

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ РАО

*Л.Н.Давыдов, А.Н.Довбня, А.А.Захарченко, В.Е.Кутний, Д.В.Кутний, И.М.Прохорец,
А.В.Рыбка, И.Н.Шляхов
ННЦ ХФТИ, г.Харьков, Украина*

Показаний стан розробки, а також можливості сучасних напівпровідникових детекторів і приладів, призначених для контролю радіаційної обстановки на підприємствах атомної промисловості, у т.ч. на об'єкті "Укриття" і в сховищах відпрацьованого ядерного палива. Такі прилади, створені за останні роки, можуть успішно використовуватися для вимірів рівня потужності експозиційної дози гамма-випромінювання та оцінки ізотопного складу ядерних матеріалів і радіоактивних відходів, причому як в технологічних циклах, так і в аварійних ситуаціях.

Показаны состояние разработки, а также возможности современных полупроводниковых детекторов и приборов, предназначенных для контроля радиационной обстановки на предприятиях атомной промышленности, в т.ч. на объекте «Укрытие» и в хранилищах отработанного ядерного топлива. Такие приборы, созданные в последние годы, могут с успехом применяться для измерения уровня мощности экспозиционной дозы гамма-излучения и оценки изотопного состава ядерных материалов и радиоактивных отходов, причем как в технологических циклах, так и в аварийных ситуациях.

The possibilities and development status of the contemporary semiconductor detectors and detecting devices intended for radiation monitoring at nuclear industry enterprises, including Chernobyl Shelter and depositories of nuclear wastes are shown. Such devices, created in the last years, can be successfully used for measurements of the gamma-radiation dose rate as well as for the isotope composition evaluation of nuclear materials and wastes, both during the work cycles and in emergency situations.

Полупроводниковые детекторы по сравнению с ионизационными счетчиками, камерами деления, сцинтилляционными детекторами обладают меньшими габаритами и весом, высокой эффективностью регистрации \square -квантов [1], более широким динамическим диапазоном, радиационной стойкостью [2], более высоким квантовым выходом, лучшими энергетическим разрешением и отношением сигнал/шум.

Стратегия стабилизации ОУ [3] предусматривает:

- создание детекторов и систем измерения для ядерного и радиационного мониторинга при выполнении научно-исследовательских и экспериментальных работ,
- создание систем дистанционного измерения радионуклидного состава РАО и МЭД γ -излучения на всех стадиях обращения с ними.

Общие требования обращения с РАО на ОУ включают:

- предварительный контроль активности и радиационной обстановки;
- фрагментирование;
- извлечение;
- контроль активности и содержания;
- предварительную обработку;
- сортировку;
- переработку;
- паспортизацию;
- транспортирование и временное хранение;
- захоронение.

Почти на каждом из приведенных этапов возможно использование полупроводниковых детекторов.

Разработанные в настоящее время в ИФТТМТ ННЦ ХФТИ детекторы из CdTe, CdZnTe, GaAs могут быть применены, в частности, для:

- предварительного контроля активности и радиационной обстановки при фрагментировании и извлечении РАО;
- паспортизации извлеченных РАО соответственно с содержанием радионуклидов;
- сортировки отходов для разделения РАО по содержанию радионуклидов (топливосодержащие материалы (ТСМ)/другие РАО и долгоживущие / короткоживущие);
- контроля радионуклидного состава и удельной активности при хранении отходов РАО ОУ.

АНАЛИЗ МЭД γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОУ

Радиационную обстановку на ОУ определяют высокоактивные источники — долгоживущие трансураниевые элементы и радиоактивные осколки деления содержащиеся в ядерном топливе разрушенного реактора. В настоящий момент они представляют собой смесь обломков и частиц ядерного топлива с разнородными материалами разрушенного блока.

Примерно в 70% помещений ОУ МЭД γ -излучения не выше 0,1 Р/ч, в остальных — от 0,1 до 1,0 Р/ч [4]. Исключение составляют помещения, в которые попали ТСМ. Здесь МЭД выше 1,0 Р/ч. МЭД γ -излучения в местах сосредоточения ТСМ (в скважинах, люках) находится на уровне от нескольких сот до

2...4 тыс. Р/ч [5]. Излучение обусловлено главным образом ^{137}Cs .

