

# ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ СКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЯДЕРНО-ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

А.Б. Дорин, В.Ф. Ельцин, А.К. Чураков

ООО НИИП «Грин Стар Инструментс» г.Москва

Спектрометрические комплексы специализированные (СКС), производимые группой предприятий «Грин Стар», применяются на всех стадиях ядерного топливного цикла: разведка, добыча, обогащение, изготовление топливных элементов и сборок, технологический контроль на химических комбинатах и АЭС, переработка отработанного топлива, радиационный контроль промышленных предприятий и окружающей среды, инспекционный контроль, хранение и утилизация ядерных отходов.

Спектрометрические комплексы СКС используются при спектрометрическом анализе как отдельные измерительные средства регистрации альфа-, бета-, рентгеновского и гамма-излучения, так и в составе многочисленных стационарных и переносных устройств измерения (рентген-флюорисцентные анализаторы состава веществ, системы радиационного и технологического контроля, поисковые системы).

Основой СКС являются процессоры импульсных сигналов серии SBS:

- Семейство процессоров импульсных сигналов SBS-79, SBS-78 и SBS-77, предназначено для работы с детекторами невысокого разрешения: сцинтилляционными, газонаполненными и полупроводниковыми Si(Li), Si p-i-n, CdTe, CdZnTe, HgI<sub>2</sub> и т.д.
- SBS-75 - универсальный процессор, обеспечивающий работу с любыми типами блоков детектирования.
- SBS-70 используется при высоких входных нагрузках с любыми типами блоков детектирования.
- процессор импульсных сигналов «Колибри».

Процессоры устанавливаются в компьютер, превращая его в современный спектрометр (см. рис.1).



Рис.1

Внешний вид одного из процессоров импульсных сигналов (SBS-75) представлен на рис.2.

Процессор SBS-75 обеспечивает работу с любыми типами блоков детектирования: сцинтилляционными детекторами, фосвич-детекторами, пропорциональными счетчиками, ионизационными камерами, детекторами на основе кристаллов особо чистого германия, кремния, теллурида кадмия и т.д.



Рис.2

Программы спектрометрического анализа группы предприятий «Грин Стар» предназначены для создания комплексного математического и программного обеспечения автоматизированного рабочего места спектрометрического анализа на базе процессора импульсных сигналов SBS как в одноплатном, так и многоплатном варианте исполнения.

Пакет программ включает в себя:

- Программу эмулятор анализатора «Esbs», обеспечивающую полную настройку комплекса и получение от него спектрометрических данных.
- Программы обработки спектров: альфа, бета, гамма и рентгеновского – излучения «AlfaBasic», «BetaBasic», «GammaBasic», «ScintBasic», «Gamma Pro», «FusMat», «X-ray», позволяющие подготавливать все калибровки спектрометра, данные о нуклидах и элементах, их линиях и производить обработку спектров, включая качественный и количественный анализ.

Все программы обработки спектров зарегистрированы в Отраслевом фонде алгоритмов и программ Государственного координационного центра информационных технологий РФ и сертифицированы в системе Госстандарта РФ.

Программное обеспечение реализовано на базе разработанных в соответствии с современными требованиями и аттестованных в Госстандарте РФ ФГУП «ВНИИФТРИ» методик выполнения измерения различных счетных образцов.

**«Паспортизатор РАО»** - комплекс спектрометрический (рис.3), предназначенный для измерения активности счетных образцов по гамма- излучению в геометрии 200 литровой бочки или контейнера с жидкими или твердыми радиоактивными отходами.



Рис.3

«Паспортизатор РАО» представляет собой измерительное устройство в состав которого входят:

- измерительный тракт с соответствующим блоком детектирования (сцинтилляционным детектором или детектором на основе кристалла из особо чистого германия);
- процессор импульсных сигналов SBS, установленный в персональный компьютер;
- программное обеспечение «Гамма Про»;
- электромеханическое поворотное устройство;
- свинцовая защита;
- эксплуатационная документация.

Использование мобильных спектрометрических комплексов СКС было реализовано при решении задачи контроля донных отложений предприятий ядерно-опасных объектов.

