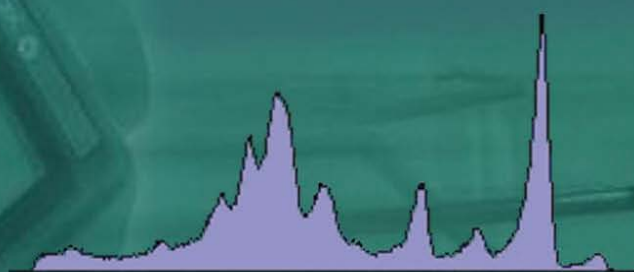


# Методы и оборудование для целей гарантий

Издание 2003 года



Серия изданий по  
международной ядерной  
проверке, № 1  
(пересмотренное издание)



**IAEA**

Международное агентство по атомной энергии

МЕТОДЫ И  
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ  
ЦЕЛЕЙ ГАРАНТИЙ

Издание 2003 года

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

АВСТРАЛИЯ	ЙЕМЕН	ПОЛЬША
АВСТРИЯ	КАЗАХСТАН	ПОРТУГАЛИЯ
АЗЕРБАЙДЖАН	КАМЕРУН	РЕСПУБЛИКА МОЛДОВА
АЛБАНИЯ	КАНАДА	РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
АЛЖИР	КАТАР	РУМЫНИЯ
АНГОЛА	КЕНИЯ	САЛЬВАДОР
АРГЕНТИНА	КИПР	САУДОВСКАЯ АРАВИЯ
АРМЕНИЯ	КИТАЙ	СЕЙШЕЛЬСКИЕ ОСТРОВА
АФГАНИСТАН	КОЛУМБИЯ	СВЯТЕЙШИЙ ПРЕСТОЛ
БАНГЛАДЕШ	КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	СЕНЕГАЛ
БЕЛАРУСЬ	КОСТА-РИКА	СЕРБИЯ
БЕЛЬГИЯ	КОТ-Д'ИВУАР	СИНГАПУР
БЕЛИЗ	КУБА	СИРИЙСКАЯ АРАБСКАЯ
БЕНИН	КУВЕЙТ	РЕСПУБЛИКА
БОЛГАРИЯ	КЫРГЫЗСТАН	СЛОВАКИЯ
БОЛИВИЯ	ЛАТВИЯ	СЛОВЕНИЯ
БОСНИЯ И ГЕРЦЕГОВИНА	ЛИБЕРИЯ	СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО
БОТСВАНА	ЛИВАН	ВЕЛИКОБРИТАНИИ И СЕВЕРНОЙ
БРАЗИЛИЯ	ЛИВИЙСКАЯ АРАБСКАЯ	ИРЛАНДИИ
БУРКИНА-ФАСО	ДЖАМАХИРИЯ	СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ
БЫШАЯ ЮГОСЛ. РЕСП.	ЛИТВА	АМЕРИКИ
МАКЕДОНИЯ	ЛИХТЕНШТЕЙН	СУДАН
ВЕНГРИЯ	ЛЮКСЕМБУРГ	СЬЕРРА-ЛЕОНЕ
ВЕНЕСУЭЛА	МАВРИКИЙ	ТАДЖИКИСТАН
ВЬЕТНАМ	МАВРИТАНИЯ	ТАИЛАНД
ГАБОН	МАДАГАСКАР	ТУНИС
ГАИТИ	МАЛАВИ	ТУРЦИЯ
ГАНА	МАЛАЙЗИЯ	УГАНДА
ГВАТЕМАЛА	МАЛИ	УЗБЕКИСТАН
ГЕРМАНИЯ	МАЛЬТА	УКРАИНА
ГОНДУРАС	МАРОККО	УРУГВАЙ
ГРЕЦИЯ	МАРШАЛЛОВЫ ОСТРОВА	ФИЛИППИНЫ
ГРУЗИЯ	МЕКСИКА	ФИНЛЯНДИЯ
ДАНИЯ	МОНАКО	ФРАНЦИЯ
ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ	МОНГОЛИЯ	ХОРВАТИЯ
РЕСПУБЛИКА КОНГО	МОЗАМБИК	ЦЕНТРАЛЬНОАФРИКАНСКАЯ
ДОМИНИКАНСКАЯ	МЬЯНМА	РЕСПУБЛИКА
РЕСПУБЛИКА	НАМИБИЯ	ЧАД
ЕГИПЕТ	НИГЕР	ЧЕРНОГОРИЯ
ЗАМБИЯ	НИГЕРИЯ	ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ЗИМБАБВЕ	НИДЕРЛАНДЫ	ЧИЛИ
ИЗРАИЛЬ	НИКАРАГУА	ШВЕЙЦАРИЯ
ИНДИЯ	НОВАЯ ЗЕЛАНДИЯ	ШВЕДИЯ
ИНДОНЕЗИЯ	НОРВЕГИЯ	ШРИ-ЛАНКА
ИОРДАНИЯ	ОБЪЕДИНЕННАЯ РЕСПУБЛИКА	ЭКВАДОР
ИРАК	ТАНЗАНИЯ	ЭРИТРЕЯ
ИРАН, ИСЛАМСКАЯ	ОБЪЕДИНЕННЫЕ	ЭСТОНИЯ
РЕСПУБЛИКА	АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ	ЭФИОПИЯ
ИРЛАНДИЯ	ПАКИСТАН	ЮЖНАЯ АФРИКА
ИСЛАНДИЯ	ПАНАМА	ЯМАЙКА
ИСПАНИЯ	ПАРАГВАЙ	ЯПОНИЯ
ИТАЛИЯ	ПЕРУ	

Устав Агентства был утвержден 23 октября 1956 года на Конференции по выработке Устава МАГАТЭ, которая состоялась в Центральных учреждениях Организации Объединенных Наций в Нью-Йорке. Устав вступил в силу 29 июля 1957 года. Центральные учреждения Агентства находятся в Вене. Главной целью Агентства является достижение “более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире”.

СЕРИЯ ИЗДАНИЙ ПО МЕЖДУНАРОДНОЙ ЯДЕРНОЙ  
ПРОВЕРКЕ  
№ 1 (пересмотренное издание)

МЕТОДЫ И  
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ  
ЦЕЛЕЙ ГАРАНТИЙ

Издание 2003 года

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ  
ВЕНА, 2007 ГОД

## УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ АВТОРСКОМ ПРАВЕ

Все научные и технические публикации МАГАТЭ защищены в соответствии с положениями Всемирной конвенции об авторском праве в том виде, как она была принята в 1952 году (Берн) и пересмотрена в 1972 году (Париж). Впоследствии авторские права были распространены Всемирной организацией интеллектуальной собственности (Женева) также на интеллектуальную собственность в электронной и виртуальной форме. Для полного или частичного использования текстов, содержащихся в печатных или электронных публикациях МАГАТЭ, должно быть получено разрешение, которое обычно является предметом соглашений о роялти. Предложения о некоммерческом воспроизведении и переводе приветствуются и рассматриваются в каждом отдельном случае. Вопросы следует направлять в Издательскую секцию МАГАТЭ по адресу:

Группа продажи и рекламы  
Издательская секция  
Международное агентство по атомной энергии  
Wagramer Strasse 5  
P.O. Box 100  
1400 Vienna, Austria  
факс: +43 1 2600 29302  
тел.: +43 1 2600 22417  
эл. почта: [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)  
веб-сайт: <http://www.iaea.org/books>

© МАГАТЭ, 2007

Напечатано МАГАТЭ в Австрии  
август 2003 г.  
IAEA/NVS/1/2003

Методы и оборудование для целей гарантий

Издание 2003 года  
МАГАТЭ, вена, 2007  
ISBN 92-0-400107-0  
ISSN 1020-6205

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В 1990-х годах в мире происходили значительные события в области нераспространения, открывшие новый период развития гарантий. За несколько лет был проведен анализ путей дальнейшего повышения действенности и эффективности гарантий МАГАТЭ. Кульминацией этих работ стало принятие Советом управляющих МАГАТЭ в мае 1997 года Дополнительного протокола к соглашениям о гарантиях, значительно расширяющего роль гарантий МАГАТЭ. Тем самым система гарантий МАГАТЭ вступила в новую эру.

Наряду с введением укрепленных систем гарантий, в 1997 году МАГАТЭ начало публикацию новой серии буклетов по гарантиям, названной Серией изданий по международной ядерной проверке (МЯП). Цель этих буклетов состояла в том, чтобы помочь в разъяснении гарантий МАГАТЭ, и особенно новых разработок в области гарантий, прежде всего для операторов установок и государственных служащих, занимающихся этими вопросами.

Данный буклет, представляющий собой пересмотренный и обновленный вариант издания IAEA/NVS/1, предназначается для того, чтобы дать полное и сбалансированное описание методов и оборудования, используемых для учета ядерного материала и осуществления мер по сохранению и наблюдению, а также новой меры гарантий - отбора проб окружающей среды. Для описания специфических функциональных возможностей, предусмотренных в установленных системах оборудования с целью обеспечения аутентичности и конфиденциальности информации, был добавлен совершенно новый раздел, посвященный обеспечению безопасности данных. По мере дальнейшего развития новых мер по проверке содержание данного буклета будет периодически пересматриваться, и будут выпускаться его обновленные варианты.

## *РЕДАКЦИОННОЕ ПРИМЕЧАНИЕ*

*Хотя были приложены большие усилия для поддержания точности информации, содержащейся в данной публикации, ни МАГАТЭ, ни его государства-члены не берут на себя ответственности за последствия, которые могут возникнуть в результате ее использования.*

*Использование тех или иных названий стран или территорий не выражает какого-либо суждения со стороны издателя – МАГАТЭ - относительно правового статуса таких стран или территорий, или их компетентных органов и учреждений, либо относительно определения их границ.*

*Упоминание названий конкретных компаний или продуктов (независимо от того, были они зарегистрированы или нет) не подразумевает какого-либо намерения нарушить права собственности, и его не следует рассматривать как одобрение или рекомендацию со стороны МАГАТЭ.*

## СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ .....	1
2.	НЕРАЗРУШАЮЩИЙ АНАЛИЗ .....	5
2.1.	ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЯ .....	5
2.1.1.	Гамма-излучение и обнаружение ядерных материалов .....	5
2.1.2.	Ручные многоцелевые гамма-спектрометрические приборы .....	8
2.1.3.	Многоканальные анализаторы .....	9
2.1.4.	Используемые МАГАТЭ методы гамма-спектрометрии высокого разрешения .....	11
2.2.	СЧЕТ НЕЙТРОНОВ .....	12
2.2.1.	Эмиссия нейтронов необлученным ядерным топливом и их детектирование .....	12
2.2.2.	Счет суммарного нейтронного потока .....	15
2.2.3.	Счет нейтронных совпадений .....	16
2.3.	ИЗМЕРЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА .....	20
2.3.1.	Эмиссия и детектирование нейтронов .....	20
2.3.2.	Регистрация суммарного нейтронного и гамма-излучения .....	22
2.3.3.	Спектрально-энергетический анализ гамма-излучения .....	23
2.3.4.	Сканирование гамма-излучения по интенсивности ....	25
2.3.5.	Регистрация черенковского излучения .....	26
2.4.	ДРУГИЕ МЕТОДЫ НРА .....	27
2.4.1.	Радиационные измерения .....	27
2.4.2.	Измерение физических свойств .....	27
3.	РАЗРУШАЮЩИЙ АНАЛИЗ .....	29
3.1.	ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ .....	32
3.1.1.	Анализ урана методом потенциометрического титрования .....	32
3.1.2.	Анализ плутония методом потенциометрического титрования .....	33
3.1.3.	Анализ плутония методом кулонометрии с контролируемым потенциалом .....	33



3.1.4.	Анализ урана методом гравиметрии с прокаливанием .....	34
3.1.5.	Анализ урана, тория или плутония методом рентгеновской денситометрии с использованием эффекта К-полосы поглощения .....	35
3.1.6.	Определение плутония методом рентгено-флуоресцентного анализа с использованием эффекта К-полосы поглощения .....	35
3.1.7.	Анализ плутония и/или урана методом рентгено-флуоресцентной спектromетрии с дисперсией по длине волны .....	35
3.1.8.	Анализ урана или плутония методом масс-спектрометрии с изотопным разбавлением .....	36
3.2.	ИЗОТОПНЫЙ АНАЛИЗ .....	37
3.2.1.	Анализ изотопного состава урана или плутония методом термоионизационной масс-спектрометрии ...	37
3.2.2.	Анализ изотопного состав плутония методом гамма-спектрометрии высокого разрешения .....	38
3.2.3.	Анализ урана-235 в растворе методом гамма-спектрометрии .....	39
3.3.	ДРУГИЕ МЕТОДЫ РА .....	39
4.	СОХРАНЕНИЕ И НАБЛЮДЕНИЕ .....	40
4.1.	НАБЛЮДЕНИЕ .....	41
4.1.1.	Стационарная однокамерная система для легкодоступных мест нахождения .....	49
4.1.2.	Стационарная однокамерная система для труднодоступных мест нахождения .....	49
4.1.3.	Стационарная многокамерная система .....	50
4.1.4.	Краткосрочное наблюдение .....	51
4.1.5.	Подводная телевизионная система для применения в неавтономном режиме .....	52
4.1.6.	Программное обеспечение для просмотра данных наблюдения .....	53
4.1.7.	Разные системы наблюдения и варианты .....	55
4.2.	ПЕЧАТИ .....	55
4.2.1.	Одноразовые печати .....	55
4.2.2.	Проверяемые на месте печати .....	57
5.	АВТОНОМНЫЙ МОНИТОРИНГ .....	61

6.	СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА .....	70
6.1.	ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА .....	71
6.2.	БУДУЩИЕ ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИЕ РАБОТЫ .....	72
6.2.1.	Сокращение объема данных .....	73
6.2.2.	Альтернативные методы связи .....	74
7.	БЕЗОПАСНОСТЬ ДАННЫХ .....	75
7.1.	ТРЕБОВАНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ .....	75
7.2.	ТРЕБОВАНИЯ МАГАТЭ .....	79
7.2.1.	Данные проверки .....	79
7.2.2.	Технические данные .....	81
7.2.3.	Данные управления .....	83
7.3.	ТРЕБОВАНИЯ ГОСУДАРСТВ-ЧЛЕНОВ .....	84
8.	ОТБОР ПРОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ .....	87
8.1.	ЧИСТАЯ ЛАБОРАТОРИЯ МАГАТЭ ПО ГАРАНТИЯМ .....	87
8.2.	СКРИНИНГ ПРОБ .....	89
8.2.1.	Низкоуровневая гамма-спектрометрия .....	89
8.2.2.	Рентгено-флуоресцентная спектрометрия .....	90
8.2.3.	Счет альфа/бета-частиц .....	90
8.3.	ИЗОТОПНЫЙ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ .....	91
8.3.1.	Термоионизационная масс-спектрометрия со счетом импульсов .....	91
8.3.2.	Растровая электронная микроскопия с электронно-зондовым анализом .....	92
8.3.3.	Метод треков ядерного деления .....	92
8.3.4.	Масс-спектрометрия вторичных ионов .....	94

# 1. ВВЕДЕНИЕ

Перед МАГАТЭ поставлена задача по обеспечению для международного сообщества постоянной уверенности в том, что государства, заключившие соглашения о гарантиях с МАГАТЭ, выполняют свои обязательства. Для этого необходима уверенность в обнаружении любого переключения поставленного под гарантии ядерного материала на запрещенные военные цели и в том, что заявлен весь ядерный материал в государстве. С этой целью МАГАТЭ должно иметь возможность проводить проверку правильности и полноты заявлений, которые оно получает от государств в отношении ядерных материалов, охватываемых соглашениями о гарантиях.

Кроме того, МАГАТЭ имеет право и несет обязанность проверять обязательства государств согласно их соглашениям о гарантиях и, в соответствующих случаях, Дополнительным протоколам. В частности, при осуществлении Дополнительного протокола и интегрированных гарантий инспектора должны иметь возможность подтверждать отсутствие незаявленных ядерных материалов и деятельности в ходе инспекций и посещений в рамках дополнительного доступа.