Оперативная диагностика состояния ТСМ осуществляется на ОУ по динамике изменений нейтронного потока и, дополнительно по мощности дозы γ -излучения на поверхности и вблизи ТСМ. Их

измерение осуществляется с помощью стационарной системы ИИС «Финиш» в отдельных точках, доступных для контроля. В таблице 1 [4] представлены контрольные и критические значения МЭД γ -излучения ТСМ. Согласно таблице, значения МЭД лежат в интервале 70...4200 Р/ч.

Таблица 1

Мощность экспозиционной дозы γ -излучения ТСМ

Место измерения (скважина, люк)	Помещение	Контрольный уровень (МЭД), Р/ч	Критический уровень (МЭД), Р/ч
из п.213/2	210/6	454	490
скв.3.10.Г	304/3	690	750
скв.3.9.Ж	305/2	1560	1650
люк 16	914/2	70	90
люк 33	914/2	760	821
люк 33	914/2	665	720
3.15.Д	РП	890	935
люк 32	914/2	312	322
В.19.103	БВ	3990	4129
В.20.100	БВ	1350	1436
Ю.12.83	305/2	435	465

Результаты эксплуатации диагностической системы «Финиш» показали необходимость ее реконструкции в связи с физическим и моральным старением [5].

БЛОК ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ

С целью детектирования и контроля γ -излучения в аварийном режиме в ИФТТМТ разработан и прошел предварительные испытания блок детектирования (БД) МЭД γ -излучения, работающий в токовом режиме (измерение тока, индуцированного облучением) и предназначенный для измерений мощных γ -полей.

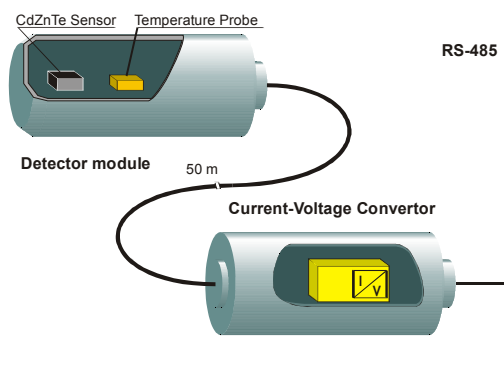


Рис. 1. Блок детектирования для контроля γ -излучения в аварийном режиме

В состав аварийного БД входят полупроводниковый детектор на основе соединения CdZnTe и преобразователь ток-напряжение (рис.1,2). БД и преобразователь соединены между собой кабелем длиной до 50 м.

Были проведены испытания, во время которых проверялись основные технические характеристики БД.

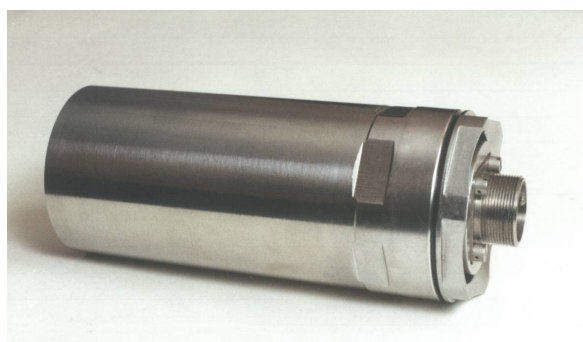


Рис. 2. Внешний вид блока детектирования для контроля γ -излучения в аварийном режиме

Как следует из рис.3, выходной сигнал преобразователя БД линейно зависит от напряжения смещения на детекторе в интервале $U_{см} = 80...150$ В. Из рис. 4 видно, что показания БД мало зависят от пространственной ориентации прибора. Максимальная анизотропия БД при изменении угла падения γ -излучения от 0 до 360° вокруг оси вращения БД равна 11 %.

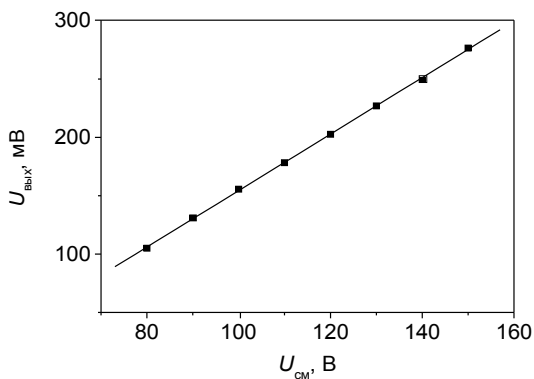


Рис.3 Зависимость напряжения на выходе преобразователя БД от напряжения смещения, подаваемого на полупроводниковый детектор при МЭД 37,8 Р/час (^{137}Cs)