Из-за сложного изотопного состава продуктов деления и коррозионных элементов в донных отложениях АЭС и химических комбинатов контроль можно осуществить, используя полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений (ППД). Высокое энергетическое разрешение имеют ППД на основе германия, однако для работы с ним необходимо охлаждение ППД до температуры жидкого азота. Вес и габариты ППД с небольшим сосудом Дьюара, заполненным жидким азотом, позволяют пользователю перемещаться и выполнять необходимые измерения.

В связи с этим, был разработан спектрометрический комплекс на основе ППД с портативным сосудом Дьюара, помещённым в корпус из нержавеющей стали, имеющий герметичный шланг с внутренним диаметром, достаточным для расположения внутри шланга комплекта кабелей, предназначенных для съема сигнала с детектора и подачи на него питающего напряжения.

В комплект мобильного спектрометрического комплекса СКС вошел процессор импульсных сигналов SBS-75, который был установлен в слот расширения PCI переносного, защищённого от воздействия окружающей среды в соответствии с IP54 исполнения ноутбука Dolch с питанием от автономных источников (аккумуляторов) (см. рис.4). Наличие в комплексе специализированного программного обеспечения «GammaPro» позволило реализовать функцию определения активности счетных образцов в геометрии протяженного источника: куб (прямоугольные контейнеры), плоские источники (пластина, поверхность), цилиндр (бочка, труба), сфера с учетом поглощения излучения в материале образца и защитном слое воды с использованием моделирования по методу Монте-Карло.



Рис.4

При проведении испытаний мобильного погружного спектрометрического комплекса проводилась экспериментальная проверка соблюдения требований к составу, конструктивному устройству, геометрии измерений и правильности определения нуклидного состава и активности радиоактивных веществ в геометрии протяженного источника (цилиндр, прямоугольник), погруженного в воду. Для этого использовалась 200 литровая бочка в которую погружались источники различной геометрической формы и заливалась вода.

Вид спектра одного из источников с радионуклидами Ва-133 и Eu-152, размещенных на дне бочки с водой, представлен на рис. 5.

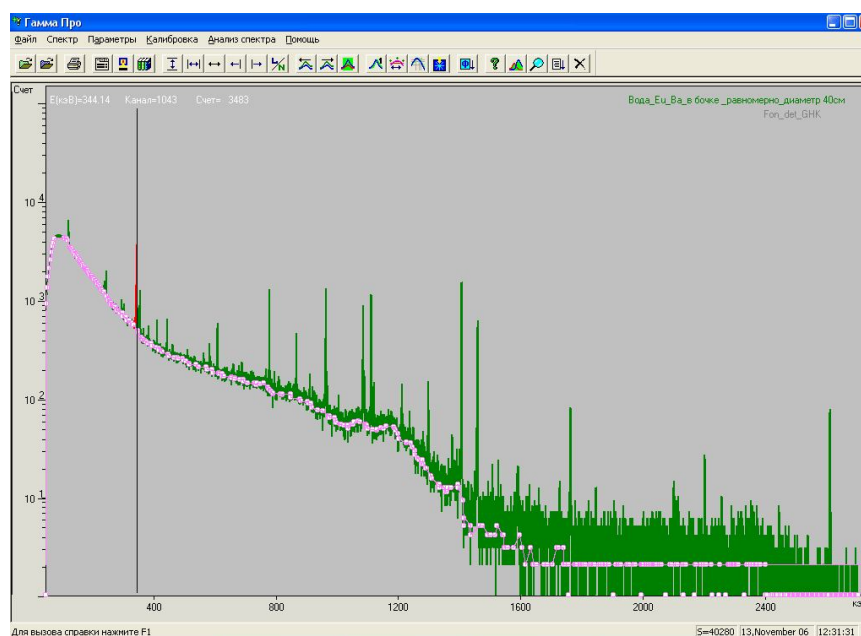


Рис.5

На основании проведенных измерений, расчета активности и сравнения экспериментальных данных с паспортными значениями активности образцовых источников, можно сделать вывод, что при измерении активности различных источников находящихся под водой, отклонение от паспортного значения менее 50% не превышает значения расширенной неопределенности измерений составляющего 60%.

