

ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

**К.К. МАМЕДОВ, Н.А. КЕРИМОВ, В.Г. БАДАЛОВ, Я.Г. ГУСЕЙНАЛИЕВ, М.И. МЕХТИЕВ,
Ш.А. ХУРШУДОВ, Л.М. МАМЕДОВА**

*Азербайджанское Национальное Аэрокосмическое Агентство
Баку, 370106, пр. Азадлыг, 159*

В работе приводятся результаты по построению сцинтилляционного спектрометрического комплекса, позволяющего обнаруживать и регистрировать излучения радиоактивных γ -источников, находящихся в составе природных образований в энергетическом диапазоне 0,05÷3 МэВ, а также результаты исследований энергетического спектра и других физических характеристик ряда источников γ - излучений, часто встречающихся в окружающей среде.

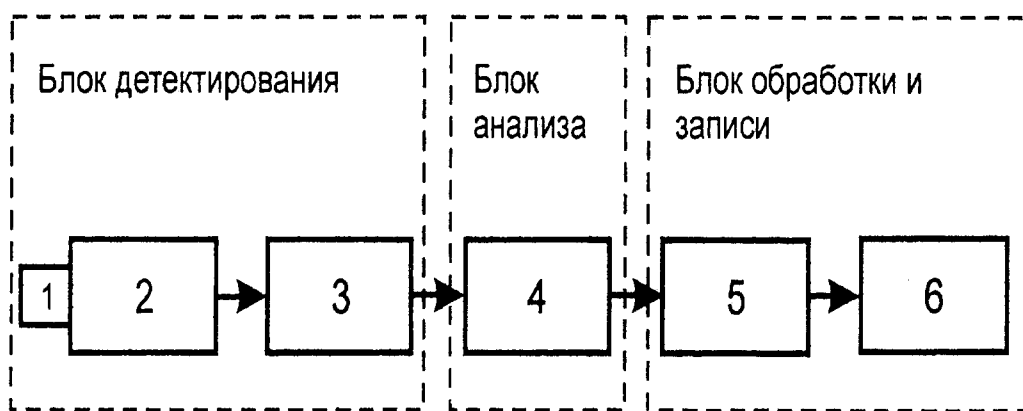
ВВЕДЕНИЕ.

Разработан и построен сцинтилляционный гамма-спектрометрический комплекс, позволяющий обнаруживать и регистрировать γ -излучения радиоактивных источников, как техногенного, так и естественного происхождения, определить их радионуклидные составы и активности, в энергетическом диапазоне 0,05÷3 МэВ. Комплекс построен на современной элементной базе, полностью автоматизирован, имеет математическое и программное обеспечения. Спектрометрический комплекс может быть успешно использован для создания радиэкологического мониторинга, в санитарно-эпидемиологических, таможенных и иных службах с целью определения уровня радиоактивного загрязнения в пробах (образцах), взятых из исследуемых объектов, а также радиационного фона в природной среде. В работе приводится блок-схе-

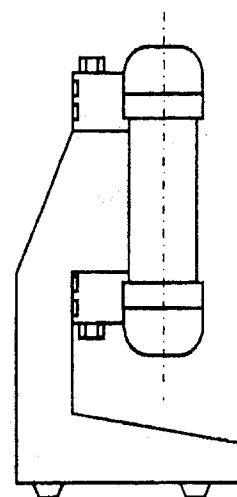
ма и описывается принцип работы спектрометрического комплекса, а также результаты по исследованию энергетического спектра некоторых радиоактивных γ -источников.

БЛОК-СХЕМА И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СПЕКТРОМЕТРА.

Как видно из рис.1а, в состав спектрометрического комплекса входят три основных блока: блок детектирования, состоящего из сцинтилляционного датчика – монокристалла NaJ, легированного 0,1 % Tl, фотоэлектронного умножителя ФЭУ-82; усилителя и формирователя сигнала (УФС), блока анализа - анализатор типа АИ-1024-17, блоков обработки результатов и записи результатов информации.



а



б

Рис. 1. а - блок схема спектрометра: 1 - монокристалл NaJ (0.1 %Tl), 2 - ФЭУ-82, 3 - УФС, 4 - анализатор АИ-1024-17, 5 - компьютер IBM PC-486, б - принтер, б - защитная оболочка.