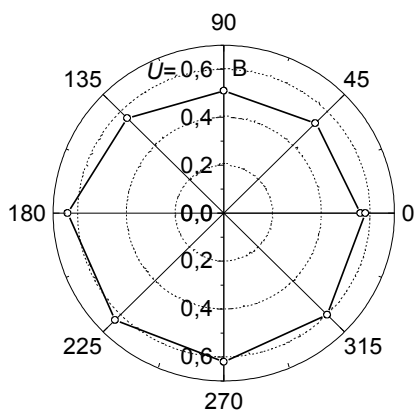


Рис.4 Зависимость напряжения на выходе преобразователя БД от угла падения γ -излучения при $U_{см} = 90$ В и МЭД — 422 Р/час (^{60}Co)

На рис. 5 показана зависимость напряжения преобразователя БД с детектором из CdZnTe размером $5 \times 5 \times 2$ мм³ от мощности дозы γ -излучения изотопа ^{137}Cs . Начиная с ~ 20 Р/час, эта зависимость линейна. Аналоговая чувствительность детектора из CdZnTe составляет $\sim 10^{-7}$ Кл/Р.

Аналогичные измерения были проведены на установке с источником большей мощности (^{60}Co , 5000 Р/час). Как следует из рис. 6, при регистрации γ -излучения в токовом режиме измерений индуцированный излучением ток линейно зависит от МЭД.

Разработанный БД будет использован на ОУ при реконструкции измерительного комплекса "Финиш". БД в составе системы контроля будут выполнять функции аварийной сигнализации, постоянно отслеживая радиационное состояние ТСМ.

Для регистрации интенсивных полей γ -излучения при повышенных температурах, например, в аварийном режиме работы реактора может оказаться предпочтительным применение полупроводниковых детекторов на основе GaAs. Такие детекторы разработаны и изготовлены в ИФТТМТ и в настоящее время проходят испытания.

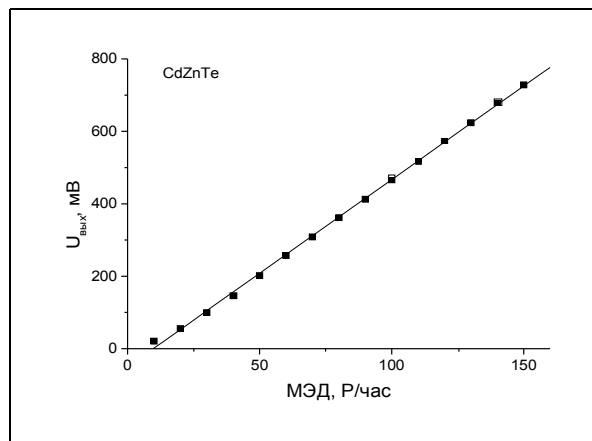


Рис.5. Зависимость напряжения на выходе преобразователя БД от МЭД источника γ -излучения ^{137}Cs

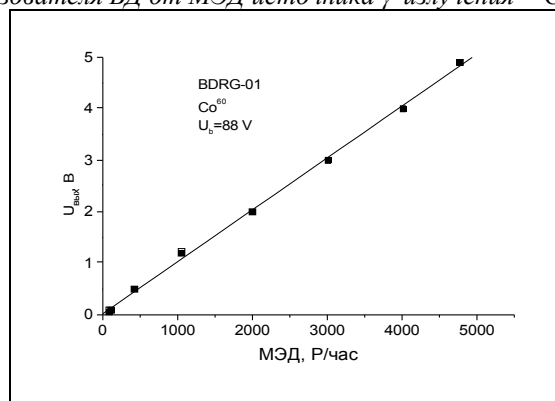


Рис.6. Зависимость напряжения на выходе преобразователя БД от МЭД источника γ -излучения ^{60}Co

СПЕКТРОМЕТРИЯ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ

В состав радиоактивных отходов на ОУ входят:

- лавообразные топливосодержащие массы (ЛТСМ);
- фрагменты активной зоны реактора (ТВЭлы, ТВС и др.);
- реакторный графит;
- строительные материалы;
- металл и металлоконструкции, в т.ч. реактора;
- радиоактивная пыль.

В РАО содержатся долгоживущие радионуклиды ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am — наиболее важные с точки зрения радиационной опасности. Одна из основных задач при обращении и контроле РАО — определение содержания радионуклидов.