Основной мерой по проверке, используемой МАГАТЭ, является учет ядерного материала. Проводя учет ядерного материала, инспектора по гарантиям МАГАТЭ выполняют независимые измерения с целью количественной проверки ядерного материала, указанного в учетных записях государства. Для этого инспектора проводят подсчет предметов (например, топливных сборок, кассет или стержней, или контейнеров, содержащих порошкообразные соединения урана или плутония) и выполняют атрибутивные тесты этих предметов во время инспекций, используя методы неразрушающего анализа (НРА), и сравнивают полученные выводы с заявленными цифрами и документацией оператора. Цель этой деятельности состоит в том, чтобы обнаружить отсутствующие предметы (грубые дефекты). Следующий уровень проверки ставит цель обнаружить, отсутствует ли доля заявленного количества (частичный дефект), и может предусматривать взвешивание предметов и проведение измерений методами НРА, такими, как счет нейтронов или гамма-спектрометрия. Эти методы позволяют измерять количества ядерного материала с точностью порядка нескольких процентов. Для того, чтобы обнаруживать дефекты смещения, которые могут возникать в случае переключения небольших количеств материала в течение длительного отрезка времени, необходимо проводить отбор проб некоторых предметов и применять физические и химические методы анализа, имеющие наивысшую возможную точность, как правило, лучше одного процента. Для того чтобы применять эти

## МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ГАРАНТИЙ

методы разрушающего анализа (РА), МАГАТЭ требуется доступ к лабораториям, на регулярной основе использующим такие точные методы.

Методы сохранения и наблюдения (С/Н), дополняющие методы учета ядерного материала, применяются для поддержания непрерывности информации, полученной посредством проверки МАГАТЭ, обеспечивая уверенность в том, что ядерный материал следует по заранее определенным маршрутам, что не нарушается целостность его защитной оболочки и что этот материал учитывается в надлежащих точках измерения. Они также обеспечивают экономию объема усилий инспекций по гарантиям, например, посредством снижения частоты проверок учета. Используются разнообразные методы С/Н, прежде всего оптическое наблюдение и опечатывание. Эти меры осуществляются в поддержку учета ядерного материала, позволяя контролировать доступ к ядерному материалу и обнаруживать любое незаявленное перемещение материала.

Автономный и дистанционный мониторинг является специальным режимом применения методов НРА или С/Н, или их сочетания, осуществляемым в течение продолжительных периодов времени без доступа инспекторов. При дистанционном мониторинге автоматическое оборудование передает данные за пределы площадки. В случае автономного и дистанционного мониторинга должны выполняться дополнительные критерии, включая высокую надежность и обеспечение достоверности источника данных. В последние годы затраты на передачу данных существенно снизились. Как следствие этого, расширенное внедрение автономных систем мониторинга и систем дистанционного мониторинга становится все более важным элементом гарантий МАГАТЭ в рамках усилий, направленных на сохранение или повышение действенности без увеличения инспекторских ресурсов или общих затрат.

Обеспечение безопасности данных является важной функциональной особенностью автономных систем мониторинга и систем дистанционного мониторинга. Фактически, в тех типах систем для целей гарантий, которые постоянно смонтированы на установках и периодически посещаются инспекторами, передача данных между компонентами различных систем и между системами и центральными учреждениями МАГАТЭ осуществляется через незащищенные линии связи. Эти данные необходимо подвергать проверке, с тем чтобы гарантировать их аутентичность, и может потребоваться их шифрование, чтобы избежать раскрытия специфической информации и/или обеспечивать конфиденциальность для государств-членов.

Отбор проб окружающей среды, позволяющий обнаруживать малейшие следы ядерного материала, был добавлен к мерам проверки МАГАТЭ в начале 1990-х годов в качестве мощного инструмента для обнаружения признаков незаявленной ядерной деятельности. Необнаружение даже малейших следов

ТАБЛИЦА I. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ УСТАНОВОК, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ГАРАНТИЯМИ МАГАТЭ  
(данные на основе Доклада об осуществлении гарантий 2002 года)

Заводы по обогащению	Заводы по изготовлению топлива	Энергетические реакторы и отдельные хранилища	Предприятия по переработке отработавшего топлива
<i>Количество установок, находящихся под гарантиями в 2002 году</i>			
10	41	239 блоков энергетических реакторов 80 отдельных хранилищ	6
<i>Основные используемые методы</i>			
Материалы: UF <sub>6</sub> Гамма-спектрометрия Взвешивание	Материалы: оксиды U и Pu, MOX Гамма-спектрометрия Счет нейтронов Разрушающий анализ Изотопное определение	Материалы: отработавшее топливо Регистрация черенковского свечения Регистрация суммарного гамма- и нейтронного излучения	Материалы: нитраты U и Pu Разрушающий анализ Счет нейтронов
<i>Сводная статистика МАГАТЭ за 2002 год (приблизженные цифры)</i>			
2 430 инспекции на 603 установках и 706 систем НРА, используемых в 1 639 инспекциях на 553 установках			
766 проб РА проанализировано, представлены данные о 1581 результате анализа			
489 видеокамер, используется для оптического наблюдения			
24 572 печати снято и проверено			
232 пробы окружающей среды взяты на 11 установках по обогащению и на 36 других установках, включая установки с горячими камерами			

конкретного ядерного материала может обеспечить уверенность в отсутствии деятельности, в ходе которой этот материал использовался в зоне, где проводился отбор проб окружающей среды.

Сложность и разнообразие установок, содержащих поставленный под гарантии ядерный материал, требуют соответственно разнообразного набора оборудования и методов проверки. В таблице I перечислены основные типы установок, на которых проводятся инспекции, и важнейшие методы проверки, осуществляемые на этих установках.

Развитие оборудования для целей гарантий и методов гарантий продолжается благодаря помощи национальных программ поддержки, которые позволяют МАГАТЭ идти в ногу с эволюцией новой технологии. МАГАТЭ определяет потребности гарантий, координирует программы поддержки и тестирует и оценивает методы и соответствующее разрабатываемое оборудование. Подвергаются оценке все аспекты работы оборудования, включая соблюдение технических требований, надежность и транспортабельность и, что важнее всего, пригодность для использования инспекторами МАГАТЭ на ядерных установках. В МАГАТЭ предусмотрена процедура обеспечения качества для допуска оборудования и программного обеспечения к использованию в обычных инспекциях.

В настоящем буклете рассмотрены оборудование и методы, широко используемые для инспекционных целей или находящиеся на заключительных стадиях разработки. Общая цель данной публикации состоит в том, чтобы дать всеобъемлющий обзор методов и оборудования, лежащих в основе осуществления гарантий МАГАТЭ.

## 2. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ АНАЛИЗ

### 2.1. ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЯ

#### 2.1.1. Гамма-излучение и обнаружение ядерных материалов

Большинство ядерных материалов, представляющих интерес с точки зрения гарантий МАГАТЭ, испускает гамма-излучение, которое может использоваться для НРА этих материалов. Спектр гамма-излучения характеризуется четко определенными энергиями, специфическими для испускающих его изотопов. Таким образом, измерение энергетического спектра гамма-излучения материалов позволяет определить их изотопный состав. В сочетании с измерением интенсивностей, данные об энергии гамма-излучения позволяют получить информацию о количестве присутствующего материала:

- (a) например, обогащенное урановое топливо испускает мощное гамма-излучение с энергией 186 кэВ, связанное с альфа-распадом  $^{238}\text{U}$ , и поэтому путем измерения этого излучения можно контролировать обогащение  $^{235}\text{U}$ ;
- (b) пробы плутония обычно содержат изотопы  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$ , а также продукты распада, которые приводят к чрезвычайно сложному спектру характеристических энергий гамма-излучения. Путем анализа спектров излучения плутония можно определять изотопный состав материала;
- (c) дату выгрузки облученного топлива из реактора можно проверить, измеряя относительные интенсивности гамма-излучения, связанного с продуктами деления и активации. Для этого типа определения особенно важно гамма-излучение  $^{137}\text{Cs}$  с энергией 662 кэВ.

Для детектирования гамма-излучения используют эффект его взаимодействия с детектором, где энергия фотона поглощается целиком или частично. Работа всех систем детектирования гамма-излучения основана на улавливании высвобождающегося электрического заряда, формирующего импульс напряжения с амплитудой, пропорциональной энергии гамма-излучения. В гамма-спектрометре эти импульсы сортируются по амплитуде (энергии) и подсчитываются с помощью соответствующих электронных устройств, таких, как одноканальные или многоканальные анализаторы. При использовании многоканального анализатора гамма-излучение различных энергий может быть отображено на экране в виде графика, показывающего энергетический спектр гамма-излучения и содержащего детальную информацию об измеренном материале.

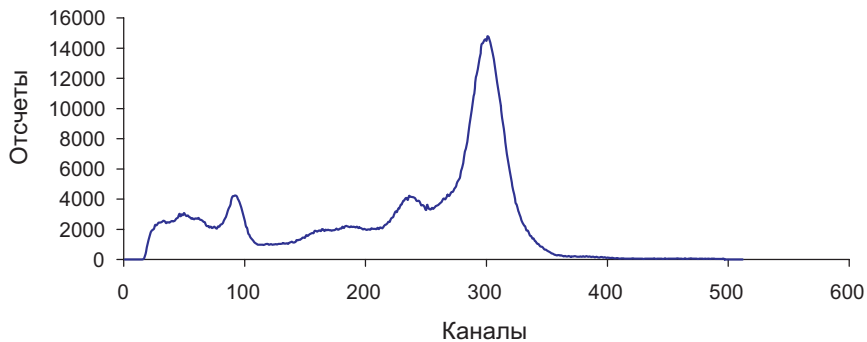
Наиболее часто применяемыми детекторами гамма-излучения являются либо сцинтилляторы (обычно активированные кристаллы йодистого натрия (NaI)), либо твердотельные полупроводники (обычно кристаллы высокочистого германия (HpGe) и цинкового теллурида кадмия (CdZnTe)).

- (1) NaI детекторы могут быть выполнены крупногабаритными и обычно имеют более высокую эффективность детектирования гамма-излучения, чем Ge детекторы. Их применения для целей гарантий включают, например, проверку обогащения  $^{235}\text{U}$  в свежем топливе, а также присутствия отработавшего топлива посредством детектирования гамма-излучения продуктов деления. Однако их способность различать гамма-излучение различных энергий относительно слаба, и из трех типов детекторов они имеют наихудшую разрешающую способность по энергии.
- (2) Германиевые детекторы имеют намного более высокую разрешающую способность по энергии, чем NaI детекторы, и лучше подходят для решения задач определения сложных спектров гамма-излучения и представления информации об изотопном составе материалов. Размеры Ge детекторов, используемых МАГАТЭ, различны: от маленьких, плоского типа, до больших ( $80\text{--}90\text{ см}^3$ ) коаксиальных детекторов. Недостаток этих детекторов состоит в том, что они работают при сверхнизкой температуре, которая обычно достигается путем охлаждения жидким азотом.
- (3) Стандартные CdZnTe детекторы (и CdTe детекторы) не нуждаются в охлаждении, и из указанных трех типов детекторов они имеют наивысшую внутренне присущую эффективность детектирования. Достигнутый в последнее время прогресс в области методов изготовления позволил существенно улучшить разрешение CdZnTe детекторов. До 1997 года стандартные возможные объемы были относительно небольшими ( $20$  и  $60\text{ см}^3$ ), но теперь имеются относительно большие CdZnTe детекторы объемом  $500\text{ см}^3$  и  $1500\text{ см}^3$ . Благодаря портативности и небольшим размерам CdZnTe и CdTe детекторы пригодны для использования в самых разнообразных применениях, включая использование в ограниченных пространствах, такое, как проверка на месте сборок со свежим топливом, конструкция которых позволяет вводить в внутрь сборки лишь небольшой детекторный зонд, и сборок с отработавшим топливом, хранящихся под водой в плотно упакованных штабелях.

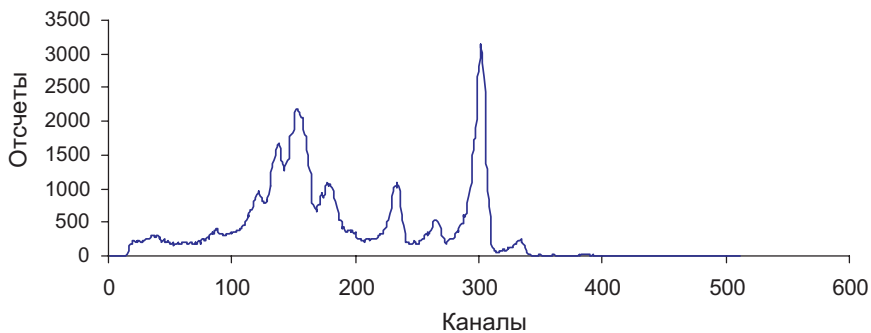
Рис. 1 иллюстрирует потенциальные возможности различных типов детекторов низкого, среднего и высокого разрешения. Для целей гарантий используются несколько типов гамма-спектрометров (многоканальных



Спектр  $U^{235}$ , полученный с помощью NAI детектора



Спектр  $U^{235}$ , полученный с помощью CDZT детектора



Спектр  $U^{235}$ , полученный с помощью GDET детектора

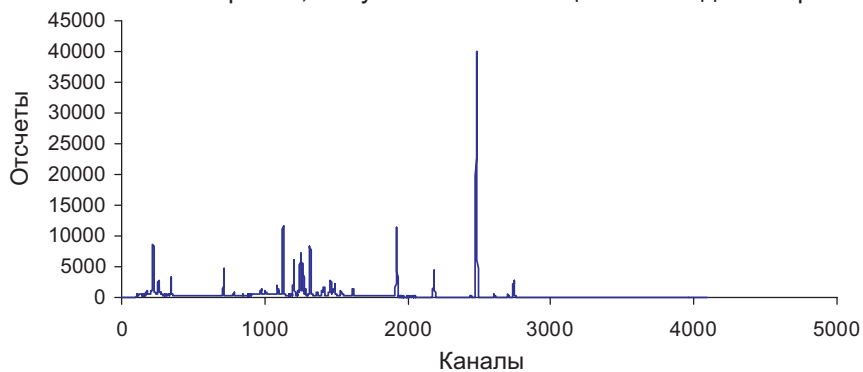


Рис. 1. Сравнение спектров гамма-излучения, полученных с помощью различных типов детекторов (низкого, среднего и высокого разрешения).

ТАБЛИЦА II. ГАММА-СПЕКТРОМЕТРЫ

Код	Наименование оборудования	Основные применения
НМ-5	Ручной анализатор	Качественное определение присутствия U, Pu и других изотопов
IMCN, IMCC, IMCG	Многоканальный анализатор I-2000 (IMCA), используемый с NaI или CdZnTe или германиевым детектором	Проверка обогащения U, отработавшего топлива и изотопного состава Pu
MMCN, MMCC, MMCG	Миниатюрный многоканальный анализатор (MMCA), используемый с NaI или CdZnTe или германиевым детектором	Проверка обогащения U и отработавшего топлива

анализаторов и детекторов), различающихся главным образом по разрешению и аналитическим возможностям. Краткие сведения о них представлены в таблице II и излагаются ниже.

### 2.1.2. Ручные многоцелевые гамма-спектрометрические приборы

**НМ-5 (fieldSPEC).** Это устройство является преемником ручного анализатора (НМ-4). Благодаря успехам технического прогресса, НМ-5 (рис . 2) намного превосходит предыдущую модель по конструктивным и рабочим характеристикам. НМ-5 – это современный ручной цифровой гамма-спектрометр, обеспечивающий выполнение различных видов измерений, таких, как измерение мощности дозы, поиск источников, идентификация изотопов, определение активной длины топливных стержней и сборок и проведение атрибутивных тестов Pu/U.

Базовая модульная конструкция НМ-5 включает NaI детектор. Для специальных применений NaI детектор может быть заменен более стабильным CdZnTe детектором, обладающим более высоким разрешением. В энергонезависимой памяти НМ-5 могут храниться и позднее могут быть переданы на компьютер для дальнейшей обработки или построения графиков до 50 гамма-спектров емкостью 1024 канала каждый.

Благодаря такой многосторонности НМ-5 используется в традиционных инспекциях по гарантиям и в исследованиях, проводимых в соответствии с условиями Дополнительного протокола. НМ-5 может также применяться



*Рис. 2. Анализатор HM-5 fieldSPEC.*

правоохранительными службами с целью обнаружения и идентификации ядерных и радиоактивных материалов, контрабандно перевозимых через границы.