Спектрометр работает в импульсном режиме, при котором процесс регистрации и идентификации источников γ - излучения состоит из следующих этапов: энергия первичного γ -кванта (E_γ),попавшего на поверхность кристалла, полностью (или частично) поглощается в сцинтилляторе. Возбужденные молекулы сцинтиллятора при возвращении в основное состояние излучают вторичные кванты - световые импульсы в оптическом диапазоне

$\lambda_{изл}=415$ нм, которые попадают на фотокатод ФЭУ. Первичные электроны, выбитые с фотокатода, размножаются на диодах ФЭУ. Выходные импульсы с анода ФЭУ преобразуются в импульсы напряжения (тока) и поступают на вход эмиттерного повторителя, где эти сигналы усиливаются и формируются. Далее эти импульсы поступают на вход анализатора АИ-1024, с помощью которого они стандартизируются по амплитуде и длительности,

затем они поступают в компьютер типа ГВМ-486, управляющий всем процессом измерения и обработки результатов по специальной программе, разработанной для этой цели. При необходимости во время измерения блок детектирования помещается вовнутрь свинцовой защитной оболочки («домика») рис.16, толщиной 5 см, которая на ≈90% уменьшает радиационной фон. Для подавления влияния тепловых нейтронов, характеристического излучения и вторичных электронов, защитная оболочка с внутренней стороны покрыта слоями Cd, Си и Al толщиной 1,5 мм каждый.

ГАММА-ИСТОЧНИКИ И ПРИНЦИП РЕГИСТРАЦИИ γ- ИЗЛУЧЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.

Следует отметить, что почти все радиоактивные распады сопровождаются γ-излучением [1-5]. Взаимодействие γ-лучей с веществом (средой) существенно отличается от взаимодействий заряженных частиц и носит чисто квантовый характер. Длина пробега γ-лучей в веществах уступает лишь некоторым частицам (мюонам и нейтрино). На основе энергетического спектра можно получить очень полезную информацию об источниках γ-излучений и об объектах, с которыми эти лучи взаимодействуют по пути прохождения до системы регистрации. Достижимые эксплуатационные параметры и выбор структурных элементов спектрометрического комплекса зависит от механизмов поглощения γ-лучей в сцинтилляторе. Известно [1,2], что если γ-лучи с интенсивностью J_0 проходят расстояние d в сцинтилляторе, то их ослабление определяется по закону $J=J_0e^{-\mu d}$ (μ - линейный коэффициент поглощения). Однако, часто вместо μ используется параметр μ/ρ (ρ - массовая плотность), которая не зависит от физического состояния поглотителя и, в конечном счете, определяется эффективным сечением (σ) поглощения: $\mu/\rho = \sigma N_A / Z_{эфф}$, где N_A - число Авогадро и $Z_{эфф}$ - эффективная атомная масса. Согласно экспериментальным данным [1-5] μ в кристаллах NaI (Tl) состоит из трех компонентов:

$$\mu = \mu_{\phi} + \mu_{\kappa} + \mu_{\pi} \quad (1)$$

где компоненты μ_{ϕ} , μ_{κ} и μ_{π} связаны с процессами фотоэлектрического поглощения, комптоновского рассеяния и парообразования в результате взаимодействия γ-квантов с материалом сцинтиллятора. При энергиях $E_{\gamma} \leq 0,5$ МэВ, $\mu/\rho \sim Z_{эфф}^4$; $E_{\gamma} \gg 1,02$ МэВ, $\mu/\rho \sim Z_{эфф}^{-1}$, а при промежуточном интервале $\mu/\rho \sim Z_{эфф}$. Для NaI (Tl) $Z_{эфф} = 51$.

Эффективность и энергетическое разрешение спектрометра были определены на основе калибровочных измерений. Полная эффективность (ϵ), как отношение

числа квантов зарегистрированных детектором к числу квантов, попавших на поверхность кристалла, в общем виде имеет вид:

$$\epsilon(E_{\gamma}) = \frac{\int \{1 - \exp[-\mu(E)d]\} d\Omega}{\int d\Omega} \quad (2)$$

где Ω - телесный угол, под которым виден полезный объем кристалла.