По энергетическому разрешению спектрометры из CdTe уступают Ge, но отсутствие криогенных систем позволяет создать на основе детекторов из CdTe компактные и удобные в эксплуатации приборы для γ -спектрометрии.

Использование переносного спектрометра с CdTe детектором позволит проводить радионуклидный анализ ТСМ (в том числе ЛТСМ), находящихся внутри аварийных сооружений без экстракции проб. Подтверждением этого могут служить результаты приведенные ниже.

На рис. 7 приведен спектр γ -квантов в диапазоне энергий 500...800 кэВ от ^{99}Mo , активированного γ -квантами с энергией до 15 МэВ, полученный с по-

мощью неохлаждаемого CdTe детектора размером 5×5×2 мм при 25°C. Набор γ -излучателей аналогичен содержащемуся в ТСМ и ОЯТ.

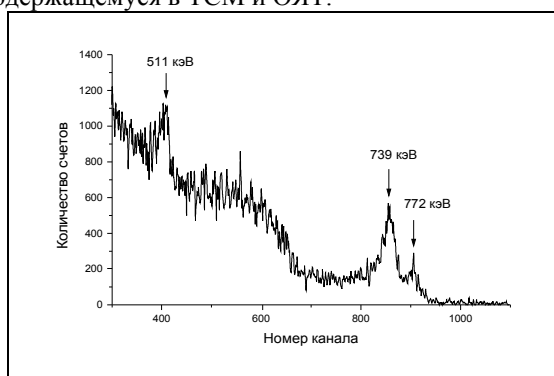


Рис. 7. Энергетический спектр γ -квантов от Mo^{99} , активированного γ -квантами с энергией до 15 МэВ

Отметим, что спектр получен без электронной коррекции сигнала и без математической обработки результатов измерения, которые позволяют дополнительно улучшить энергетическое разрешение.

При хранении ОЯТ гамма-спектрометрические измерения продуктов деления при достаточно большой (более года) выдержке облучённого топлива обычно проводятся в интервале энергий 500...800 кэВ. В этом интервале лежат линии γ -излучения таких долгоживущих продуктов деления как ^{106}Ru (511,8 и 621,8 кэВ), ^{134}Cs (604,6 и 795,8 кэВ), ^{137}Cs (661,6 кэВ), ^{95}Zr (724,2 и 756,7 кэВ), ^{95}Nb (765,8 кэВ), ^{144}Ce (696,4 кэВ). Для одновременной избирательной регистрации гамма-излучения указанных нуклидов необходим спектрометр, с энергетическим разрешением не хуже 10...12 кэВ.

В качестве иллюстрации к вышесказанному приведем результаты работы [6], где были проведены исследования отработанного ядерного топлива. Набор γ -излучателей аналогичен содержащемуся в ТСМ. Использовался спектрометр фирмы Amptek (США) с CdZnTe детектором размером 3×3×2 мм, охлажденный при помощи полупроводникового холодильника до -30°C (Рис. 8).

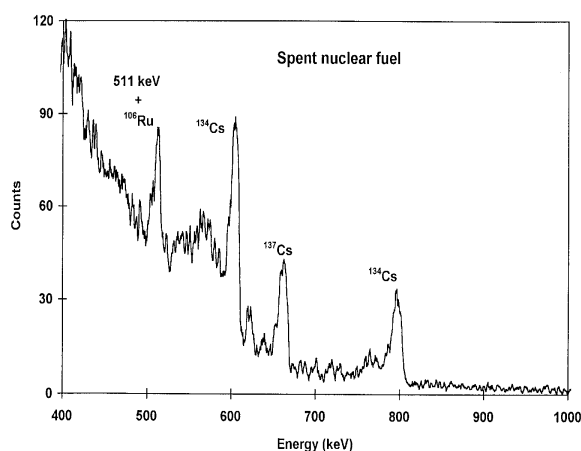


Рис. 8. γ -спектр отработанного ядерного топлива, полученный при помощи CdZnTe детектора 3×3×2 мм при -30 °C [6]

Таким образом, существует практическая возможность использования CdTe (CdZnTe) детекторов для дистанционного контроля радионуклидов в ТСМ. По чувствительности и по отсутствию влияния фона имеющиеся в настоящее время детекторы удовлетворяют условиям измерений. Их энергетическое разрешение на линии 662 кэВ (^{137}Cs) должно составлять 15...20 кэВ, что во многих практических случаях достаточно для анализа смеси радионуклидов РАО и ОЯТ. В этом случае γ -линии в спектре не будут перекрываться и будут наблюдаться как отдельные пики.