## 2.1.3. Многоканальные анализаторы

**IMCA (InSpector2000).** Новый многоканальный анализатор InSpector 2000 (I-2000) (IMCA), в котором применяется цифровая технология обработки сигналов (ЦОС), может работать с детекторами различных типов, используемыми в настоящее время для инспекционных целей, а именно,  $\text{HrGe}$ ,  $\text{CdZnTe}$  и  $\text{NaI}$ , позволяя проводить спектрометрию высокого, среднего и низкого разрешения. Устройство обеспечивает непревзойденные характеристики по скорости счета и разрешению в сочетании с устойчивостью к воздействиям окружающей среды и является весьма малогабаритным и компактным. Анализатор IMCA (рис. 3) разработан с учетом продолжающейся эволюции на рынке многоканальных анализаторов (МКА), в том числе самых последних достижений в этой области. Его высокие рабочие характеристики достигнуты благодаря применению технологии ЦОС, в соответствии с которой сигналы предусилителя оцифровываются в самом начале тракта обработки сигналов. Использование аналоговых схем в приборе сокращено, что позволило сделать его компактным, повысить стабильность, точность и воспроизводимость данных и улучшило в целом характеристики обнаружения сигнала.

Поскольку I-2000 является коммерчески доступным прибором, который используется во всем мире, МАГАТЭ может использовать для инспекционных целей оборудование операторов, основанное на применении I-2000.



Рис. 3. IMCA: показан на фотографии с NaI детектором и портативным компьютером.



Рис. 4. ММСС: миниатюрный многоканальный анализатор (ММСА) с CdZnTe детектором

Использование такого оборудования операторов зависит от возможности МАГАТЭ проверять достоверность данных и от применимости стандартного программного обеспечения. Переход к этому новому оборудованию позволил МАГАТЭ постепенно вывести из эксплуатации устаревшее оборудование, такое, как старые МКА InSpector и РМСА, и продолжить тенденцию к стандартизации типов оборудования, используемых для инспекционных целей. Начиная с 2001 года, I-2000 официально разрешен для применения в инспекциях.

**ММСА.** Миниатюрный многоканальный анализатор представляет собой развитую миниатюризированную спектрометрическую систему, способную работать со всеми используемыми МАГАТЭ детекторами, включая NaI (модификация с названием MMCN для этого применения), CdZnTe (ММСС) и H<sub>p</sub>Ge (ММCG). ММСА (рис. 4) значительно меньше и легче предыдущего использовавшегося в МАГАТЭ портативного устройства, РМСА, а продолжительность его работы с батарейным питанием в три раза больше (по



Рис. 5. IMCG: Используемый инспекторами многоканальный анализатор с  $\text{HrGe}$  детектором.

меньшей мере 12 часов для  $\text{CdZnTe}$  и  $\text{NaI}$  детекторов). ММСА совпадает по размерам с портативным компьютером и весит вместе с литиевой ионной батареей 680 г. В сочетании с портативным компьютером и  $\text{CdZnTe}$  детектором он превращается в мощную и универсальную систему, занимающую половину портфеля, что делает его весьма удобным для многих видов инспекционной деятельности.

#### 2.1.4. Используемые МАГАТЭ методы гамма-спектрометрии высокого разрешения

В сочетании с  $\text{Ge}$  детектором, ММСА или IMCA становится гамма-спектрометром высокого разрешения (ММCG или IMCG, рис. 5). Этот тип спектрометра часто используется для определения обогащения по урану-235 гексафторида урана ( $\text{UF}_6$ ), находящегося в транспортных контейнерах. Выбрав из меню вариантов во встроенном прикладном программном обеспечении процедуру измерения  $\text{UF}_6$ , инспектор посредством серии заранее определенных шагов проводит измерение и рассчитывает обогащение. Необходимо также определить толщину стенки контейнера, с тем чтобы можно было внести поправки на ослабление гамма-излучения в стенке контейнера. Толщину измеряют ультразвуковым толщиномером.

Инспектора могут также использовать программное обеспечение MGAU, которое упрощает измерение и анализ спектров урана с высоким разрешением. MGAU позволяет получать результаты с точностью до 1-2% при условии, что толщина стенки стального контейнера менее 10 мм и что активность ториевых дочерних продуктов находится в равновесии с активностью родительских изотопов  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ . Процедура анализа MGAU исключает необходимость измерения толщины стенки контейнера или проведения калибровки измерительной системы по обогащению.

Еще одним важным применением гамма-спектрометрии высокого разрешения является определение изотопного состава плутония. Плутоний имеет сложный спектр испускаемого рентгеновского и гамма-излучения, для интерпретации которого используют специализированное программное обеспечение, такое, как MGA и FRAM. Эти коды при использовании энергетических спектров высокого разрешения, получаемых с помощью HpGe детекторов, позволяют разделить и оценить вклады различных изотопов плутония. Изотопное определение плутония используется для проверки характера материала и в качестве входного параметра для интерпретации нейтронных измерений. Недавно разработанное программное обеспечение TARGA обеспечивает удобные для пользователя условия работы с кодом MGA при определении изотопного состава проб плутония. Система I-2000 в сочетании с программным обеспечением TARGA заменяет счетную систему среднего быстродействия, использовавшуюся ранее с программным обеспечением PUIS.

## 2.2. СЧЕТ НЕЙТРОНОВ

МАГАТЭ использует разнообразное оборудование для счета нейтронов (таблица III). В настоящем разделе приводится информация об источниках нейтронов, важности счета нейтронных совпадений для определения массы ядерного топлива и несколько примеров пассивных и активных детекторных систем.

### 2.2.1. Эмиссия нейтронов необлученным ядерным топливом и их детектирование

Нейтроны испускаются необлученным ядерным топливом в основном тремя способами:

- (1) при спонтанном делении урана и плутония, особенно с участием четных изотопов плутония;
- (2) при ядерном делении делящихся изотопов урана и плутония, обычно индуцируемого низкоэнергетическим источником нейтронов;
- (3) в результате индуцированных альфа-частицами реакций ( $\alpha$ , n) с участием таких легких элементов, как кислород и фтор.

В первых двух категориях нейтроны деления испускаются группами по два или более на каждый акт деления ядра. Характерный признак испускания множественных нейтронов детектируется как нейтронное совпадение. Почти

ТАБЛИЦА III. СИСТЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕЙТРОННЫХ  
СОВПАДЕНИЙ ДЛЯ НЕОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Код	Наименование оборудования	Основные применения
<i>Пассивные счетчики нейтронных совпадений</i>		
BCNC	Счетчик контейнеров с дистанцирующими решетками	Проверка массы Pu в специфических конфигурациях хранения
CNCM	Компактный счетчик нейтронных совпадений	Проверка (качественная) МОХ топливных сборок в перевозочной таре
DRNC	Счетчик с выдвижной шахтой	Проверка массы Pu в контейнерах на конкретных установках
FAAS	Система анализа топливных сборок/капсул	Проверка массы Pu в МОХ топливных сборках
FPAS	Система анализа топливных стержней/поддонов	Проверка массы Pu в МОХ топливных стержнях в лотках для хранения на конкретных установках
GBAS	Система анализа для перчаточных боксов	Полуколичественное определение Pu остаточного материала в перчаточных боксах
HBAS	Система анализа остаточного материала в смесителях	Полуколичественное определение Pu остаточного материала в смесителях
HLNC	Высокопоточный счетчик нейтронных совпадений	Проверка Pu в пробах весом 20-2000 г в контейнерах (таблетки, порошки, скрап)
INVS	Счетчик проб инвентарного количества	Проверка Pu в пробах весом 0,1-300 г. Модифицированный вариант может крепиться к перчаточным боксам
LNMC	Большой счетчик множественности нейтронов	Проверка Pu в загрязненных/имеющих примеси предметах
MAGB	Счетчик для перчаточных боксов	Проверка массы Pu в перчаточных боксах на установках
PCAS	Счетчик для контейнеров	Проверка массы Pu в контейнерах с МОХ
PNCL	Нейтронный воротниковый счетчик совпадений для плутония	Проверка массы Pu в сборках с МОХ-топливом
-----		

ТАБЛИЦА III. СИСТЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕЙТРОННЫХ СОВПАДЕНИЙ ДЛЯ НЕОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА (продолж.)

Код	Наименование оборудования	Основные применения
PSMC	Счетчик множественности для плутониевых отходов	Проверка Pu в контейнерах, содержащих пробы отходов весом 1-300 г
PWCC	Пассивный колодезный счетчик совпадений	Проверка массы Pu в тепловыделяющих сборках MOX-топлива CANDU
UFBC	Универсальный счетчик для быстрых реакторов-размножителей	Проверка Pu (до 16 кг) в топливе БРР
UWCC	Подводный счетчик совпадений	Подводная проверка Pu в свежих сборках MOX-топлива
<i>Активные нейтронные счетчики совпадений</i>		
AWCC	Активный колодезный счетчик совпадений	Проверка $^{235}\text{U}$ в пробах высокообогащенного U
UNCL	Воротниковый счетчик нейтронных совпадений для урана	Проверка $^{235}\text{U}$ в тепловыделяющих сборках с низкообогащенным U; имеются разнообразные конфигурации воротников
WCAS	Система для анализа ящиков с отходами	Проверка материалов отходов
WDAS	Система для анализа бочек с отходами	Активный анализ бочек с низкоактивными отходами с целью определения массы Pu

все изотопы U, Pu и других трансурановых элементов испускают альфа-частицы. Они взаимодействуют с легкими элементами, присутствующими в составе соединений (например, оксидах и фторидах) или в виде примесей (например, B, Be и Li), создавая нежелательный нейтронный фон. При счете нейтронных совпадений этот фон отфильтровывают при обработке нейтронных импульсов, пропуская скоррелированные во времени (совпадающие) сигналы характерных признаков множественных нейтронов, испускаемых при ядерном делении, и блокируя нейтронные импульсы реакции ( $\alpha$ , n), которые испускаются поодиночке и поэтому не скоррелированы.



Пассивные системы детектирования совпадений определяют массу Pu на основе спонтанного деления прежде всего четных изотопов ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  и  $^{242}\text{Pu}$ , причем доминирующий вклад вносит  $^{240}\text{Pu}$ ). Относительное содержание основного делящегося изотопа,  $^{239}\text{Pu}$ , в топливе, как правило, составляет 60% и более, и все же его вклад в сигнал нейтронов самопроизвольного деления оказывается незначительным. Относительное содержание изотопа должно быть известно или проверено — обычно посредством измерения гамма-излучения с высоким разрешением. Используя данные об относительном содержании изотопов, величину массы  $^{240}\text{Pu}_{\text{эф}}$  определенную путем счета нейтронных совпадений, можно преобразовать в суммарную массу Pu для образца. Для незагрязненных проб с хорошими характеристиками точность измерения может быть порядка 1% или выше.

Самопроизвольное деление делящегося изотопа  $^{235}\text{U}$  не происходит настолько активно, чтобы можно было практически применять пассивное детектирование. В этом случае используется активная система, включающая источники нейтронов AmLi, которая 'опрашивает' содержание  $^{235}\text{U}$  посредством индуцированного нейтронами ядерного деления. При малых энергиях падающих нейтронов, индуцированное ядерное деление в пробах  $^{238}\text{U}$  вносит незначительный вклад в измеряемую скорость счета нейтронных совпадений даже несмотря на то, что обогащение по  $^{235}\text{U}$  может составлять всего лишь несколько процентов (например, в случае топлива с низким обогащением).

Работа нейтронных детекторов основана на реакциях захвата нейтронов. В ходе этих реакций образуются высокоэнергетические частицы, ионизирующие газ и создающие зарядовые импульсы, характеризующие нейтронное взаимодействие. Выбор детектора (т.е. материала захвата) определяется требованиями к чувствительности детектирования нейтронов и к нечувствительности к другому излучению, например, к гамма-излучению. Почти все детекторы наиболее чувствительны к низкоэнергетическим нейтронам. Поэтому во многих нейтронных измерительных системах детекторы окружены замедлителем, таким, как полиэтилен, снижающим энергию нейтронов до уровней, присущих тепловым нейтронам.

## 2.2.2. Счет суммарного нейтронного потока

Под счетом суммарного нейтронного потока подразумевают детектирование всех испускаемых нейтронов. В этом случае невозможно определить характеристики источника нейтронов, поскольку неприменимы требования, связанные с совпадениями. Наличие значительных нейтронных потоков зачастую свидетельствует о присутствии делящегося ядерного материала. Все системы детектирования нейтронных совпадений (обсужденные ниже) определяют суммарные скорости счета нейтронов, а также скорости счета совпадений.

В других системах детектирования, таких, как вилочный детектор и автономный монитор потока топлива, в качестве основного характерного признака используется счет суммарного потока нейтронов. Эти системы в основном измеряют материалы отработавшего топлива, как описано в другом разделе настоящего буклета.

### 2.2.3. Счет нейтронных совпадений

Счет нейтронных совпадений стал стабильным, надежным и точным методом определения содержания  $^{235}\text{U}$  и  $\text{Pu}$  в ядерных материалах. Современные, хорошо спроектированные системы счета нейтронных совпадений обеспечивают надежную обработку импульсов в весьма широком диапазоне скоростей счета (т.е. с различием более шести порядков). Стабильность работы достигается посредством продуманного выбора и реализации схемотехники усилителей, обеспечивающей сведение шумовых помех к минимуму. Платы с электроникой, находящиеся в детекторной головке, обеспечивают усиление и формирование импульсов, дискриминацию на низком уровне с целью удаления импульсов от гамма-излучения или шумов и подачу весьма коротких (длительностью 50 нс) логических импульсов на внешний импульсный процессор (электронный контроллер).

Надежный счет совпадений обеспечивается также сложными схемами обработки импульсных сигналов (электронными схемами на сдвиговых регистрах) во внешнем электронном контроллере. Импульсы, поступающие один за другим в пределах заданного временного интервала (обычно составляющего 64 мкс), могут рассматриваться в качестве скоррелированных (т.е. 'совпадающих') нейтронных импульсов. Корреляционный интервал связан с замедлением нейтронов в замедлителе детекторной головки. Электронные схемы на сдвиговых регистрах отслеживают совпадения импульсов, интервал между которыми составляет около 1000 мкс (называемые случайными совпадениями), и совпадения в течение первых 64 мкс (называемые реальными совпадениями плюс случайными совпадениями). Аналитическое программное обеспечение, работающее в комплексе с системой счетчика совпадений, вычитает данные случайных совпадений из суммарных данных реальных+случайных совпадений, определяя реальные совпадения. При анализе информации также автоматически вводятся различные небольшие поправки.

Пассивные детекторные системы имеют две основных геометрических конфигурации: колодезные детекторы, полностью охватывающие пробу, или воротниковые детекторы, кольцеобразно охватывающие пробу (например, топливную сборку). Предпочтительной считается колодезная геометрия детекторов, поскольку такие детекторы способны детектировать все нейтроны,



*Рис. 6. HLNC: Высокопоточный нейтронный счетчик совпадений.*

испускаемые пробой. Воротниковая конструкция детекторов считается альтернативной и подходит для случаев, когда размеры пробы слишком велики для помещения ее в колодезный детектор. В то время как калиброванные пассивные колодезные детекторы позволяют измерять суммарную массу  $P_u$  в образце, воротниковые детекторы измеряют массу  $P_u$  на единицу длины топливной сборки. Для определения суммарной массы  $P_u$  в сборке линейную плотность следует умножить на ее эффективную длину.

В настоящее время для целей ядерных гарантий используется около двадцати вариантов пассивных детекторных систем, конструкции которых оптимизированы для специфических размеров и форм проб или диапазонов массы  $P_u$ . Пассивные детекторные системы и их основные применения перечислены в таблице III. Две типичные системы описаны ниже.

**HLNC.** Высокопоточный счетчик нейтронных совпадений показан на рис. 6. Эта детекторная система является типичной системой счета совпадений на основе колодезных детекторов, используемой МАГАТЭ для измерения необлученных  $P_u$  материалов. В состав HLNC входит головка, в которой находятся детекторы нейтронов ( $^3\text{He}$  газовые пропорциональные счетчики), подключенные к специальным усилителям. Электронный контроллер JSR-12 обеспечивает электропитание усилителей и  $^3\text{He}$  счетчиков и обработку последовательностей импульсов, регистрируя акты совпадения. Связанный с JSR-12 портативный компьютер автоматизирует сбор данных и анализирует и



Рис. 7. INVS: Счетчик проб инвентарного количества.