В настоящее время производятся ППД, где в качестве детекторов ионизирующих излучений используется теллурид кадмия. Из-за более широкой запрещенной зоны тепловая генерация носителей зарядов в теллуриде кадмия на несколько порядков ниже, чем у германия и кремния. Поэтому, такие детекторы можно эксплуатировать при комнатной и повышенной температуре.

С точки зрения поглощения гамма излучения теллурид кадмия имеет преимущества по сравнению с германием. В связи с тем, что у теллурида кадмия эффективный атомный номер ( $Z_{эфф} \approx 52$ ) существенно больше, чем у германия ( $Z=32$ ), теллурид кадмия обладает способностью поглощать гамма-излучение значительно больше, чем германий.

Учитывая, что объемы чувствительных областей детекторов из теллурида кадмия не превышают двух кубических сантиметров, эти детекторы нашли преимущественное применение для регистрации гамма-квантов с энергией до 1,5 МэВ при измерении высоких активностей.

Для обработки сигналов ППД на основе теллурида кадмия, формирования питающего и высокого напряжения ППД, использовался процессор импульсных

сигналов из спектрометрического комплекса СКС-08П «Колибри». Сигнал с выхода ППД подавался на вход процессора импульсных сигналов "Колибри", в котором усиливался, формировался специальным образом для получения оптимального отношения сигнал/шум и преобразовывался в цифровой код, пропорциональный поглощённой энергии. Получаемые коды накапливались в памяти процессора и образовывали энергетический спектр излучения.

Наряду с ППД, широко используются сцинтилляционные детекторы, имеющие большую эффективность регистрации. Однако для более стабильной работы в блоках детектирования, базирующихся на сцинтилляционных кристаллах из NaI(Tl) использовался ФЭУ фирмы «Hamamatsu».

Для проведения натурных испытаний был использован аппаратно-программный комплекс «Нырок-2», базирующийся на спектрометрическом комплексе СКС-08П-Г53 и включающий в себя:

- процессор импульсных сигналов «Колибри» (модель КС-003 «Т») с внутренней программой;
- блок детектирования на основе кристалла CdZnTe объемом 0.5 см<sup>3</sup> с сигнальным кабелем длиной 1.5 м;
- блок детектирования БДЭГ-50(50)Н с сигнальным кабелем длиной 1.5 м;
- выносную штангу длиной 3 м;
- герметичный водонепроницаемый корпус для установки любого из блоков детектирования и процессора импульсных сигналов «Колибри» с выходом связи на Notebook через порт связи RS-232;
- ЭВМ «Notebook»;
- комплект сигнальных кабелей в герметичном исполнении для связи процессора импульсных сигналов «Колибри» с компьютером «Notebook» 10 м длиной;
- герметичную транспортную упаковку (пластиковый чемодан);
- комплект специализированного программного обеспечения получения спектров - эмулятор анализатора «Esbs» и обработки спектров - «ScintBasic»;
- комплект образцовых источников ОСГИ;
- лебедка.

Так как измерения необходимо было проводить под водой, то блоки детектирования помещались в герметичный пенал (рис.6). Блоки детектирования располагали в нижней части пенала. Нижний торец пенала из нержавеющей стали имел толщину 0,8 мм. В пенал также помещался процессор импульсных сигналов «Колибри» с выходом связи на Notebook через порт связи RS. Управление процессом измерения происходило от ЭВМ типа Notebook.



Рис.6

Пенал имел сверху скобу для крепления к штанге или лебедке (см. рис.7).



Рис.7

Подготовка к испытаниям заключалась в проведении калибровки аппаратно-программного комплекса с процессором импульсных сигналов «Колибри» с каждым из двух блоков детектирования (на основе кристаллов CdZnTe и NaI(Tl)) по энергии и эффективности регистрации в геометрии «точечный источник в воде».