ПРОБЛЕМА АМЕРИЦИЯ

Динамика активности важнейших радионуклидов ОУ представлена в табл.2.

Таблица 2

Динамика средней (удельной) активности важнейших радионуклидов на различных этапах обращения с РАО ОУ, $\times 10^6$ Бк/г U [3]

Год	1996	2000	2004	2015	2030	2070
^{90}Sr	940	850	770	590	410	160
^{137}Cs	1100	1000	920	710	500	200
^{238}Pu	7,4	7,26	6,9	6,4	5,7	4,1
^{239}Pu	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
^{240}Pu	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
^{241}Pu	600	500	410	240	120	170
^{241}Am	13	16	19	24	28	29

Главным фактором радиологической опасности ТСМ ОУ на протяжении ближайшего времени будет естественный распад продуктов деления, а в дальнейшем — радиоактивность долгоживущих трансурановых элементов, к которым относятся ^{241}Am (с периодом полураспада свыше 430 лет) и плутоний ^{239}Pu (период полураспада свыше 24 тыс. лет).

В первый год после аварии α -активность, в основном, определялась распадом ^{242}Cm и быстро уменьшалась. По прошествии нескольких лет лидерами стали изотопы Pu (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu), активность которых медленно падает. В то же время увеличивается вклад в α -активность ^{241}Am , накапливающегося в результате β -распада ^{241}Pu . При помощи CdTe детекторов мы можем определять содержание ^{241}Am по его спектру γ -излучения.

На рис. 9 представлен типичный спектр γ -квантов источника ^{241}Am из набора ОСГИ, измеренный CdZnTe детектором (при 27°C) размером 5×5×1 мм. Время экспозиции 30 с, расстояние до источника 1 см.

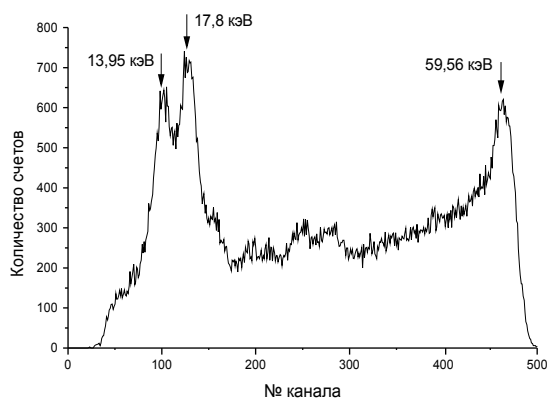


Рис. 9. Спектр ^{241}Am , полученный CdZnTe детектором

Реальные спектры в условиях ОУ будут сложнее. На рис. 10 показано, что имеется возможность регистрировать CdZnTe детектором низкоэнергетичные γ -кванты, в данном случае от $^{99\text{m}}\text{Tc}$, на фоне интенсивных излучений высокоэнергетичных γ -квантов (с энергией до 800 кэВ) и β -частиц. Высокоэнергетическая часть фона практически не регистрируется за счет подбора толщины кристалла детектора.

Рис.11 также иллюстрирует возможности энергетического разрешения CdZnTe детектора. На нем представлен спектр установленных совместно источников ^{241}Am и ^{152}Eu , полученный 2 мм детектором из CdZnTe.

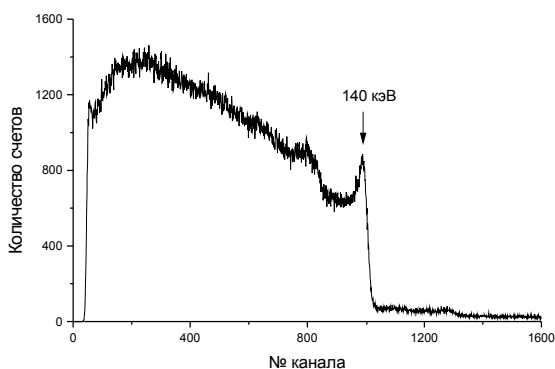


Рис. 10 Спектр активированной мишени $^{99\text{m}}\text{Mo}$, полученный CdZnTe детектором ($5 \times 5 \times 1$ мм) при комнатной температуре. Использовался фильтр из Си толщиной 0,5 мм МЭД γ -излучения 0,5 Р/ч