архивирует данные. В комплект оборудования входит также принтер, обеспечивающий компактную распечатку результатов. Эта детектирующая система общим весом 60 кг имеет большую полость для размещения проб; эффективность детектирования нейтронов составляет 18%. После удаления верхней крышки контейнер, содержащий  $Pu$  (в виде таблеток, порошка или скрапа), может быть размещен в центре большой полости. Компьютер присваивает пробе идентификационный номер, задает соответствующую калибровочную кривую и время рабочего цикла (обычно 100 с). После инициирования измерения, компьютерный код счета нейтронных совпадений МАГАТЭ (INCC) автоматически проводит серию измерений (обычно три), каждое из которых должно соответствовать всем заданным критериям контроля качества для получения приемлемых результатов. По завершении измерений рассчитывается масса  $Pu$ , которая сравнивается с заявленным значением, позволяя осуществить количественную проверку с точностью, составляющей для типичных инвентарных количеств высокочистого  $Pu$  1%.

**INVS.** Для малых проб (инкапсулированные  $Pu$  таблетки, порошки и растворы в ёмкостях) с суммарным содержанием  $Pu$ , гораздо более низким, чем то, которое обычно измеряется с помощью HLNC, в качестве детекторной системы выбирают счетчик проб инвентарного количества (INVS). INVS имеет почти в два раза более высокую эффективность детектирования нейтронов, чем HLNC. На рис. 7 показан один из четырех вариантов этой портативной детекторной системы. В другом варианте INVS имеет инвертированную геометрию и постоянно прикреплена к полу перчаточного бокса, с тем чтобы можно было проводить анализ проб на содержание  $Pu$  без неудобств и неэффективности, связанных с удалением проб из перчаточного бокса. Хотя полость INVS обычно имеет диаметр около 6 см и глубину около 16 см, она хорошо подходит для проб, анализируемых на таких установках, как заводы по изготовлению топлива или лаборатории на площадке. INVS обеспечивает



Рис. 8. AWCC: Активный колодезный счетчик совпадений.

высоконадежную проверку содержания Pu с точностью индивидуальных измерений до 1%. Измерительные процедуры автоматизированы благодаря использованию программы INCC и по существу такие же, как в HLNC.

В активных детекторных системах для «опроса» (индуцирования ядерного деления)  $^{235}\text{U}$  в пробе используются источники нейтронов (обычно AmLi). Здесь также предпочтительна колодезная геометрия, но в случаях, когда пробой является топливная сборка, требуется воротниковая геометрия. Активные нейтронные детекторы, используемые для целей гарантий МАГАТЭ, перечислены в таблице III. Ниже представлены детальные сведения об активном колодезном детекторе и активном воротниковом детекторе. Комплектная детекторная система включает детекторную головку, детектирующую нейтроны и содержащую нейтронный источник для «опроса»; электронный контроллер, обеспечивающий электропитание детектора и определяющий скорости счета нейтронных совпадений; портативный компьютер для управления измерениями и анализа данных с целью определения содержания  $^{235}\text{U}$ ; и принтер для распечатки результатов.

**AWCC.** Активный колодезный счетчик совпадений имеет большую (150-килограммовую) детекторную головку, стационарно смонтированную на колесной тележке, позволяющей ее перемещать (рис. 8). В состав AWCC входят 42  $^3\text{He}$  счетчика, размещенных в толстых полиэтиленовых цилиндрах, что позволяет достигнуть относительно высокой (почти 30%-ной) эффективности детектирования нейтронов. Содержание  $^{235}\text{U}$  в пробе определяют путем активного анализа с использованием двух источников нейтронов AmLi, размещенных в верхней и нижней крышках, с тем чтобы обеспечить равномерное распределение нейтронов опроса по объему пробы. Удаляя

вставки и отражатели, размер полости можно изменять приблизительно до 20 см в диаметре и 23 см в высоту, что позволяет работать с такими пробами, как металлические диски, порошкообразные оксиды металлов в контейнерах и шаровые микротвэлы в каруселях. Для автоматизации измерительной процедуры и анализа данных используется программа INCC, обеспечивающая высокоточный анализ содержания  $^{235}\text{U}$ .

**UNCL.** Воротниковый счетчик нейтронных совпадений для урана, используемый при определении линейной массовой плотности урана в сборках свежего топлива, смонтирован на тележке. При его использовании на установках по изготовлению топлива или реакторных установках стенку, содержащую источник нейтронов, удаляют или открывают, и воротниковый счетчик выдвигается в положение, в котором он окружает топливную сборку. После закрывания дверцы с источником  $\text{AmLi}$  начинается измерительный цикл. По выполнении заданного числа циклов измерений, обеспечивающего выполнение критериев приемлемости для обеспечения качества в программе INCC, определяется масса  $^{235}\text{U}$  на единицу длины. Данные о линейной плотности умножаются на результаты измерения эффективной длины, что позволяет определить содержание  $^{235}\text{U}$  во всей топливной сборке.

### 2.3. ИЗМЕРЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

#### 2.3.1. Эмиссия и детектирование нейтронов

Основным источником нейтронов, испускаемых отработавшим топливом, являются процессы спонтанного деления изотопов  $^{242}\text{Cm}$  и  $^{244}\text{Cm}$ . Эти изотопы образуются в результате ряда реакций захвата нейтронов, происходящих при облучении топливной сборки мощными потоками нейтронов в ядерном реакторе. Продукты деления в облученном топливе создают чрезвычайно высокий радиационный фон, в условиях которого необходимо детектировать нейтроны. Этот высокий радиационный фон предопределяет тип методов, которые могут быть использованы для проверки отработавшего топлива. Один подход заключается в выборе детектора с низкой чувствительностью к гамма-излучению. Другой предусматривает использование экрана, который задерживает гамма-излучение, но пропускает нейтроны на детектор нейтронов. К методам проверки отработавшего топлива относятся не только детектирование нейтронов, но также и регистрация гамма-излучения и ультрафиолетового светового излучения (черенковского излучения).

В таблице IV перечислены используемые МАГАТЭ измерительные системы для отработавшего топлива. Вилочный детектор (FDET) включает в себя детекторы как нейтронного, так и гамма-излучения для проверки на

ТАБЛИЦА IV. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Код	Наименование оборудования	Описание и применения
FDET	Измерительная система с вилочным детектором для облученного топлива	Детекторная система, анализирующая топливные сборки LWR с помощью пар детекторов нейтронного и гамма-излучения. Данные о суммарной интенсивности нейтронного и гамма-излучения и об отношении интенсивностей позволяют получить конкретную информацию о топливной сборке.
SFAT	Система для проведения атрибутивных тестов отработавшего топлива	Устройство для обнаружения грубых дефектов, используемое для проверки присутствия продуктов деления или продуктов активации в верхней части облученной топливной сборки.
IRAT	Система для проведения атрибутивных тестов облученного топлива	Устройство для обнаружения крупных дефектов, используемое для проверки присутствия продуктов деления в облученной топливной сборке.
ICVD	Устройство для наблюдения черенковского излучения	Переносное устройство для усиления света, оптимизированное для наблюдения черенковского излучения (в диапазоне ближнего ультрафиолета) в бассейне хранения отработавшего топлива. Система может использоваться в освещенных зонах. Используется главным образом для идентификации облученных топливныхборок LWR.
DCVD	Цифровое устройство для наблюдения черенковского излучения	Высококчувствительное цифровое устройство для наблюдения черенковского излучения топлива с большими периодами охлаждения и малой глубиной выгорания.

ТАБЛИЦА IV. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолж.)

Код	Наименование оборудования	Описание и применения
CBVB	Устройство для проверки топливных сборок CANDU в корзинах	Неавтономные системы радиационного мониторинга, сканирующие корзины или стеллажи для хранения топливных сборок CANDU и обеспечивающие регистрацию интенсивности гамма-излучения как функции положения детектора.
CBVS	Устройство для проверки топливных сборок CANDU в стеллажах	
GBUV	Устройство для проверки глубины выгорания с детектором гамма-излучения	Предназначенная для конкретной установки система, используемая для проведения измерений гамма-излучения отработавших топливных сборок с высоким разрешением. Коллиматор перед Ge детектором встраивается в установку.

грубые дефекты таких характеристик топливных сборок, как история облучения, первоначальное содержание топлива и число циклов облучения в реакторе. Имеются детекторные системы для измерения энергетических спектров гамма-излучения облученного топлива (SFAT и IRAT) и интенсивности гамма-излучения, как функции позиции хранения тепловыделяющей сборки (CBVB и CBVS). Устройства для наблюдения черенковского излучения (ICVD и, впоследствии, цифровое устройство DCVD) анализируют ультрафиолетовое излучение, возникающее в воде вокруг отработавшего топлива. Различные измерительные системы описаны более подробно ниже.

### 2.3.2. Регистрация суммарного нейтронного и гамма-излучения

**FDET.** Измерительная система с вилочным детектором для облученного топлива, показанная на рис. 9, включает детекторную головку, удлинительную трубу длиной несколько метров (не показанную на рисунке), электронный блок





*Рис. 9. FDET: Измерительная система с вилочным детектором для облученного топлива (детекторная головка, электронный блок GRAND и портативный компьютер).*

управления детекторами нейтронного и гамма-излучения (в настоящее время модели GRAND3, в конечном счете подлежащий замене на модель MiniGRAND) и портативный компьютер. В детекторной головке находятся нечувствительные к гамма-излучению детекторы нейтронов (четыре газонаполненных пропорциональных счетчика с камерами деления) и детекторы гамма-излучения, способные измерять гамма-излучение весьма высокой интенсивности (две газонаполненные ионизационные камеры). Измеренные детекторами признаки нейтронного и гамма-излучения используются для проверки высокоактивных сборок с отработавшим топливом, хранящихся под водой в бассейнах для отработавшего топлива. Система FDET расположена на высоте приблизительно 1 м над верхними частями хранящихся сборок. Измеряемую облученную топливную сборку поднимают таким образом, чтобы детектор охватывал ту часть сборки, где находится топливо, и проводят сбор данных о суммарном нейтронном и гамма-излучении.

Отношение интенсивностей нейтронного и гамма-излучения в сочетании с другой дополнительной информацией используется для определения характеристик конкретного типа топливной сборки и позволяет получить информацию относительно ее облучения нейтронами в реакторе, первоначального содержания в ней делящегося топлива и ее истории облучения (например, о числе циклов, в течение которых сборка находилась в реакторе).

## 2.3.3. Спектрально-энергетический анализ гамма-излучения

**SFAT.** Система для проведения атрибутивных тестов отработавшего топлива (рис. 10), состоящая из электронного блока многоканального анализатора и детектора NaI или CdZnTe, используется для проведения измерений на верхней части топливной сборки, когда она находится в стеллаже для хранения. Система SFAT обеспечивает качественную проверку присутствия



Рис. 10. SFAT: Система для проведения атрибутивных тестов отработавшего топлива.

отработавшего топлива посредством регистрации характеристического гамма-излучения продуктов деления — либо  $^{137}\text{Cs}$  (662 кэВ) для топлива, подвергшегося охлаждению в течение более чем четырех лет, либо короткоживущих продуктов деления, таких, как  $^{144}\text{Pr}$  (2182 кэВ) для топлива с короткими временами охлаждения. Возможна также идентификация продуктов активации, таких, как  $^{60}\text{Co}$ . Система SFAT особенно эффективна в тех ситуациях, когда проверка не может быть проведена посредством наблюдения черенковского излучения, например, когда черенковское излучение слабо, поскольку отработавшее топливо имеет малое выгорание и/или длительное время охлаждения, или когда вода в бассейне хранения недостаточно прозрачна. SFAT и его свинцовый экран размещаются в водонепроницаемом контейнере из нержавеющей стали, погруженном в бассейн хранения и расположенном над исследуемым предметом. Ниже корпуса детектора прикреплена водонепроницаемая коллиматорная труба, направляющая на детектор излучение только от анализируемой сборки, но не от смежных с ней сборок. Многоканальный анализатор осуществляет сбор, регистрацию и анализ данных, а также обеспечивает электропитание детектора. Интенсивность коллимированного гамма-излучения конкретной топливной сборки сравнивается со спектром излучения из зазора, разделяющего данную и соседнюю сборки, с тем чтобы подтвердить присутствие в измеряемой сборке продуктов деления или активации.

**IRAT.** Система для проведения атрибутивных тестов облученного топлива (рис. 11) включает небольшой и легкий CdZnTe детектор, который может подвешиваться с мостового крана бассейна для отработавшего топлива и используется для измерения спектра продуктов деления в сборке с отработавшим топливом, частично выдвинутой из стеллажа для хранения. Детектор заключен в цилиндр из нержавеющей стали, снабженный экраном и коллиматором. Многоканальный анализатор осуществляет сбор и анализ



*Рис. 11. IRAT: Система для проведения атрибутивных тестов облученного топлива.*

спектральной информации для сборки с отработавшим топливом. Для подтверждения характеристик облученного топлива используется присутствие таких изотопов продуктов деления, как  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Pr}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  и другие.

## 2.3.4. Сканирование гамма-излучения по интенсивности

**CBVB, CBVS.** В состав устройства для проверки топливных сборок CANDU, подвешиваемого на автоматической лебедке, скорость которой может устанавливаться для сканирования либо корзин, либо штабелей для хранения, входит CdTe детектор с мощным коллиматором и защитой оболочкой. Устройство для проверки подключается к усилителю и портативному компьютеру. Компьютер может использоваться либо с внешним анализатором в режимах высоких скоростей счета, либо с внутренней картой многоканального анализатора в режимах умеренных скоростей счета. В спектре гамма-излучения отработавшего топлива со временем охлаждения более двух лет доминирует линия  $^{137}\text{Cs}$  с энергией 662 кэВ, используемая в качестве признака для проверки отработавшего топлива. В случае более коротких времен охлаждения, для цели проверки присутствия отработавшего топлива используется линия с энергией 757 кэВ в спектре  $^{95}\text{Nb}/^{95}\text{Zr}$ . Конкретная используемая линия спектра гамма-излучения выбирается в программе SCANDU. Детекторную головку перемещают с заданной скоростью в вертикальном направлении перед хранящимся в штабеле топливом, и в компьютере запускают последовательность сканирования. Производится измерение интенсивности гамма-излучения как функции положения по вертикали. Проводится подсчет высокоинтенсивных пиков, указывающих на присутствие облученных тепловыделяющих сборок, и эти данные сравниваются с заявленной информацией о числе хранящихся тепловыделяющих сборок.



*Рис. 12. ICVD: Устройство для наблюдения черенковского излучения.*

### 2.3.5. Регистрация черенковского излучения

**ICVD, DCVD.** Устройство для наблюдения черенковского излучения (ICVD) и цифровое устройство для наблюдения черенковского излучения (DCVD) предназначены для наблюдения с помощью усилителя яркости изображения ультрафиолетового излучения в воде, окружающей сборки с отработавшим топливом. Переносное ICVD показано на рис. 12. Устройство для наблюдения может эксплуатироваться при включенном освещении в зоне бассейна для отработавшего топлива на установке. ICVD оптимизировано для регистрации ультрафиолетового излучения благодаря использованию фильтров, задерживающих большую часть видимого света, и наличию усилителя яркости изображения, чувствительного главным образом к ультрафиолетовым частотам оптического диапазона. Черенковское излучение генерируется вследствие мощного гамма-излучения отработавшего топлива, которое при поглощении в воде приводит к образованию высокоэнергетических электронов отдачи. Во многих случаях скорость этих электронов превышает скорость света в воде и при торможении они теряют энергию, испуская излучение (черенковское излучение). Отработавшее топливо также испускает бета-частицы (которые также являются электронами с определенной энергией), вносящие свой вклад в черенковское излучение. Погруженные в воду сборки с отработавшим топливом окружены ореолами черенковского свечения с наибольшей яркостью в областях, непосредственно прилегающих к топливным стержням. Изменение интенсивности свечения явно проявляется при наблюдении с точки, находящейся непосредственно над топливными стержнями. При тщательном выборе положения и правильной оценке наблюдаемого объекта облученную топливную сборку можно отличить от не содержащего топлива предмета, который может быть неотличим от нее для невооруженного глаза. Как правило, ряд топливных сборок рассматривают вертикально с мостового крана, в то

время как оператор установки медленно перемещает ферму крана вдоль этого ряда. Один инспектор с помощью ICVD просматривает предметы в ряду и устно объявляет каждый предмет как отработавшее топливо, незанятое место или как некоторый другой объект, в то время как второй инспектор сравнивает наблюдаемые результаты с заявлениями по установке. В настоящее время разрабатывается DCVD для использования при проверке сборок с длительными временами охлаждения и/или малыми глубинами выгорания, генерирующих слабые черенковские сигналы, которые не поддаются регистрации с помощью стандартного ICVD.