Проведение испытаний спектрометрического комплекса СКС с процессором импульсных сигналов «Колибри» проводилось в два этапа:

1. Натурные испытания счётных образцов с образцовыми источниками ОСГИ, размещенными в пластиковых кюветах на дне бочки с водой.
2. Натурные испытания комплекса при измерении серии аппаратурных спектров гамма - излучения в донных отложениях на одном из предприятий атомной отрасли.

Для анализа каждого счетного образца (источника ОСГИ), размещенного в пластиковой кювете на дне бочки с водой:

- опускали герметичный водонепроницаемый корпус с одним из блоков детектирования и процессором импульсных сигналов «Колибри» в бочку с водой, используя выносную штангу;
- производили набор спектра в течение времени  $\Delta t$  на специализированном программном обеспечении эмулятор анализатора «Esbs»;
- автоматически происходила идентификация гамма - излучающих радионуклидов и расчет активности счетного образца программой обработки спектров «ScintBasic».

Результаты проведения натуральных испытаний гамма- спектрометрического комплекса «Нырок-2» с образцовыми источниками ОСГИ и рабочим источником U-235, размещенными в пластиковых кюветах на дне бочки с водой сведены в таблицы.

Таблица 1

**Результаты проведения натуральных испытаний комплекса «Нырок-2» с блоком детектирования на основе кристалла CdZnTe.**

Радионуклид	Активность, Бк		$\frac{(A_0 - A_p)}{A_0}$ , %	Расширенная неопределенность, % (P=0.95)
	Паспортная $A_0$	Расчетная $A_p$		
Cs-137	$4.79 \cdot 10^4$	$4.85 \cdot 10^4$	1.3	57.3
Ba-133	$1.79 \cdot 10^4$	$2.36 \cdot 10^4$	24.2	57.1
Eu-152	$2.86 \cdot 10^4$	$2.32 \cdot 10^4$	18.9	57
Am-241	$3.24 \cdot 10^4$	$1.26 \cdot 10^4$	61	56.9
U-235	-	$1.4 \cdot 10^4$	-	58.9

Таблица 2

**Результаты проведения натуральных испытаний комплекса «Нырок-2» с блоком детектирования на основе кристалла NaI(Tl).**

Радионуклид	Активность, Бк		$\frac{(A_0 - A_p)}{A_0}$ %	Расширенная неопределенность, % (P=0.95)
	Паспортная $A_0$	Расчетная $A_p$		
Cs-137	$4.79 \cdot 10^4$	$4.75 \cdot 10^4$	0.8	25
Eu-152	$2.86 \cdot 10^4$	$2.99 \cdot 10^4$	4.3	24.6
Co-60	$2.27 \cdot 10^4$	$2.20 \cdot 10^4$	3.1	24.6

Опытный образец спектрометрического комплекса СКС с блоком детектирования на основе кристалла CdZnTe уверенно идентифицировал наличие источника U-235 в ампуле, помещенной в бочку с водой.

Результаты проведения натуральных испытаний гамма- спектрометрического комплекса «Нырок-2» с образцовыми источниками типа ОСГИ и рабочим источником U-235 подтверждают, что спектрометрического комплекса СКС является работоспособным и может решить задачи по идентификации продуктов деления и коррозионных элементов в донных отложениях АЭС и химических комбинатов.

Натурные испытания комплекса при измерении серии аппаратурных спектров гамма - излучения в донных отложениях на одном из ядерных предприятий проводили следующим образом:

- Используя лебёдку, опускали герметичный водонепроницаемый корпус с блоком детектирования CdZnTe и процессором импульсных сигналов «Колибри» в бассейн, фиксируя в журнале место спуска.
- Производили набор спектра в течение времени  $\Delta t$ . Длительность набора от 100 до 300 с специализированным программным обеспечением «Esbs», установленный в ЭВМ «Notebook».
- Программой обработки спектров «ScintBasic» автоматически проводили идентификацию гамма - излучающих радионуклидов. После чего на экране появлялся итоговый протокол обработки.

Результаты проведения натуральных испытаний гамма- спектрометрического комплекса «Нырок-2» в донных отложениях показали, что основным радионуклидом, который приносит всю входную загрузку спектрометрического тракта является Cs-137. В спектрах наблюдается присутствие радионуклидов Eu-152 и Co-60 (см. рис.8).