Во время эксперимента для каждого конкретного случая с учетом параметров детектора и источника, а также их взаимного расположения зависимость (2) приводилась к более конкретному виду [2].

Энергетическое разрешение (R) спектрометра, определяемое как отношение ширины спектра к энергии γ-кванта на полувысоте пика полного поглощения (ППП), связано с рядом факторов, начиная от поглощения первичного кванта до формирования импульса напряжения на выходе тракта УФС. С учетом всех обстоятельств, существенно влияющих на энергетическое разрешение, для R имеем:

$$R = 236 \sqrt{\frac{1}{fN_0} \cdot \frac{k}{k-1}} \quad (3)$$

где f - фактор сбора фотоэлектронов на первом диоде, $k=2,6$ - коэффициент вторичной эмиссии диодов $N_0 = E_{\gamma} / \epsilon$. При $E_{\gamma} = 661,6$ кэВ, $R = 8\%$.

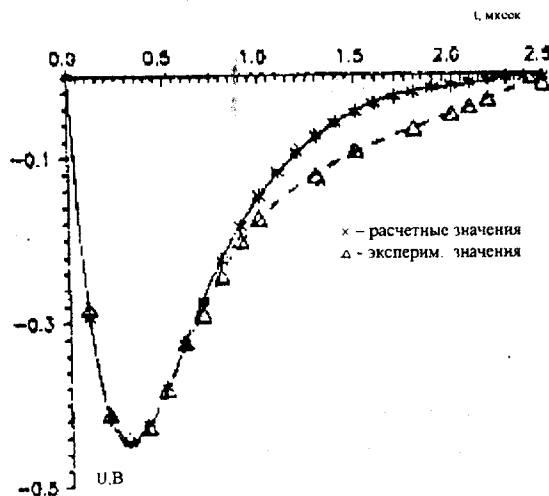


Рис.2. Зависимость импульса напряжения от времени

Форма выходного сигнала (импульса напряжения) сцинтиллятора, наряду с другими физическими параметрами, определяет выбор режима спектрометрического тракта $u(t)$ имеет следующий аналитический вид [2,6,7]:

$$u(t) = \frac{qN_0}{C} \cdot \frac{1}{t_0/\tau - 1} [\exp(-t/t_0) - \exp(t/\tau)] \quad (4)$$

где C - емкость конденсатора, q - заряд, t_0 - среднее время жизни возбужденной молекулы, τ - время релаксации.

На рис. 2. представлена зависимость $u(t)$ для сцинтиллятора NaI(Tl) размером 63х63 мм, полученной экспери-

ментально от источника ^{137}Cs и теоретически вычисленная [2] по формуле (4), где видны их удовлетворительные согласия.

РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ СПЕКТРОМЕТРА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ НЕКОТОРЫХ γ -ИСТОЧНИКОВ.

При γ -спектрометрировании с помощью NaI(Tl) очень важным является точное установление формы ППП, на которых отражаются механизмы поглощения γ -квантов в сцинтилляторе.

На рис.3 представлены гамма-спектры радиационного фона в помещении (рис.3а), где установлен γ -спектро-

метр и источников ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{22}Na (рис.3б), ППП, которые имеют гауссовую форму:

$$g(n) = \frac{S}{\sqrt{\pi}\delta} \exp\left(-\frac{(n - n_0)^2}{2\delta^2}\right), \quad (5)$$

где S - площадь под ППП, δ - среднеквадратичное отклонение величины n от его среднего значения n_0 (n_0 - номер канала соответствующего максимуму интенсивности спектра).