### 2.4. ДРУГИЕ МЕТОДЫ НРА

#### 2.4.1. Радиационные измерения

**KEDG.** Гибридный денситометр с использованием эффекта К-полосы поглощения представляет собой имеющееся на установке оборудование, используемое МАГАТЭ для определения концентрации Pu в растворах. Система состоит из Ge детектора высокого разрешения, многоканального анализатора и портативного компьютера. Источник низкоэнергетического гамма-излучения  $^{57}\text{Se}/^{57}\text{Co}$  располагают таким образом, чтобы гамма-излучение падало на небольшой флакон с раствором, содержащий пробу. Определение степени поглощения этого излучения позволяет с высокой чувствительностью измерить концентрацию Pu в пробе.

#### 2.4.2. Измерение физических свойств

МАГАТЭ также располагает оборудованием для измерения таких параметров, как вес объекта (LCBS), толщина стенки контейнера (ULTG) и уровень жидкости в баке (PTMS).

**LCBS.** Система для измерения веса контейнеров с гексафторидом урана, показанная на рис. 13, работает в двух диапазонах нагрузок: до 5000 кг и до 20 000 кг и обеспечивает удобное и быстрое определение веса брутто крупногабаритных, массивных объектов, таких, как транспортные контейнеры для  $\text{UF}_6$ . Конструкция динамометрического элемента включает две соединительных скобы, между которыми находится узел измерения нагрузки на базе тензодатчика. При подъеме груза лебедкой тензодатчик деформируется, что приводит к изменению его электрического сопротивления. Это изменение сопротивления преобразуется в отсчет веса, отображаемый на цифровом индикаторе блока считывания, соединенного кабелем с тензодатчиком. Как правило, веса брутто определяются этой системой с точностью выше 1%.



Рис. 13. LCBS: Система для измерения веса контейнеров с гексафторидом урана.



Рис. 14. ULTG: Ультразвуковой толщиномер.

**ULTG.** Ультразвуковой толщиномер (рис. 14) представляет собой малогабаритный ручной прибор с цифровым индикатором, используемый для измерения толщины стенки объекта на основе измерения времени распространения ультразвукового сигнала, отражающегося от внутренней стенки. Информация о толщине иногда необходима для внесения поправок на ослабление излучения в стенках контейнеров, таких, как транспортные контейнеры для  $UF_6$ , бункеры для  $UO_2$  и фляги для  $UO_2$ . Эти поправки особенно важны в тех случаях, когда толщина стенки контейнера неодинакова. При использовании ULTG со стандартным зондом типичный диапазон измерений для стали составляет от 1,2 до 200 мм. В стандартном режиме эксплуатации данные о скорости ультразвуковых волн в конкретной среде хранятся в памяти ULTG, так что время распространения сигнала может быть сразу же преобразовано в отсчет толщины стенки, воспроизводимый на индикаторе.

### 3. РАЗРУШАЮЩИЙ АНАЛИЗ

Измерения методом разрушающего анализа (РА) для целей элементного анализа и определения изотопного состава могут проводиться на всех типах твердых и жидких материалов, с которыми приходится сталкиваться на ядерных установках с материалом в балк-форме. РА используется следующим образом:

- (a) для проверки отсутствия длительного переключения поставленных под гарантии ядерных материалов,
- (b) для сертификации рабочих эталонов, используемых для калибровки приборов НРА и установленных приборов для проверки,
- (c) для обеспечения уверенности в качестве и независимости измерений на площадке (например, аттестации процедур для конкретной установки),
- (d) для проведения периодических проверок измерительной системы оператора.

Измерения методом РА для целей проверки включают следующие этапы:

- (1) отбор независимых проб;
- (2) их кондиционирование на установке с целью обеспечения того, чтобы их химическая форма обеспечивала сохранение их целостности во время перевозки;
- (3) их упаковку, опечатывание и перевозку в Аналитическую лабораторию по гарантиям МАГАТЭ (АЛГ) в Зайберсдорфе, около Вены;
- (4) их анализ в АЛГ или Сети аналитических лабораторий (САЛ), состоящей из лабораторий в различных государствах, которые сертифицированы для проведения анализа проб, связанных с применением гарантий;
- (5) статистическую оценку результатов их анализа.

Для получения значимых и достаточно точных результатов необходимо на каждом из этих этапов применять оптимизированные и обоснованные процедуры.

Балк-измерение обычно рассматривается в качестве части отбора проб. Балк-данные, имеющие отношение к пробам и собираемые на площадке инспектором одновременно с отбором проб, включают веса или объемы отобранных предметов или партий согласно значениям, заявленным оператором и проверенным инспектором. В дополнение к балк-данным, в рабочем документе фиксируются заявления оператора относительно элементного и изотопного состава отобранного материала. В этом рабочем документе содержатся инструкции относительно количеств отбираемых проб и



Рис. 15. Флаконы для проб, используемые МАГАТЭ при отборе проб для целей проверки. Вверху слева: флаконы для порошкообразного  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  или высокообогащенного  $^{235}\text{U}$ . Вверху справа: флакон из твердого полиэтилена для твердых или плотных материалов. Внизу слева: стеклянный флакон для порошкообразного обедненного, природного или низкообогащенного  $^{235}\text{U}$ . Внизу справа: контейнер для  $^{235}\text{U}$ .

рекомендуемых для использования флаконов для проб. МАГАТЭ были выбраны и проверены конкретные типы флаконов для отбора и транспортировки проб различных типов материалов (рис. 15).

В таблице V представлены краткие сведения об основных аналитических методах, применяемых при измерениях методами РА. Данные о точности, представленные в таблице значениями случайной и систематической неопределенности, представляют соответственно значения, полученные при анализе материалов ядерной чистоты или аналогичной химической чистоты. Они включают вклады всех неопределенностей, возникающих после отбора проб. Влияние отбора проб, примесей и чужеродных элементов различно в зависимости от типа материала, причем в такой степени, что неопределенности, связанные с отбором проб, могут стать доминирующим фактором в суммарной ошибке измерения.



# РАЗРУШАЮЩИЙ АНАЛИЗ

ТАБЛИЦА V. ОСНОВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ АЛГ И САЛ

Аналитический метод	Анализируемый материал	Тип материала	Неопределенность (отн. %)	
			Случайная	Систематическая
Элементный анализ				
Титрование по методу Дэвиса и Грея, NBL	U	U, U-Pu, U-Tha <sup>a</sup>	0,05	0,05
Титрование по методу Макдоналда и Сэвиджа	Pu	Pu материалы <sup>a</sup>	0,1	0,1
Кулонометрия с контролируемым потенциалом	Pu	Чистые Pu материалы	0,1	0,1
Гравиметрия с прокаливанием	U, Pu	Оксиды U	0,05	0,05
Рентгеновская денситометрия с исп. эффекта К-полосы поглощения	U, Th, Pu	U, Pu, U-Pu,U-Th <sup>a</sup>	0,2	0,2
Рентгено-спектральный флуоресцентный анализ с исп. эффекта К-полосы поглощения	Pu	Pu материалы <sup>a</sup>	0,2	0,2
Рентгено-флуоресцентная спектрометрия с дисперсией по длине волны	Pu, U	Чистый U, оксиды Pu и MOX <sup>a</sup>	0,3	0,3
Масс-спектрометрия с изотопным разбавлением	U, Pu	Входные растворы отработавшего топлива, Pu и U-Pu материалы, HALW <sup>*</sup>	0,1	0,1
Спектрофотометрия плутония (VI)	Pu	Pu, U-Pu <sup>a</sup>	0,2	0,2

<sup>\*</sup> HALW (High Level Liquid Waste) – высокоактивные жидкие отходы (прим. перев.)

ТАБЛИЦА V. ОСНОВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ АЛГ И САЛ (продолж.)

Аналитический метод	Анализируемый материал	Тип материала	Неопределенность (отн. %)	
			Случайная	Систематическая
Альфа-спектрометрия	Np, AM, CM	HAWL, отработавшее топливо на входе	5,0	5,0
<i>Изотопный анализ</i>				
Термоионизационная масс-спектрометрия	Изотопы U и Pu	Все Pu и U материалы и входные растворы отработавшего топлива	0,05 <sup>b</sup>	0,05 <sup>b</sup>
Гамма-спектрометрия высокого разрешения (Ge детектор)	Изотопы U и Pu, Am, Np	Чистые U и Pu материалы	0,5–2,0	0,5–2,0
Гамма-спектрометрия (NaI детектор)	<sup>235</sup> U	Низкообогащенные U материалы	0,2–0,5	0,2–0,5
Альфа-спектрометрия	<sup>238</sup> Pu	Материалы Pu	0,2	0,3

<sup>a</sup> Кроме отработавшего топлива.

<sup>b</sup> Для отношений основных изотопов.

### 3.1. ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ

#### 3.1.1. Анализ урана методом потенциометрического титрования

Титрование по методу Дэвиса и Грея из Нью-Брунсвикской лаборатории (NBL) является основным методом определения содержания U в граммовых пробах всех типов необлученных материалов. Автоматизированная система титрования (рис. 16), разработанная в АЛГ, обеспечивает точность измерений 0,05% отн. или выше в штатном режиме эксплуатации. Этот метод применим для проб любых U материалов, содержащих по меньшей мере 50 г U, с тем чтобы можно было произвести титрование по меньшей мере четырех идентичных аликвотных проб, содержащих по крайней мере 10 мг U каждая.



*Рис. 16. Автоматический титратор U.*

### **3.1.2. Анализ плутония методом потенциометрического титрования**

Для определения содержания Pu в граммовых пробах необлученных ядерных материалов используется титрование по методу Макдоналда и Сэвиджа. Этот метод обеспечивает точность 0,1% отн. и выше. Он предназначен для определения Pu в количествах 2-4 мг в растворах азотной кислоты. Метод пригоден для прямого определения содержащегося в ядерных материалах Pu различного происхождения: от Pu с перерабатывающих установок до свежих реакторных топливных материалов с отношением U:Pu до 30.

### **3.1.3. Анализ плутония методом кулонометрии с контролируемым потенциалом**

Кулонометрия с контролируемым потенциалом (рис. 17) используется для определения Pu в количествах 4-10 мг. Кулонометрия может также использоваться для определения Pu в пробах промышленных материалов, при условии предварительного проведения химического разделения для удаления потенциальных создающих помехи элементов. Метод применяется для анализа граммовых проб Pu, таких, как растворы Pu продуктов, металлический Pu и порошки или таблетки оксида Pu, а также смешанных оксидов U и Pu, получаемых после растворения твердой пробы.



Рис. 17. Блок кулонометрии для определения концентрации Рu.

#### 3.1.4. Анализ урана методом гравиметрии с прокаливанием

Гравиметрия с прокаливанием применяется для определения концентраций U в уране ядерной чистоты и оксидах Рu. Точно взвешенную пробу превращают в стехиометрический  $U_3O_8$  посредством прокаливания в воздухе при  $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  до получения постоянной массы по U.

Количество урана или плутония в образце рассчитывают, используя гравиметрический коэффициент конверсии  $U_3O_8$  в уран, в зависимости от изотопного состава пробы. Точность для оксидов ядерной чистоты с уровнем примесей менее 200 частей на миллион составляет порядка 0,05 % отн. или выше.

Присутствие нелетучих примесей (среди которых наиболее часто встречаются и доминируют по относительному содержанию Fe, Si, Al и Ca) требует введения поправок на содержание примесей, определяемых методами рентгено-флуоресцентной спектроскопии и/или масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.



*Рис. 18. Анализ урана/плутония методом рентгеновской денситометрии с использованием эффекта К-полосы поглощения (HKED).*

### **3.1.5. Анализ урана, тория или плутония методом рентгеновской денситометрии с использованием эффекта К-полосы поглощения**

Метод рентгеновской денситометрии с использованием эффекта К-полосы поглощения (или гибридной денситометрии с использованием эффекта К-полосы поглощения, HKED) применим ко всем U, Th и Pu материалам и к смешанным пробам U-Th или U-Pu, содержащим достаточное количество анализируемого вещества. При концентрациях анализируемого вещества в диапазоне 50-150 г/л может быть достигнута точность порядка 0,2% отн. Данный метод весьма селективен.

### **3.1.6. Определение плутония методом рентгено-флуоресцентного анализа с использованием эффекта К-полосы поглощения**

Рентгено-флуоресцентный анализ с использованием эффекта К-полосы поглощения применяется для проб  $\text{PuO}_2$  и растворов нитрата Pu, содержащих по меньшей мере 3-4 мг Pu, помимо известных количеств U в качестве внутреннего эталона. Он также используется для анализа U в пробах MOX при определении содержания Pu методом титрования. Достижимая точность составляют 0,2% отн.

### **3.1.7. Анализ плутония и/или урана методом рентгено-флуоресцентной спектроскопии с дисперсией по длине волны**

Рентгено-флуоресцентная спектроскопия с дисперсией по длине волны используется в сочетании с промышленной высокочастотной печью для



Рис. 19. Рентгено-флуоресцентный спектрометр.

экспресс- анализа Pu и смешанных оксидов U-P (рис. 19). Приблизительно 0,3 г пробы расплавляют во флюсе из бората лития, расплав выливают в платиновую тарелку, получая диск бората весьма однородного состава. Концентрации Th, U, Np, Pu и Am могут быть определены одновременно посредством измерения флуоресценции линий  $L_{\alpha}$ . Калибровочные кривые линейны при не менее чем десятикратном изменении концентрации. Полный анализ занимает приблизительно 15 минут, а воспроизводимость составляет приблизительно 0,3% для концентраций основных тяжелых элементов.

Рентгено-флуоресцентная спектрометрия используется также для полуколичественного определения концентраций основных, второстепенных и микроэлементов с атомными массами от 9 (фтор) до 89–103 (актиноиды) в различных типах проб.

### 3.1.8. Анализ урана или плутония методом масс-спектрометрии с изотопным разбавлением

Масс-спектрометрия с изотопным разбавлением применяется для определения U или Pu во всех пробах входных растворов отработавшего топлива, а также для анализа проб с низким содержанием, таких, как миллиграммовые пробы U-P и отходы.

Для определения U и/или Pu во входных растворах отработавшего топлива с глубоким выгоранием в аликвотную порцию раствора пробы вводят известное количество сертифицированного радиоиндикатора, содержащего обогащенный  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . Для чистых U материалов используют радиоизотопную метку  $^{233}\text{U}$ ; для чистых Pu материалов или отработавшего топлива с малым выгоранием - радиоизотопную метку  $^{242}\text{Pu}$  или  $^{244}\text{Pu}$ . Растворы плутонийсодержащих материалов с радиоизотопными метками подвергают химической обработке для обеспечения изотопного равновесия Pu. Две



*Рис. 20. Роботизированная система для разделения проб входных растворов отработавшего топлива.*

аликвоты с радиоизотопными метками и аликвоту без метки подвергают отдельной хроматографической очистке с целью получения чистых фракций для термоионизационной масс-спектрометрии (см. раздел 3.2.1.). Химическую обработку проб отработавшего топлива производят в полностью автоматической роботизированной системе (рис. 20). Получаемые фракции U и Pu затем выпаривают досуха и повторно растворяют в азотной кислоте для получения растворов, содержащих приблизительно 1 мкг U и 50 нг Pu на микролитр. Изотопные отношения аликвотных проб с метками и без меток измеряют методом термоионизационной масс-спектрометрии и затем рассчитывают соответствующее содержание U и Pu. В тех случаях, когда возможно прямое введение радиоизотопной метки в первоначальную пробу и когда проводятся измерения методом масс-спектрометрии с полным выпариванием, точность элементного анализа достигает 0,1% отн. и выше.

### 3.2. ИЗОТОПНЫЙ АНАЛИЗ

#### **3.2.1. Анализ изотопного состава урана или плутония методом термоионизационной масс-спектрометрии**

Термоионизационная масс-спектрометрия с применением трех мультidetекторных масс-спектрометров, каждый из которых оборудован девятью цилиндрами Фарадея, используется для измерения изотопного состава U или Pu во всех пробах ядерных материалов, представляемых в АЛГ (рис. 21).