Рис.8

В результате обработки спектров, полученных при измерениях донных отложений, были сделаны выводы, что скорость счёта пика полного поглощения 662 кэВ радионуклида Cs-137 (продукта деления), можно соотнести с массой ядерного топлива, а наличие счёта в энергетическом диапазоне выше 1500 кэВ, являющееся показателем наличия интенсивного спонтанного деления радиоизотопа Pu-240, подтверждает присутствие вблизи детектора облученного ядерного топлива.



Вид спектра на гамма- спектрометрическом комплексе «Нырок-2» с блоком детектирования на основе кристалла CdZnTe при отсутствии вблизи блока ОЯТ (см. рис.9).

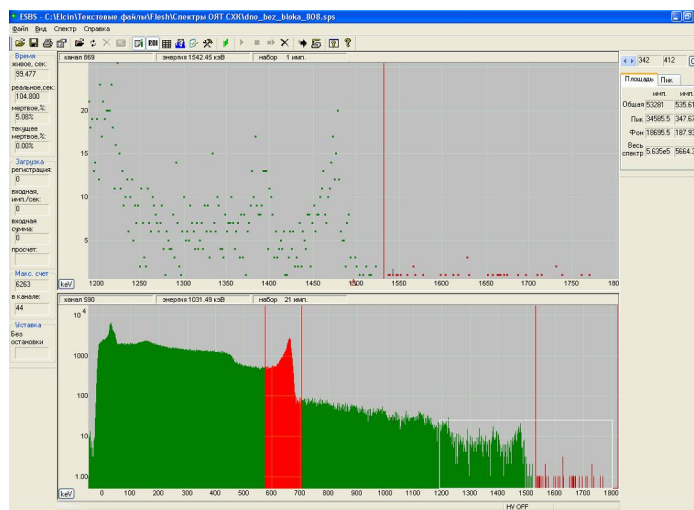


Рис.9

Вид спектра на гамма- спектрометрическом комплексе «Нырок-2» с блоком детектирования на основе кристалла CdZnTe в присутствии вблизи блока ОЯТ (см. рис.10).

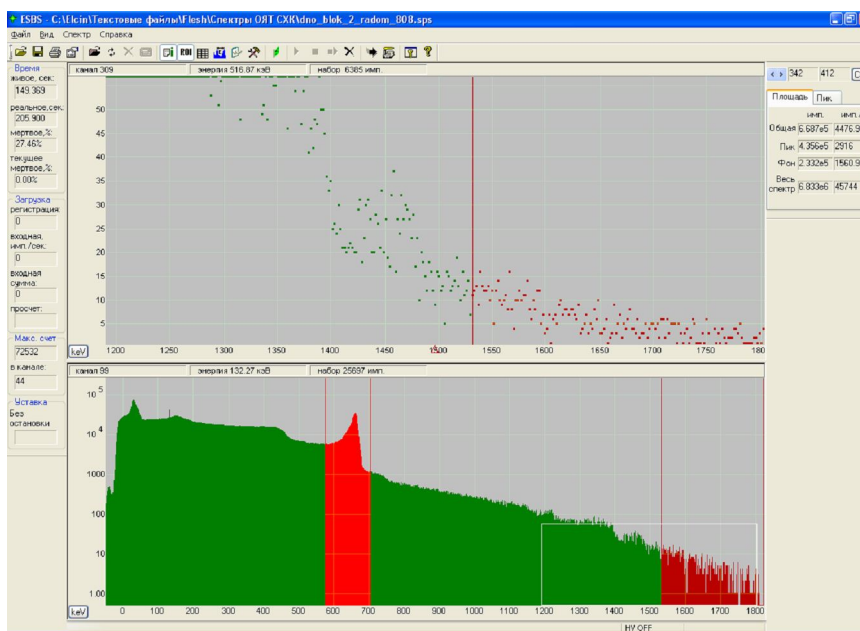


Рис.10

Гамма- спектрометрические комплексы СКС апробированы для выполнения поставленной перед ними задачи и могут быть поставлены Заказчику в минимальные сроки.