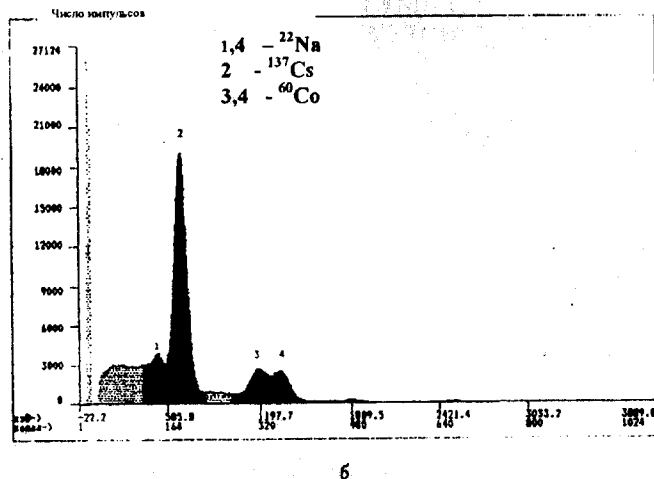
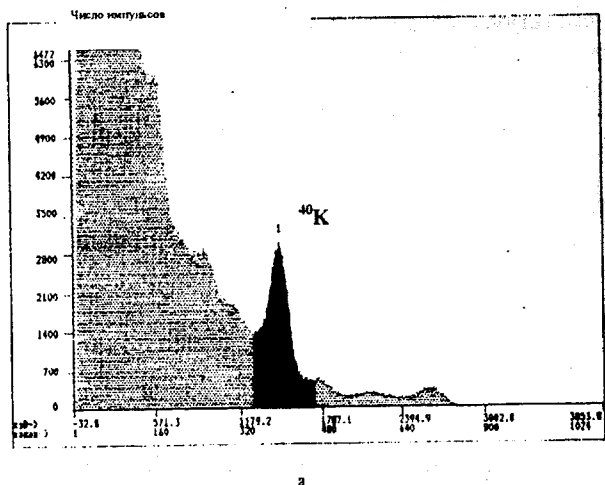


Рис.3. а - радиационный фон в лаборатории; б - гамма-спектр источников типа ОСТИ.

Известно [4], что для нормального распределения $\Delta E_{1/10} / \Delta E_{1/2} \leq 2$, что имеет место для полученных нами спектров.

Для вычисления $\varepsilon(E)$, согласно его определению, число γ -квантов, попавших на поверхность сцинтиллятора, рассчитывалось по закону $N = N_0 2^{-t/T_{1/2}}$ (N_0 - число радиоактивных ядер при $t = 0$), а число зарегистрированных импульсов - как сумма импульсов по всем каналам анализатора АИ-1024. Рассчитана фотоэффективность спектрометра, определяемая как отношение число импульсов под ППП к общему числу квантов. При этом расчеты проводились с учетом геометрии конкретного эксперимента [2,3].

На рис. 4 представлены рассчитанные и экспериментальные значения $\varepsilon(E)$ для детектора на кристалле NaI(Tl) (63x63 мм), что показывает их удовлетворительное согласие. Энергетические разрешения экспериментально определены, исходя из равенства

$$R = \frac{\Delta E_{1/2}}{E_{\max}} \cdot 100\% = \frac{\Delta N_{1/2}}{N_{\max}} \cdot 100\%, \quad \text{где через}$$

$\Delta E_{1/2}$ и $\Delta N_{1/2}$ обозначены, соответственно, энергетическая ширина на полувысоте при E_{\max} и число каналов, попавших под ППП при ее полувысоте, а N_{\max} - номер канала при максимуме пика.

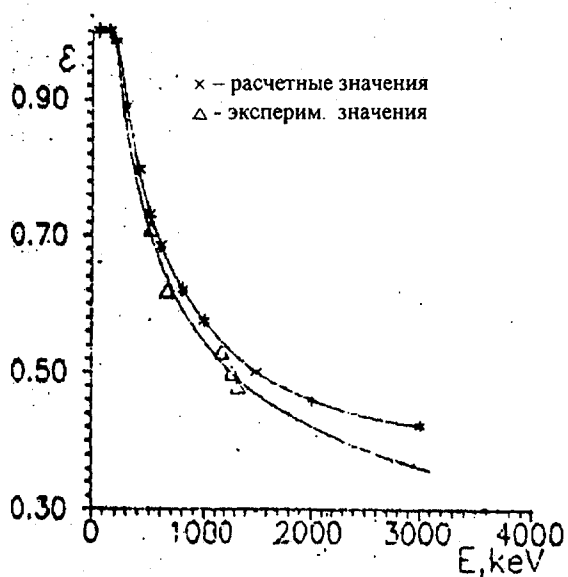


Рис.4. Эффективность для детектора 63 х63 мм

В таблице приводятся основные характеристики источников ОСГИ, используемые в наших экспериментах, а также некоторые параметры построенного и откалиброванного нами спектрометра.