Рис. 21. Термоионизационный масс-спектрометр.

Комплексное новое программное обеспечение, разработанное в сотрудничестве с Институтом эталонных материалов и измерений в Гееле, Бельгия, Лос-Аламосской национальной лабораторией в Соединенных Штатах Америки и в АЛГ, включает стандартные программы для основных этапов калибровки, таких, как тест цилиндра на линейность, измерения относительной эффективности цилиндров и калибровка системы с учетом эффектов масс-фракционирования.

Изотопные отношения в диапазоне 0,05–20 могут быть измерены с точностью 0,05% отн. при использовании процедуры сбора данных, включающей полное выпаривание образца, загруженного на нить накала. Эта процедура значительно уменьшает эффекты масс-фракционирования.

### 3.2.2. Анализ изотопного состав плутония методом гамма-спектрометрии высокого разрешения

Для предварительного измерения всех проб Pu, получаемых в АЛГ, используется метод гамма-спектрометрии высокого разрешения. Содержание Pu в пробах, содержащих Np, анализируют методом масс-спектрометрии с изотопным разбавлением, а не методом потенциометрического титрования. Тем самым АЛГ приобрела значительный опыт в области изотопного анализа с использованием многоцелевой программы гамма-спектрометрического анализа под названием MGA (многогрупповой анализ).

Пробы, содержащие Pu, помещают в своей первоначальной упаковке на плоский Ge детектор, и регистрируют спектр излучения в энергетическом диапазоне 0-614 кэВ. Затем этот спектр анализируют с помощью программы MGA, которая рассчитывает относительное содержание  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$ . Содержание изотопа  $^{242}\text{Pu}$  оценивают методом изотопной корреляции.



Одновременно определяют относительное содержание  $^{235}\text{U}$  и  $^{237}\text{Np}$ , если они представлены в Pu пробе, а также содержание  $^{241}\text{Am}$ . Типичная точность анализа относительного содержания всех изотопов, кроме  $^{242}\text{Pu}$ , варьируется между 0,5 и 2% отн.

### 3.2.3. Анализ урана-235 в растворе методом гамма-спектрометрии

Гамма-спектрометрия с NaI детектором используется в качестве резервной процедуры для масс-спектрометрии при определении обогащения по  $^{235}\text{U}$  проб U, подвергнутых растворению и анализу концентрации U методом потенциометрического титрования.

В этой процедуре аликвотные пробы раствора U объемом 5 мл, содержащие приблизительно 80 г/л U в 1 моле азотной кислоты, взвешивают и помещают в стеклянные трубки идентичной формы, и эти трубки закрывают пробками. Для калибровки используют комплект из пяти стандартных растворов, содержащих известные концентрации эталонов Национального бюро стандартов (U-010, U-015, U-020A, U-030A и U-050). Рассчитывают число отсчетов в энергетическом пике 185,7 кэВ  $^{235}\text{U}$  и его связывают, в весовых процентах, с общим содержанием U в пробе, проанализированной методом титрования. В отсутствие помех от радиоизотопов точность результатов лежит в диапазоне между 0,5% отн. для природного и 0,2% отн. для обогащенного U.

## 3.3. ДРУГИЕ МЕТОДЫ РА

Альфа-спектрометрия применяется для измерения относительного содержания  $^{238}\text{Pu}$  с использованием Si(Li) или ионно-имплантированных детекторов. Этот метод используется параллельно масс-спектрометрии с изотопным разбавлением для определения относительного содержания  $^{238}\text{Pu}$  или для измерения Pu в пробах отработавшего топлива. Измерение  $^{237}\text{Np}$  ( $^{241}\text{Am}$ ) и  $^{244}\text{Cm}$  также проводят методом альфа-спектрометрии в сочетании с химическим разделением.

Спектрофотометрия плутония (VI) применяется для определения миллиграммных количеств Pu в малых пробах продуктов, причем достигается такая же точность, как при титровании.

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP/MS) позволяет определять большинство элементов с уровнями концентрации в растворе порядка миллиардных долей. Этот метод используется для количественного и качественного определения примесей в различных матрицах (в том числе во многих типах инспекционных проб).

## 4. СОХРАНЕНИЕ И НАБЛЮДЕНИЕ

Методы сохранения и наблюдения (С/Н) широко используются МАГАТЭ ввиду их гибкости и экономической эффективности. Двумя основными категориями С/Н являются системы оптического наблюдения и системы опечатывания.

Оптическое наблюдение наиболее эффективно в зонах хранения (таких, как бассейны хранения отработавшего топлива) с относительно малым числом видов деятельности, которые могут быть истолкованы как изъятие ядерного материала. В типичном применении могут использоваться две или более камер, установленных таким образом, чтобы зона хранения была охвачена полностью. Поле зрения камер формируется таким образом, чтобы легко определялось любое перемещение предметов, которое может представлять собой изъятие ядерного материала. Это означает, что предметы в пределах поля зрения должны быть достаточно большими и могут быть идентифицированы и что должна иметься возможность регистрации одного или нескольких изображений во время перемещения материала. Регистрация изображений может происходить периодически с установленной частотой (с интервалами, значительно более короткими, чем наименьшее возможное время изъятия), или запускаться движением (т.е. изменением обстановки). Оптическое наблюдение - это по существу автономный режим работы, который может подкрепляться дистанционной передачей видеоданных или данных о работе системы (т.е. состоянии системы наблюдения). Автономные системы мониторинга и системы дистанционного мониторинга обсуждаются в разделе 5.

Печати обычно устанавливаются на отдельные предметы, содержащие ядерный материал. Печать может помочь в установлении того, что материал не вводился в контейнер или не удалялся из него. В то же время опечатывание обеспечивает уникальную идентичность опечатанного контейнера. Автономное оборудование МАГАТЭ для мониторинга также опечатывается. Большинство печатей МАГАТЭ применяется в течение продолжительных периодов времени, обычно от нескольких месяцев до лет. Печати могут быть либо разового использования, что подразумевает их замену при проверке, либо допускающими проверку на месте, если их целостность и идентичность может быть проверена в полевых условиях. Если печати допускают проверку на месте, то деятельность по проверке должна быть эффективной (с тем чтобы ограничить радиационное облучение инспектора) и чрезвычайно надежной. Деятельность по проверке на месте должна включать контроль сохранения предмета, целостности печати и метода установки печати на этот предмет.

#### 4.1. НАБЛЮДЕНИЕ

Наблюдение включает сбор информации с помощью как приборов, так и визуального наблюдения. Поскольку круглосуточное визуальное наблюдение не представляется возможным из-за его высокой стоимости, МАГАТЭ разработало ряд оптических систем наблюдения, обеспечивающих эффективное постоянное наблюдение в то время, когда инспектор физически не присутствует на площадке. Автономные методы оптического наблюдения широко используются МАГАТЭ в поддержку и как дополнение учета ядерного материала и для обеспечения непрерывности информации о ядерных материалах и других предметах, значимых с точки зрения гарантий, в периоды между посещениями с целью проведения инспекции на месте.

Эффективное наблюдение обеспечивается, когда поле зрения камеры охватывает всю зону, представляющую интерес для гарантий, и фиксируется перемещение поставленных под гарантии предметов. Кроме того, интервал между кадрами выбирают таким, чтобы в случае перемещения предмета записывались по меньшей мере два кадра и можно было определить направление перемещения. Частота записи изображений может определяться фиксированным временным интервалом, значительно более коротким, чем наименьшее время изъятия, или же запись может запускаться при обнаружении изменения обстановки или другими внешними средствами запуска.

Оптическое наблюдение – это по существу автономный метод, который может использоваться как для записи только изображений, так и в сочетании с другим автономным оборудованием для мониторинга с целью получения данных по ядерным измерениям, истории сохранения и других данных. Системы наблюдения МАГАТЭ могут также автоматически передавать данные в Центральные учреждения МАГАТЭ или региональное бюро МАГАТЭ.

Оборудование для наблюдения проектируется таким образом, чтобы оно отвечало требованиям нескольких базовых применений. В основном, эти требования являются следующими:

- (a) однокамерное — для легкодоступных мест нахождения,
- (b) однокамерное — для труднодоступных мест нахождения,
- (c) многокамерное — для более крупных и более сложных установок,
- (d) краткосрочное наблюдение — для видов деятельности, включающих мониторинг открытой активной зоны,
- (e) наблюдение — для дистанционного мониторинга,
- (f) подводное кабельное телевизионное — для неавтономных применений в бассейнах хранения топлива.



*Рис. 22. Блок DCM14 с видеокамерой на базе ПЗС-матрицы (ПЗС - приборы с зарядовой связью)*

Оборудование для наблюдения МАГАТЭ постоянно развивалось: вначале это были пленочные камеры, впоследствии - системы, основанные на технологии видеозаписи, и в настоящее время используются цифровые системы оптического наблюдения (ЦОН). Эволюция оборудования для наблюдения МАГАТЭ была обусловлена главным образом мощными коммерческими тенденциями, диктующими применяемые на рынке технологии. Благодаря значительному сокращению числа подвижных частей, системы ЦОН в своей основе более надежны, чем предыдущие технологии на базе фото- и видеопленки. К другим преимуществам относятся улучшенная оценка цифровых данных, возможности дополнительных функций просмотра, улучшенная аутентификация и шифрование данных и облегчение дистанционного мониторинга.

В 1995 году МАГАТЭ приступило к осуществлению программы замены оборудования с целью постепенного вывода из эксплуатации старого и устаревшего оборудования для наблюдения. В 1998 году Департаментом гарантий было принято решение о том, что системы наблюдения на основе модуля цифровой камеры DCM14 (рис. 22) наиболее соответствуют важнейшим требованиям пользователей к системам наблюдения МАГАТЭ и что именно это оборудование лучше всего подходит для замены существующих систем на базе фото- и видеопленки. Будучи весьма компактной, DCM14 обеспечивает выполнение многих задач, требуемых для системы наблюдения для целей гарантий, включая:

- (1) преобразование в цифровую форму стандартного изображения от видеокамеры;
- (2) обеспечение достоверности изображений и данных, гарантирующее их подлинность;

## СОХРАНЕНИЕ И НАБЛЮДЕНИЕ

- (3) шифрование изображения и данных, обеспечивающее конфиденциальность;
- (4) сжатие изображений с целью уменьшения требуемой емкости устройств хранения изображений и данных;
- (5) хранение данных на месте, обеспечивающее резервирование при передаче данных непосредственно из корпуса камеры;
- (6) обнаружение изменений в поле зрения камеры (обнаружение изменений обстановки);
- (7) управление электропитанием с целью обеспечения максимальной продолжительности работы в случае отказа местного электроснабжения на установке;
- (8) надежное дистанционное наблюдение при подключении к коммуникационному серверу.

Системы наблюдения для целей гарантий до некоторой степени уникальны в том отношении, что оборудование должно работать автономно в течение длительных периодов времени в тяжелых условиях и с высокой степенью надежности. Несмотря на предпринимавшиеся в течение многих лет неоднократные попытки найти готовые коммерчески доступные эквиваленты, не было найдено ни одной системы, готовой к применению без доработок. Системы, почти отвечающие требованиям, неизменно требуют определенной модификации, влекущей за собой дополнительные затраты.

Благодаря внутренне присущей гибкости модуля DCM14, его внедрение также открыло путь к консолидации и стандартизации будущих систем наблюдения. Использование DCM14 в различных конфигурациях позволило создавать однокамерные и многокамерные системы для легкодоступных и труднодоступных мест нахождения на основе стандартного набора базовых конструктивных блоков. Начиная с 1998 года, DCM14 был использован для разработки 5 базовых цифровых систем наблюдения, перекрывающих весь диапазон применений для целей гарантий, зачастую в неблагоприятных условиях среды. Краткие сведения о стратегии замены оборудования представлены в таблице VI.

Наблюдение продолжает играть важную роль в гарантиях. В течение последних нескольких лет происходил устойчивый рост числа блоков камер, установленных на поставленных под гарантии ядерных установках.

В настоящее время у МАГАТЭ имеется около 800 камер, подключенных к 400 системам наблюдения на 170 поставленных под гарантии площадках во всем мире. Хотя замена устаревших систем идет полным ходом, программу, по-видимому, не удастся полностью завершить ранее 2005 года. Все это время будут совместно эксплуатироваться старые и новые системы. В таблице VII

ТАБЛИЦА VI. ПЛАН ЗАМЕНЫ И КОНСОЛИДАЦИИ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ

Применение	Фото- и видеопленочные системы и ранние цифровые системы, используемые в настоящее время, но подлежащие выводу из эксплуатации (1995–2002 годы)		Системы ЦОН и другие системы для текущего и будущего использования (2003–)	
Стационарная однокамерная - для легко-доступных мест нахождения	CSMS	<i>Компактная система наблюдения и мониторинга (COSMOS)</i>	ALIS	Однокорпусная система наблюдения с сетевым электропитанием
	PHSR	Блок фото-наблюдения (Minolta)	ALIP	Однокорпусная портативная система наблюдения с батарейным электропитанием
Стационарная однокамерная - для трудно-доступных мест нахождения	GDTV	<i>Цифровая видеосистема GEMINI</i>	DSOS	Цифровая однокамерная оптическая система наблюдения
	MIVS	Модульная интегрированная видеосистема		
Стационарная многокамерная	MXTV	Мультиплексная телевизионная система наблюдения	SDIS	Цифровая оптическая система наблюдения с сервером. До 6 камер
	MOSS	Многокамерная оптическая система наблюдения	DMOS	Цифровая многокамерная оптическая система наблюдения. От 6 до 16 камер.
	UEMS	Модернизированная многокамерная оптическая система наблюдения, разработка Евратома (EMOSS)	FAST	Система наблюдения компании FAST <i>Разработана Евратомом для совместного использования в инспекциях</i>
	VSEU	Мультиплексная видеосистема (DigiQuad)		
Краткосрочное наблюдение	STVS	Телевизионная система для краткосрочного наблюдения	ALIP	Однокорпусная портативная система наблюдения

ТАБЛИЦА VI. ПЛАН ЗАМЕНЫ И КОНСОЛИДАЦИИ СИСТЕМ  
НАБЛЮДЕНИЯ (продолж.)

Применение	Фото- и видеопленочные системы и ранние цифровые системы, используемые в настоящее время, но подлежащие выводу из эксплуатации (1995–2002 годы)		Системы ЦОН и другие системы для текущего и будущего использования (2003–)	
Наблюдение для дистанционного мониторинга			SDIS	Цифровая оптическая система наблюдения с сервером
			DMOS	Цифровая многокамерная оптическая система наблюдения
Подводная телевизионная - для неавтономных применений	UWTV	Подводная телевизионная	UWTV	Подводная телевизионная
	UWVD	Устройство для подводного наблюдения	UWVD	Устройство для подводного наблюдения
Просмотр данных наблюдения - оборудование и программные средства	GARS 6.3	Универсальная усовершенствованная станция просмотра данных наблюдения, версия 6.3	GARS 6.4	Универсальная усовершенствованная станция просмотра данных наблюдения, версия 6.4
	MARS	Усовершенствованная станция просмотра данных наблюдения MIVS		
	MORE	Мультисистемная станция просмотра данных оптического наблюдения		

представлены обзорные данные по основным системам МАГАТЭ на предстоящие годы.

Было также разработано оборудование, обеспечивающее расширенные функциональные возможности просмотра данных наблюдения. В соответствии с теми же тенденциями в области технологии происходила эволюция станций

ТАБЛИЦА VII. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Код	Наименование оборудования	Описание и применения
<i>Фотографическая система</i>		
PHSR	Блок фотонаблюдения (Minolta)	Сдвоенные и строенные пленочные камеры Minolta с батарейным питанием, используемые для общего и краткосрочного наблюдения. Выведены из эксплуатации.
<i>Видеозапись: однокамерные системы наблюдения</i>		
CSMS	Компактная система наблюдения и мониторинга (COSMOS)	Автономная однокамерная система наблюдения с батарейным или сетевым электропитанием, для легкодоступных мест нахождения. Выведена из эксплуатации.
MIVS	Модульная интегрированная видеосистема	Однокамерная система наблюдения для труднодоступных мест нахождения. Выведена из эксплуатации.
SIDS	Система идентификации проб	Система наблюдения для конкретной установки, интегрированная с HLNC и запускаемая при превышении заранее устанавливаемого уровня нейтронного сигнала. Допускает идентификацию MOX проб на установке по изготовлению топлива.
STVS	Телевизионная система для краткосрочного наблюдения	Однокамерная система с рекордером, разработана на основе оборудования MXTV и предназначена для применений с краткосрочным наблюдением. Подлежит замене на ALIS и ALIP.
UWTV	Подводная телевизионная система	Промышленная подводная замкнутая телевизионная система (CCTV) для проверки инспекторами идентификационных данных топлива в бассейнах хранения.
-----		



ТАБЛИЦА VII. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ (продолж.)

