изучении химических фракций малой массы или об измерении концентрации бериллия в воздухе. В последнем случае можно воспользоваться улавливанием тонким фильтром аэрозолей, содержащихся в воздухе.

Для препаратов большой массы /геологические пробы, минеральные фракции, продукты химической переработки образцов/ можно оценить концентрационную чувствительность метода определения бериллия. Она составляет  $10^{-2}\%$  и слабо зависит от элементного состава изучаемых проб.

Указанные пределы чувствительности могут быть увеличены при условии замены защитного слоя из  $Al_2O_3$ , которым был покрыт препарат  $^{210}Po$ , другим слоем, не содержащим элементов с высоким поперечным сечением реакции  $(\alpha, n)$ .

Авторы глубоко благодарны академику Г.Н.Флерову за интерес к работе и постоянную поддержку. Авторы благодарны Ш.С.Зейналову и Е.А.Соколу за помощь, оказанную в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bonne T.W. et al. Phys.Rev., 1956, vol.102, p.1348.
2. Gibbons T.H., Macklin R.L. Phys.Rev., 1965, vol.137, p.1508.
3. Van der Zwan L., Geiger K.W. Nucl.Phys., 1970, vol.A152, p.481.
4. Obst A.W., Grandy T.B., Weil J.L. Phys.Rev., 1972, vol.C5, p.738.
5. Физика ядерных реакторов. /Пер. с англ. под ред. И.А.Стенбока/. Атомиздат, М., 1964.
6. Тер-Акопян Г.М. и др. В сб.: Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов, ОИЯИ, Д7-83-644, Дубна, 1981, с.551.
7. Lederer C.M., Shirley V.S. Table of Isotopes. (7th Ed.), A.Wiley-Interscience Publ., 1978, p.12.
8. Ter-Akopian G.M. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1981, vol.190, p.119.
9. Сокол Е.А. и др. P13-84-839, Дубна, 1984.
10. Кабаченко А.П., Тарантин Н.И. ОИЯИ, P13-80-737, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел  
31 мая 1985 года.

Фам Нгок Чьонг, Тер-Акопян Г.М.,  
Кабаченко А.П.

P15-85-411

Методика определения бериллия по реакции  $(\alpha, n)$

Изучалась возможность обнаружения малых количеств  $^9Be$  по реакции  $(\alpha, n)$ . Показано, что при интенсивности источника  $\alpha$ -частиц  $^{210}Po$   $3 \cdot 10^8$  с $^{-1}$  предел обнаружимого количества бериллия составляет 0,1 мкг при регистрации совпадений нейтронов с  $\gamma$ -квантами с энергией  $\geq 3,6$  МэВ. Другие легкие элементы /В, F, Al, Mg, Si и др./ при таких условиях не создают заметного фона.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Pham Ngoc Chuong, Ter-Akopyan G.M.,  
Kabachenko A.P.

P15-85-411

Investigation of the Method of Beryllium Determination  
Using an  $(\alpha, n)$  Reaction

The possibility of detecting small amounts of  $^9Be$  using the  $(\alpha, n)$  reaction has been investigated. It has been found that at a  $^{210}Po$   $\alpha$ -particle source intensity of  $3 \times 10^8$  s $^{-1}$  for limit of the detectable amount of beryllium is equal to 0.1  $\mu$ g in the case of recording neutron-gamma ( $\geq 3.6$  MeV) coincidences. Other light elements (В, F, Al, Mg, Si etc.) do not produce a noticeable background under such conditions.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985