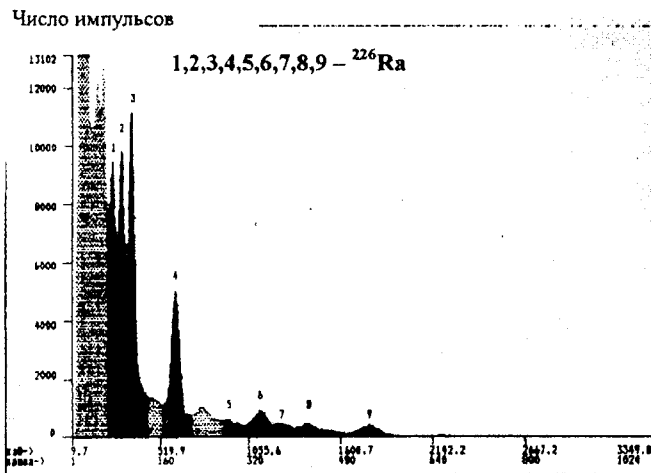
Следует отметить, что изучение аппаратного спектра уранорадиевого семейства $\text{U}^{(226}\text{Ra})$ дает очень полезную информацию относительно параметров спектромет-

Таблица 1. Основные характеристики исследованных источников и параметры γ -спектрометра.

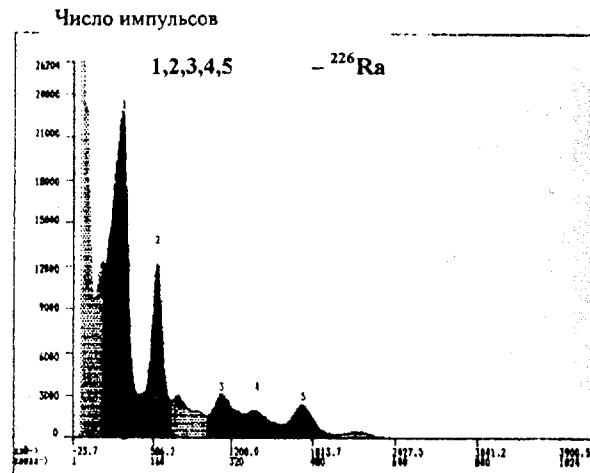
Характеристики источников ОСГИ				Параметры гамма-спектрометра					
Радио-нуклид	Активность, Бк	Энергия γ -квантов, кэВ	Период полураспада $T_{1/2}$, год	Энергетическое разрешение, R, %	Эффективность, ϵ_1	Фотоэффективность, ϵ_f	Фотоэффективность, ϵ_f	Полиэффективность, ϵ	Размеры детектора, мм
^{137}Cs	86000	661,6	30,174	7,8	0,62	0,45	0,28	0,64	63 x 63
^{22}Na	8350	511 1274,5	2,559	9,0 6,0	0,71 0,58	0,49 0,26	0,35 0,13	0,63	
^{60}Co	23600	1173,2 1332,5	5,271	6,2 5,9	0,53 0,48	0,28 0,25	0,15 0,12	0,51	
^{137}Cs	86000	661,6	30,174	12,6	0,90	0,60	0,54	0,93	150 x 100
^{22}Na	8350	511 1274,5	2,559	13,9 9,9	0,92 0,80	0,61 0,42	0,56 0,34	0,80	
^{60}Co	23600	1173,2 1332,5	5,271	10,5 9,7	0,82 0,79	0,43 0,41	0,36 0,33	0,82	

ра, а также по методике проведения экспериментов и обработки результатов. С этой целью нами изучен энергетический спектр $\text{U}^{(226}\text{Ra})$ с помощью двух детекторов, имеющих различные размеры. Экспериментальные исследования показали, что спектрограммы $\text{U}^{(226}\text{Ra})$ хорошо повторяют друг друга. Тем не менее, в детекторе

63x63 мм основные γ -линии изученного образца проявляются более четко (рис.5), что обусловлено высокой энергетической разрешаемостью детектора указанного типа. Отметим также, что высокие энергетические разрешения γ -спектрометров очень важны при решении радиоэкологических задач [3].