Код	Наименование оборудования	Описание и применения
<i>Цифровые: однокамерные системы наблюдения</i>		
ALIP	Однокорпусный портативный блок наблюдения	Однокамерная система с батарейным электропитанием для легкодоступных мест нахождения или для применений, требующих портативных систем наблюдения.
ALIS	Однокорпусный блок наблюдения	Однокамерная система с сетевым электропитанием для легкодоступных мест нахождения.
DSOS	Цифровая однокамерная оптическая система наблюдения	Однокамерная система для установки в труднодоступных местах нахождения.
GDTV	Цифровая видеосистема Gemini	Ранняя однокамерная цифровая система наблюдения для труднодоступных мест нахождения. Заменяет CSMS и MIVS. Запланирован вывод из эксплуатации к началу 2003 года.
<i>Видеозапись: многокамерные системы наблюдения</i>		
FTPV	Видеосистема для наблюдения за передачами топлива	Предназначенная для конкретной установки замкнутая телевизионная система, используемая в бассейнах передачи топлива.
MOSS	Многокамерная оптическая система наблюдения	Многокамерная (до 16 камер) система наблюдения на базе видеоленты. Выводится из эксплуатации к 2005/2006 году.
MXTV	Мультиплексная телевизионная система наблюдения	Многокамерная (до 16 камер) система наблюдения на базе видеоленты. Выводится из эксплуатации к 2004/2005 году.
VSEU	Мультиплексная видеосистема (DigiQuad)	Разработанные Евратомом системы наблюдения двойного использования.
VSPC	Видеосистема	Замкнутая телевизионная система для конкретной установки, возможно совместное воспроизведение на экране до 4 изображений от камер.
-----		

ТАБЛИЦА VII. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ (продолж.)

Код	Наименование оборудования	Описание и применения
<i>Цифровые: многокамерные системы наблюдения</i>		
DMOS	Цифровая многокамерная оптическая система наблюдения	Многокамерная (до 16 камер) система наблюдения с возможностью дистанционного мониторинга.
SDIS	Цифровая оптическая система наблюдения с сервером	Многокамерная (до 6 камер) система наблюдения с возможностью дистанционного мониторинга.
UEMS	Модернизированная многокамерная оптическая система наблюдения Евратома	Модернизированная многокамерная (до 4 камер) система EMOSS. Выводится из эксплуатации к 2004 году.
<i>Системы просмотра данных наблюдений</i>		
GARS	Универсальное усовершенствованное программное обеспечение для станции просмотра данных	Для просмотра данных наблюдения, поступающих от систем ALIS, ALIP, DMOS, DSOS, DGTV, SDIS.
MARS	Усовершенствованная станция для просмотра данных MIVS	Для просмотра данных наблюдения только от системы MIVS. Выведена из эксплуатации.
MORE	Мультисистемная станция просмотра данных оптического наблюдения	Для систем COSMOS, MIVS, MXTV, MOSS, VSEU. Выводится из эксплуатации к концу 2005 года.

просмотра данных: вначале использовались рабочие места для просмотра данных на фотопленках, затем - системы на основе видеозаписи (некоторые из которых обладали усовершенствованными функциональными особенностями, такими, как обнаружение изменений обстановки), и в настоящее время МАГАТЭ располагает новейшим программным обеспечением для просмотра GARS, которое можно устанавливать на персональный компьютер, оборудованный соответствующим периферийным оборудованием для работы с цифровыми данными. Ниже изложены дополнительные подробные сведения о новых и наиболее широко используемых цифровых системах наблюдения МАГАТЭ.



*Рис. 23. Однокорпусный блок наблюдения.*

### **4.1.1. Стационарная однокамерная система для легкодоступных мест нахождения**

**ALIS.** Однокорпусный блок наблюдения (рис. 23) представляет собой работающую от сети, полностью автономную цифровую систему наблюдения, созданную на основе модуля цифровой камеры DCM14. Все компоненты размещены в стандартном корпусе камеры МАГАТЭ с сохранением всех функциональных возможностей модуля DCM14 плюс интегрированный терминал интерфейса инспекторов. Изображения и соответствующие регистрационные файлы хранятся на флэш-картах PCMCIA. С флэш-картой на 660 мегабайт ALIS может регистрировать от 40 000 и 50 000 изображений в зависимости от используемого режима сжатия.

### **4.1.2. Стационарная однокамерная система для труднодоступных мест нахождения**

**DSOS.** Цифровая однокамерная оптическая система наблюдения (рис. 24) базируется на технологии DCM14 и предназначена для условий применений, когда камера должна устанавливаться в труднодоступном месте нахождения. DSOS состоит из цифровой камеры на основе DCM14, связанной с блоком записи специальным композитным кабелем. Блок записи, который также выполнен на основе технологии DCM14, позволяет инспектору работать с системой в более удобном и безопасном месте, используя процедуры, которые аналогичны процедурам, применяемым при работе с ALIS. DSOS может также использоваться в качестве прямой замены MIVS.



Рис. 24. DSOS: цифровая однокамерная оптическая система наблюдения.



Рис. 25. SDIS: цифровая система наблюдения на базе сервера.

#### 4.1.3. Стационарная многокамерная система

**SDIS.** Цифровая система наблюдения на базе сервера (рис. 25) была первоначально разработана для применения в режиме дистанционного мониторинга. Ее первичная функция – это сбор изображений и данных, поступающих максимально от 6 камер наблюдения DCM14. Она может также использоваться для прямого опроса печатей VACOSS. Сервер SDIS сортирует и классифицирует изображения и другие данные и может надежно передавать изображения и данные в учреждения МАГАТЭ. Блок бесперебойного питания является неотъемлемой частью SDIS и спроектирован так, чтобы обеспечивать работу системы в полном объеме в течение приблизительно 48 ч без внешнего сетевого источника питания. На рис. 25 показано внутреннее устройство SDIS. Имеются два режима работы:

- (1) Автономный: данные хранятся на сменном диске Jaz и физически переносятся на станцию просмотра данных, оснащенную программным обеспечением GARS.

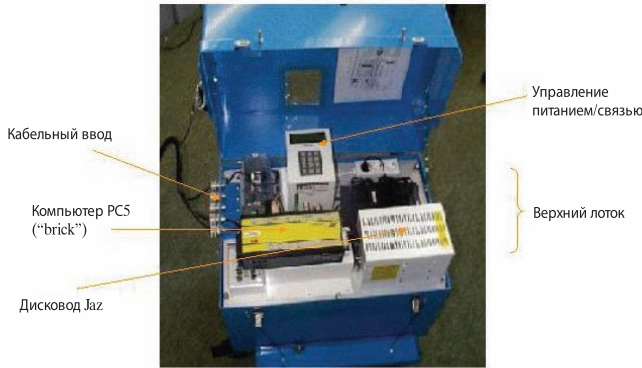


Рис. 26. Сервер SDIS ('blue box' – крышка открыта).

- (2) Дистанционный мониторинг: данные пересылаются в учреждения МАГАТЭ по аналоговой телефонной линии (PSTN), цифровым линиям ISDN, ADSL, посредством ретрансляции кадров или спутниковой связи и впоследствии просматриваются на станции просмотра данных, оснащенной программным обеспечением GARS.

**DMOS.** Цифровая многокамерная оптическая система наблюдения (рис. 27) предназначена для автономного применения и для использования в режиме дистанционного мониторинга. DMOS используется для применений, в которых необходимо устанавливать от 6 до 16 камер, связанных с центральным регистрационно-коммуникационным пультом. Система DMOS базируется на технологии DCM14, и, как и в случае с SDIS, каждая камера опрашивается компьютером сервера. Изображения и данные от каждой камеры первоначально сохраняются в большой дисковой системе RAID перед их конечным хранением на сменном цифровом линейном накопителе на ленте (DLT).

## 4.1.4. Краткосрочное наблюдение

**ALIP.** Однокорпусный портативный блок наблюдения с батарейным питанием (рис. 28) представляет собой работающую от батарей, полностью автономную цифровую систему наблюдения, спроектированную на основе модуля цифровой камеры DCM14. Он состоит из камеры, видеотерминала, модуля цифровой камеры DCM14, сетевого блока питания и ряда батарей, размещенных в корпусе камеры, который имеет такую же площадь основания, как и стандартный корпус камеры МАГАТЭ, но удлиннен по высоте для размещения батарей. С полностью заряженными аккумуляторными батареями система может обеспечивать наблюдение в течение 100 сут без внешнего



*Рис. 27. DMOS: цифровая многокамерная оптическая система наблюдения.*



*Рис. 28. ALIP: однокорпусный портативный блок наблюдения с батарейным питанием.*

электропитания. Изображения и соответствующие регистрационные файлы хранятся на PC-картах. С флэш-картой на 660 Мб ALIP может регистрировать от 40 000 до 50 000 изображений в зависимости от используемого режима сжатия.

#### **4.1.5. Подводная телевизионная система для применения в неавтономном режиме**

Портативная система UWTV (рис. 29) используется главным образом для контроля пучков твэлов в бассейнах для отработавшего топлива реакторов типа CANDU. Она также может использоваться для всех других видов подводных



Рис. 29. Система UWTV.

инспекций. Полная система состоит из радиационно-стойкой камеры, блока управления камерой (БУК) и различного вспомогательного оборудования, такого, как оснащённая электроприводом поворотная головка с углом поворота  $90^\circ$  и система освещения. Предусмотрены приборы освещения для операций по контролю на дальнем и ближнем расстояниях. Для проверки идентификации топливных сборок камера должна обеспечивать считывание мелкого шрифта в условиях ограниченного освещения и выдерживать очень высокий уровень излучения, оставаясь водонепроницаемой на глубине до 15 м в толще воды. БУК снабжен встроенным монохромным монитором для просмотра записей на месте. Видеосигнал может также записываться на внешнем кассетном видеомagneитофоне.

#### 4.1.6. Программное обеспечение для просмотра данных наблюдения

**MORE.** Мультисистемная станция просмотра данных оптического наблюдения (рис. 30) предназначена для обеспечения инспекторам возможности просмотра видеозаписей CSMS, MIVS, MXTV и MOSS. С прекращением применения CSMS и MIVS в 2002 году станция MORE по-прежнему будет использоваться для просмотра данных MXTV и MOSS до тех пор, пока эти системы наблюдения в полевых условиях не будут заменены эквивалентными цифровыми многокамерными блоками (например, DMOS).

Каждая система MORE включает IBM-совместимый компьютер, работающий с программным обеспечением системы MORE (со встроенным накопителем DAT для архивирования цифровых изображений), компьютерный монитор, монохромный видеомонитор с автоматическим определением стандарта видеосигнала CCIR/EIA-170, три видеомagneитофона для воспроизведения видеозаписей наблюдения и принтер для распечатки отчетов.



Рис. 30. MORE: мультисистемная станция просмотра данных оптического наблюдения.

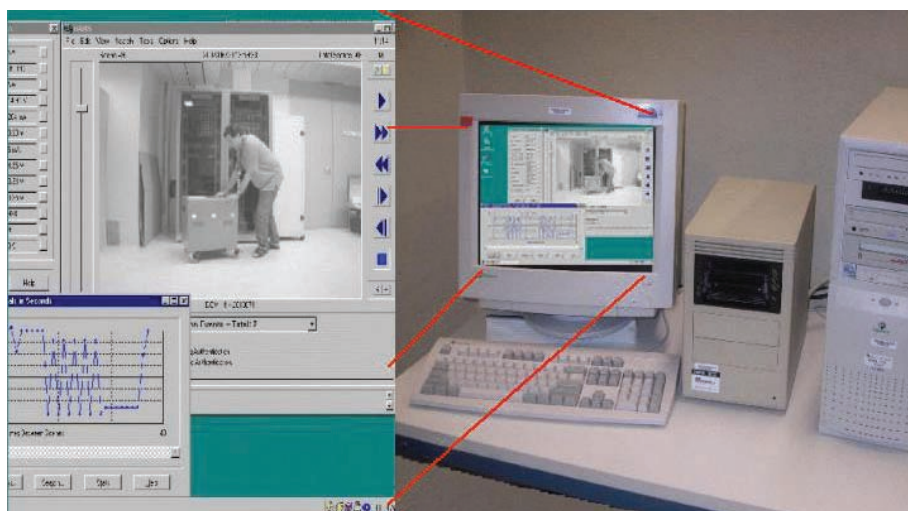


Рис. 31. Программное обеспечение GARS.

Для использования режима обнаружения изменений в кадре необходимо сначала создать настроечные файлы. На записанном изображении, зафиксированном камерой в данном месте, определяются интересующие зоны. Интересующие зоны определяются в поле зрения как участки, значимые с точки зрения гарантий (например, возможные пути изъятия поставленного под гарантии материала).

**GARS.** Универсальное усовершенствованное программное обеспечение для станций просмотра данных (рис. 31) было разработано для использования с персональным компьютером и накопителями на соответствующих носителях с



целью просмотра записанных изображений, полученных от систем ALIP, ALIS, DSOS, DMOS, GDTV и SDIS.

Упрощая, можно сказать, что GARS обеспечивает гибкий и удобный в пользовании интерфейс инспектора (аналогичный популярным коммерчески доступным универсальным проигрывателям) для просмотра изображений и данных, зафиксированных на флэш-картах, дисках Jaz, сменных жестких дисках, CD ROM и DLT. GARS также имеет расширенные функции, которые могут использоваться для сокращения времени, которое инспекторы затрачивают на процедуры просмотра. В число этих функций входят проверка аутентификации изображений и данных, расшифровка изображений и данных, обнаружение изменений в кадре записанных изображений, цифровое усиление изображения и режимы показа изображений с нескольких камер.

### 4.1.7. Разные системы наблюдения и варианты

В дополнение к системам, описанным выше, разрабатываются и проходят оценку новые системы наблюдения и оборудование, повышающее потенциальные возможности существующих устройств, применяемых для целей наблюдения. В таблице VIII перечислены эти системы.

## 4.2. ПЕЧАТИ

Печати, иногда называемые устройствами индикации вмешательства, используются для обеспечения сохранности материалов, документов или любых других важных предметов в защитной системе, устойчивой к попыткам проникновения извне. Назначение печатей состоит в том, чтобы обеспечивать свидетельство любой несанкционированной попытки получить доступ к контролируемому материалу. Печати также представляют собой средство уникальной идентификации контролируемых контейнеров. В зависимости от конкретного типа применения отделы операций используют несколько печатей, как показано в таблице IX. Необходимо отметить, однако, что печати не обеспечивают никакой физической защиты, и конструктивно они не предназначались для обеспечения такой защиты.

### 4.2.1. Одноразовые печати

**CAPS.** Металлическая печать широко применяется для опечатывания контейнеров для материала, шкафов с материалом и оборудования для целей гарантий МАГАТЭ. Обычно каждый год проверяется 20 000 таких металлических печатей. Печать снимается на месте и доставляется в

ТАБЛИЦА VIII. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Код	Наименование оборудования	Описание и область применения
FAST	Система наблюдения компании “FAST”	Многокамерная цифровая система наблюдения, разработанная Евратомом для совместного применения. В стадии оценки.
LRFO	Блок лазерного дальномера	Блок крепления камер на основе модуля DCM14 для противодействия вмешательству перед объективом. В стадии разработки.
VMOS	Система VACOSS-S/MOSS	Модуль, который позволяет интегрировать многокамерную систему наблюдения MOSS с дистанционно проверяемой печатью VACOSS. Применение прекращается вместе с MOSS.
WCSS	Сенсорная система контроля целостности стен	Обнаружение проникновения через стены для запуска записи изображений в целях наблюдения. В стадии оценки.

Центральные учреждения МАГАТЭ для идентификации. Главные достоинства CAPS состоят в том, что это – простое и недорогое устройство, которое легко устанавливается или снимается инспектором. Оперативность установки и снятия печати важна с точки зрения ограничения радиационного облучения инспектора. Однозначная идентификация каждой печати достигается путем визуализации случайных царапин на внутренней поверхности металлического колпачка и сопоставления изображений, записанных при установке и удалении печати (рис. 32).