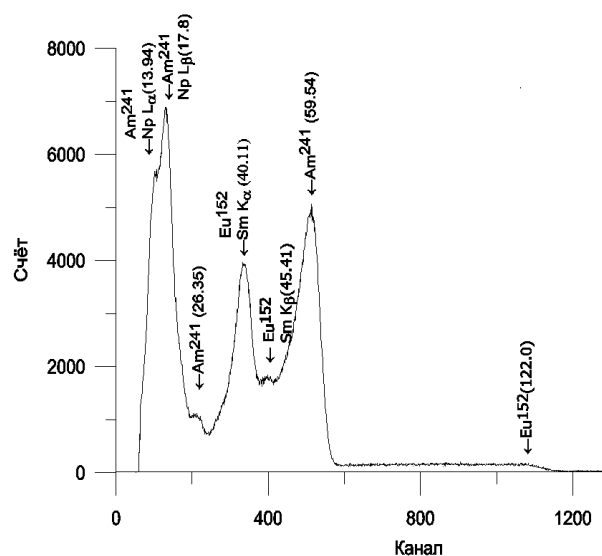


Рис.11 Спектр установленных совместно источников ^{241}Am и ^{152}Eu

Возможности спектрометрии ^{241}Am с использованием электронной коррекции сигнала и охлаждения детектора при помощи полупроводникового холодильника иллюстрирует рис.12. На нем приведен спектр ^{241}Am , полученный фирмой Amptek на спектрометре XR-100T-CZT с использованием Ве окна толщиной 10 мкм. Использовался CdZnTe детектор размером $3 \times 3 \times 2$ мм охлажденный до -30°C .

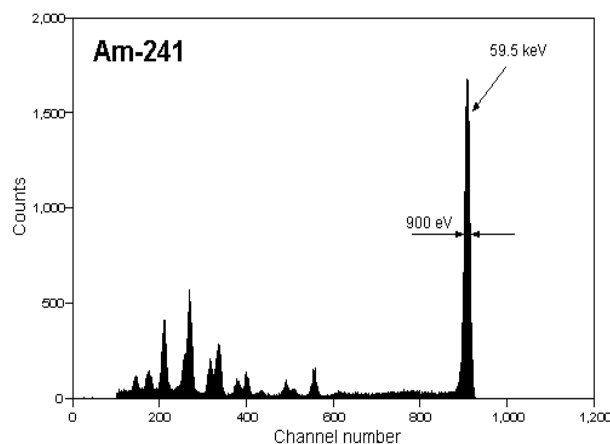


Рис. 12 Спектр, полученный на спектрометре XR-100T-CZT фирмы «Amptek»; детектор из $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ ($3 \times 3 \times 2$ мм, $T = -30^\circ\text{C}$)

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В.Рыбка, И.М.Прохорец, И.Н.Шляхов, А.А. Захарченко, А.А.Блинкин., Л.Н.Давыдов М.А.Кузьмичев, Д.В.Кутний, А.Н.Оробинский, Н.И.Кравченко. Дозиметрические характеристики детекторов рентгеновского и гамма-излучения на основе CdTe (CdZnTe) // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*, 2000, №4, с.208–211.
2. В.Е.Кутний, А.В.Рыбка, И.М.Прохорец, Л.Н.Давыдов, А.С.Абызов, А.Н.Довбня, С.П.Карасев, В.Л.Уваров, И.Н.Шляхов. Исследование радиационной стойкости детекторов ионизирующих излучений на основе CdTe и CdZnTe // *Вопросы атомной науки и*

техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение», 2000, №4, с.212–214.

3.«Концепції поводження з радіоактивними відходами на об'єкті "Укриття"», 1999.

4.«Анализ безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации». Отчет о НИР МНТЦ «Укрытие», 2001.

5.В.И.Купный, А.А.Телегин, А.С.Товстоган Современное состояние и основные задачи по повышению безопасности объекта "Укрытие" //Атомна енергетика та промисловість України, 2000, №1, с.6–13.

6.K.Abbas, J.Morel, M.Etcheverry, G.Nicolaou. Use of miniature CdZnTe X/γ-detector in nuclear safeguards: characterisation of spent nuclear fuel and uranium enrichment determination //Nucl. Instr. & Meth., 1998, A 405, p.153–158.