а



б

Рис. 5. а - энергетический спектр ^{226}Ra , снятый с детектора 63x63 мм; б - энергетический спектр ^{226}Ra , снятый с детектора 150x100 мм.

ВЫВОДЫ

1. Разработан и построен γ -спектрометр на базе монокристалла NaI (0,1 % Tl), позволяющий обнаруживать и регистрировать γ -излучения в энергетическом диапазоне от 0,05 до 3 МэВ. Спектрометрический комплекс полностью автоматизирован и имеет математическое и программное обеспечение.

2. Исследованы энергетические спектры образцовых эталонных источников ОСГИ ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{22}Na , а также $\text{U}^{(226}\text{Ra})$, определены их основные спектрометрические характеристики.

3. Теоретически рассчитаны и экспериментально определены основные параметры спектрометра - эффективность, энергетические разрешения и другие характеристики спектрометра по исследованию энергетических спектров образцовых гамма-источников.

[1] M. Ishii, M. Kobayashi. КЕК Preprint 92-10 April, 1992 Н., р. 66.

[2] А.Ш. Мехмиев, К.К. Мамедов, Н.А. Керимов, Ф.А. Асланов, Я.Г. Гусейналиев, В.Г. Бадалов, М.И. Мехмиев,

- А.А. Байрамов, Ш.А. Хуршудов, Л.М. Мамедова.* АНАКА, Препринт №141, 1996, с. 29.
- [3] *К.К. Мамедов, Н.А. Керимов, В.Г. Бадалов, Я.Г. Гусейналиев, М.И. Мехтиев, Л.М. Мамедова.* В сб. Материалы второй республиканской научно-практической конференции «Азербайджан на пороге XXI века», Баку, 1998, с. 200-202.
- [4] *Н.Г. Волков, В.А. Христофоров, Н.П. Ушакова.* «Методы ядерной спектрометрии», М.: Энергоатомиздат, 1990, с. 256.
- [5] *Н.Г. Гусев, П.П. Дмитриев.* «Квантовые излучения радиоактивных нуклидов», М.: Атомиздат, 1977, с. 350.
- [6] *Р.М. Коган, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман.* «Основы гамма-спектрометры природных сред», М.: Атомиздат, 1976, с. 368.
- [7] *В.В. Матвеев, Б.И. Хазанов.* «Приборы для измерения ионизирующих излучений», М.: Атомиздат, 1972, с. 694.

Q.Q. Məmmədov N.A. Kərimov, V.H. Bədəlov, Y.H. Hüseyinliyev, M.İ. Mehdiyev, Ş.Ə. Xurşudov, L.M. Məmmədova

RADİOEKOLOJİ MƏSƏLƏLƏRİN HƏLLİNDƏ İSTİFADƏ OLUNA BİLƏN QAMMA-SPEKTROMETR KOMPLEKSİ

Məqalədə ətraf mühitdən götürülmüş nümunələrdə radioaktiv mənbələrin 0,05÷3 MeV enerji diapazonunda süalannmalarının spektrinı və başqa fiziki parametrlərini təyin etməyə imkan verən spektrometr kompleksinin qurulması və bir neçə radioaktiv mənbələrin enerji spektrinın öyrənilməsindən bəhs olunur.

K.K. Mamedov, N.A. Kerimov, V.G. Badalov, Ya.G. Guseynaliev, M.I. Mekhtiyev, Sh.A. Khurshudov, L.M. Mamedova

GAMMA-SPECTROMETRIC COMPLEX FOR SOLUTION RADIO-ECOLOGICAL PROBLEMS

In this paper there were presented the results of construction the stintilation spectrometric complex for detect gamma-redition from natural sources in the energy range of gamma-ray 0.05÷3 MeV and the results of study energetic spectrum and other physical characteristics of number gamma-sources often occuring in enviromental.