**VOID.** Усовершенствованная адгезивная печать изготавливается из специального материала, который не может быть отделен от места установки без разрушения. Происходит разрыв печати вдоль специально выполненных в ее материале разрезов таким образом, который исключает возможность повторной установки печати. В отношении всех адгезивных печатей следует сказать, что печать такого типа предназначена исключительно для временного применения (максимум на 24 часа).



Рис. 32. Сравнение изображений металлической печати для подтверждения ее целостности.

#### 4.2.2. Проверяемые на месте печати

Проверяемые на месте печати – это печати, которые являются однозначно идентифицируемыми и проверяются на месте. Они подразделяются на три главных категории: оптоволоконные, ультразвуковые и электронные.

**FBOS.** В оптоволоконной универсальной печати проволока, используемая в металлических печатях CAPS, заменена многожильной пластиковой оптоволоконной петлей, концы которой заделываются в печати таким образом, чтобы образовывался уникальный случайный рисунок волокон. Он может быть проверен путем фокусирования светового луча на концах петли и просмотра увеличенного рисунка концов волокон, полученного фотографически или посредством цифровой записи изображения. Эта технология используется в системе печати COBRA II (FBOS). Сразу после установки печать вставляется в блок проверки, который регистрирует исходное изображение сигнатурного рисунка печати. Верификатор состоит из головки верификатора, неподвижной

ТАБЛИЦА IX. СИСТЕМЫ ОПЕЧАТЫВАНИЯ

Код	Наименование оборудования	Описание и область применения
<i>Одноразовые печати</i>		
CAPS	Металлическая печать	Колпачковые печати, применяемые к широкому диапазону систем сохранения для обеспечения непрерывности информации о содержании. Проверяются в Центральных учреждениях МАГАТЭ после снятия с объекта.
	Усовершенствованная адгезивная печать	Коммерчески доступная печатающая лента, которая не может быть удалена без разрушения печати.
<i>Проверяемые на месте печати</i>		
ACIV	Автоматический верификатор изображения печатей COBRA	Автоматический верификатор, применяемый для проверки печатей COBRA.
FBOS	Оптоволоконная универсальная печать (COBRA)	Проверяемая на месте оптоволоконная печать.
ULCS	Ультразвуковая печать (ARC)	Печать, используемая для подводного печатавания групп тепловыделяющих сборок. В ней используется случайная спираль, которая обеспечивает уникальную сигнатуру печати. Автоматизированное считывающее устройство сравнивает сигнатуру с хранящимися параметрами печати на месте.
USSB	Ультразвуковой печатающий болт	Универсальная болтовая печать, используемая главным образом для печатавания под водой крышек контейнеров для сборок отработавшего топлива.
VCOS	Электронная печать VACOSS-S (Система печатей с переменной кодировкой)	Печать многократного использования, состоящая из оптоволоконной петли и собственно электронной печати. Для контроля петли применяются световые импульсы, и каждое открытие и закрытие печати регистрируется в печати. Карманный компьютер считывает данные печати.
VMOS	Система VACOSS-S/MOSS	Автономная система, которая регистрирует закрытие (или открытие) электронных печатей VACOSS посредством специально адаптированной для этого системы MOSS.



Рис. 33. ACIV: автоматический верификатор изображения для печатей COBRA и печать COBRA.

видеокамеры и жидкокристаллического монитора. Головка верификатора удерживает корпус печати COBRA в момент, когда изображение сигнатуры печати регистрируется видеокамерой. Затем изображение может быть распечатано и сопоставлено с исходным изображением этой же печати.

Недавно был разработан намного более удобный с точки зрения логики верификатор печатей COBRA, который хранит цифровые изображения и может сравнивать изображения. Эта процедура дает возможность инспектору автоматически проверять идентичность и целостность печати на месте и удобно хранить изображения в компьютере. На рис. 33 показан автоматический верификатор изображений для печатей COBRA (ACIV) и печать COBRA.

**ULCS, USSB.** Ультразвуковая печать (ULCS) и ультразвуковой опечатавающий болт (USSB) сконструированы так, что они содержат уникальный случайный рисунок, например, включение металлических частиц в более легкую подложку или ориентированную случайным образом проволочную спираль. Они применяются по-разному, при этом для разных применений существуют специальные конструкции. Проверка выполняется путем передачи ультразвуковых импульсов через печать с соответствующим преобразователем и визуального изучения уникальной картины отражений. Проверка заключается в сопоставлении рисунка, полученного при установке, с конфигурациями, полученными во время последующих проверок на месте. Печати этих типов особенно эффективны в случае подводных применений, таких, как контроль групп тепловыделяющих сборок CANDU (ULCS) или применения болтов для закрытия контейнеров для перевозки и хранения сборок с отработавшим топливом LWR (USSB).

**VCOS.** Электронные печати будут все чаще и чаще использоваться МАГАТЭ ввиду того, что дистанционный мониторинг находит более универсальное применение и изготовление печатей становится менее



*Рис. 34. Электронная печать VACOSS-S с оптоволоконной петлей, блок интерфейса и карманный компьютер.*

дорогостоящим. Первой электронной печатью МАГАТЭ, разработанной в конце 1970-х годов, была печать с переменной кодировкой (VACOSS-S), показанная на рис. 34. В этой печати используются электронные методы кодирования в сочетании с оптоволоконными петлями. Электронная печать VACOSS-S предназначена для высоконадежного, длительного наблюдения в применениях, которые требуют периодического доступа. Время, дата и продолжительность открытия и закрытия петли регистрируются в самой печати для последующего извлечения записанных данных. Оптоволоконная петля опрашивается посредством световых импульсов каждые 250 мс для обеспечения непрерывности светового пути. Известного метода сращивания волокон в интервале между опросами не существует. Внутренние батареи имеют двухлетний срок службы. В случае установок со множеством печатей, размещаемых вблизи друг от друга, печати можно соединять последовательно. Данные всех печатей, соединенных таким образом, могут считываться последовательно без изменения соединений. Электронные схемы герметизированы стойким к воздействию рентгеновского излучения компаундом, состоящим из эпоксидной смолы и керамических частиц, для исключения любой возможной попытки разборки конструкции. Устройство индикации вмешательства позволяет обнаруживать любое вскрытие корпуса печати. Корпус печати открывается только для замены внутренних батарей, и такие операции регистрируются как события вмешательства.

## 5. АВТОНОМНЫЙ МОНИТОРИНГ

Системы автономного мониторинга (САМ) работают 24 часа в сутки, 365 дней в году, непрерывно контролируя деятельность на целом ряде ядерных установок. Каждая система имеет резервные датчики и устройства хранения данных, а также резервное электропитание на случай кратковременного прекращения подачи электроэнергии. Системы сконструированы так, чтобы обеспечивать сохранение непрерывности информации экономически эффективным путем, сокращая дорогостоящие инспекционные усилия МАГАТЭ за счет уменьшения числа рабочих дней инспекторов в полевых условиях. Поскольку количество ядерных установок во всем мире продолжает расти, использование автономных систем с целью сокращения объема инспекционной деятельности на местах приобретает все более важное значение. В имеющихся системах автономного мониторинга используются прежде всего детекторы излучения, определяющие поток ядерного материала через ключевые точки в зонах технологического процесса на установке. Однако набор датчиков также включает устройства, способные измерять температуру, потоки, вибрацию и электромагнитные поля. На сложных ядерных установках, работающих в автоматизированном режиме (с дистанционным управлением), методы автономного анализа и мониторинга представляют собой неотъемлемую часть подхода к осуществлению гарантий.

Автономное использование требует, чтобы при конструировании приборов были учтены особые соображения, если система должна быть надежной и экономически эффективной и обеспечивать получение надежных, независимых данных. Это означает, что система должна работать без потери связанных с гарантиями данных в течение длительных периодов времени, включая время, когда прекращается подача электроэнергии на установку. Система должна периодически регистрировать свой статус в автоматическом режиме. Если данные необходимо отправлять по незащищенным каналам передачи данных, то эти данные должны аутентифицироваться и шифроваться. Если данные должны передаваться за пределы площадки (дистанционный мониторинг), то в этом случае они должны шифроваться с целью удовлетворения требований, действующих на установке, и требований государства в отношении обеспечения конфиденциальности информации, а также требований МАГАТЭ по физической безопасности данных. Ввиду строгих требований, предъявляемых к конструкции, оборудование для автономного и дистанционного мониторинга в целом должно быть гибким в использовании, иметь модульную конфигурацию и характеризоваться высокой надежностью.



При подготовке к монтажу на местах все системы тщательно проверяются в Лаборатории поддержки оборудования для целей гарантий МАГАТЭ в Вене с использованием моделируемых сигналов. При этом применяется испытательный период продолжительностью как минимум 90 суток, который соответствует действующему в настоящее время периоду автономной работы в промежутке между посещениями инспекторов. При проведении таких испытаний могут быть устранены ранние отказы компонентов, ошибки в конфигурации и производственные дефекты в условиях, когда на стадии испытаний в Вене имеется легкий доступ к системе и ее элементам. После того, как система успешно проработает в течение всего инспекционного периода или приблизительно 90 суток без отказов, она считается готовой к монтажу на месте.

Автономные приборы для целей гарантий часто монтируются в зонах установки с ограниченным доступом персонала, таких, как зоны с высоким уровнем излучения. В зависимости от типа установки и процесса, поставленных под гарантии, возможность оптимального использования соответствующих приборов, даже тех приборов, которые требуют индивидуального конструирования, более чем оправдывает высокую начальную стоимость, если рассматривать общие технико-экономические показатели в долгосрочном плане. Тем не менее МАГАТЭ уделяет особое внимание стандартизации всех видов оборудования и систем, когда это представляется возможным, в целях обеспечения максимальной эффективности использования своих ограниченных ресурсов. Во всех случаях, когда это возможно, исключаются индивидуальные проекты и дублирование функций в используемом оборудовании.

Будущее развитие САМ будет заключаться в разработке полностью интегрированных систем, в которых реализуется прямая интеграция систем наблюдения с локальными сетями с целью создания центрального компьютера сбора данных серверного типа. Это – следующий логический шаг в обеспечении экономически наиболее эффективного подхода к сбору соответствующих данных по гарантиям. Такая система будет использовать датчики типа САМ для включения камер. Таким образом, объем видеоданных значительно сокращается и сводится к записи соответствующих событий, и возможности инспекторов по просмотру изображений повышаются. Такая система уже используется в реакторном комплексе с БН-350 в Казахстане. Обновленный интегрированный вариант системы в настоящее время проходит проверку в Лаборатории поддержки оборудования для целей гарантий, и эту систему планируется смонтировать в ближайшее время на установке по кондиционированию отработавшего топлива в Чернобыле. Элементы этих систем включают интеллектуальную локальную рабочую сеть (iLON), которая связывает между собой все устройства САМ, цифровые камеры и компьютер





*Рис. 35. Проверка системы мониторинга установки для кондиционирования РАО Чернобыльской АЭС, проводимая в Лаборатории поддержки оборудования для целей гарантий.*

сбора данных. Сеть iLON управляет функциями запуска, временной синхронизации, локальной аутентификации и включения. Программа многоприборного сбора данных (MIC) применяется для опроса всех устройств САМ с целью сбора данных на одном компьютере сбора данных с использованием iLON. После извлечения данных инспектором для их изучения применяется устройство просмотра радиационных сигналов (RAD Review). Устройство RAD Review способно обеспечивать просмотр радиационных сигналов, полученных от системы. Обычный набор предусмотренных в нем средств включает алгоритмы подсчета пиков на основе разных пороговых значений параметров в условиях различных ожидаемых фоновых уровней и режимов поиска пиков. Вариант системы для реактора БН-350 содержит новое средство интеграции, при использовании которого изображения цифровых камер также входят в состав базы данных. При просмотре пиков датчиков инспектор может простым 'щелчком' выбрать представляющий интерес пик, и на экране появляется соответствующее изображение, полученное от камеры. Благодаря этому в распоряжение поступил мощный инструмент просмотра,

объединяющий две ранее отдельно существовавших функции просмотра, что позволяет инспекторам МАГАТЭ применять наиболее эффективный с экономической точки зрения метод просмотра для выработки требующихся выводов в связи с осуществлением гарантий.

Подводя итоги, можно сказать, что главными преимуществами применения автономных методов проверки являются:

- (a) повышение эффективности гарантий благодаря осуществлению непрерывного контроля;
- (b) снижение объема инспекционной деятельности;
- (c) сокращение радиационного облучения инспекторов и персонала на установке;
- (d) снижение уровня вмешательства в эксплуатацию ядерных установок.

Используемые системы автономного мониторинга перечислены в таблице X.

**АТРМ.** Усовершенствованная система термогидравлического мониторинга мощности используется для контроля мощности, развиваемой исследовательским реактором, и может обеспечивать проверку того, что эта мощность соответствует уровню, заявленному оператором. Эта система контролирует температуру и расход воды в первом контуре теплоносителя реактора. Поскольку в исследовательских реакторах могут изменяться компоновка активной зоны и соответственно уровни излучения, эта система обеспечивает метод проверки, который является независимым от радиационной сигнатуры. В целях обеспечения необходимой отказоустойчивости все датчики устанавливаются как дублированные независимые датчики (температуры и расхода), сигналы которых независимо поступают в основной блок, где они сравниваются.

Это затрудняет фальсифицирование сигнала и обеспечивает надежность системы, которая продолжает выдавать требующиеся инспекционные данные даже с множественными единичными отказами компонентов. Использование корпусов с сигнализацией о вмешательстве и снабженных устройствами индикации вмешательства каналов для разводки сигнальных кабелей, а также высокая частота выборки сигналов от датчиков затрудняют передачу ложного сигнала в блок сбора данных.

**UFFM.** Автономный монитор потока топлива состоит из отдельных детекторов нейтронного и гамма-излучения, стационарно смонтированных в реакторной установке. Эти детекторы монтируются парами, что позволяет обеспечивать необходимую отказоустойчивость с тем, чтобы исключить потерю важных данных по гарантиям. Детекторы контролируют перемещения сборок

ТАБЛИЦА X. СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО И ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Код	Наименование оборудования	Описание и область применения
<i>Автономные системы мониторинга</i>		
ATPM	Усовершенствованный термогидравлический монитор мощности	Система мониторинга, которая подсчитывает мощность исследовательских реакторов путем измерения расхода и разности температур теплоносителя первого контура.
CONS	Система проверки входных потоков	Система радиационного мониторинга, которая отслеживает перемещения облученного топлива на крупномасштабном заводе по переработке топлива (CONSULHA).
ENGM	Монитор въездных ворот	Система радиационного мониторинга, контролирующая необлученные топливные сборки, содержащие Pu, которые введены в реакторную установку.
REPM	Монитор мощности реактора	Система нейтронного мониторинга, помещенная вне биологической защиты реактора для контроля уровня мощности реактора.
UFFM	Автономный монитор потока топлива	Универсальная система радиационного мониторинга, которая контролирует поток свежего и облученного топлива в реакторной установке. Размещение и характеристики детекторов излучения зависят от конкретной установки.
VIFB	Счетчик отработавших топливных сборок реактора CANDU	Система радиационного мониторинга, которая считает облученные тепловыделяющие сборки, когда они выгружаются в бассейн для хранения отработавшего топлива энергетического реактора с перегрузкой на мощности.
VIFC	Монитор выгрузки топлива из активной зоны реактора CANDU	Система радиационного мониторинга, которая контролирует выгрузку сборок отработавшего топлива из активной зоны энергетического реактора с перегрузкой на мощности (реактор может быть на мощности или остановлен).



*Рис. 36. Усовершенствованная система термодинамического мониторинга мощности.*

свежего топлива к реактору (в случае реакторов, использующих МОХ — смешанное оксидное топливо, которое содержит плутоний, как, например, реакторы-размножители и легководные реакторы LWR, работающие на цикле с МОХ-топливом), сборок с отработавшим топливом от реактора к бассейну хранения топлива и сборок с отработавшим топливом из бассейна хранения. Регистрация нейтронного излучения в мониторах UFFM зависит от экранирования интенсивного гамма-излучения отработавшего топлива, предусматриваемого для детекторов нейтронов. Герметизированные детекторные системы могут прикрепляться к массивным транспортным средствам или к стене бассейна хранения около подводного входа. Одновременное использование нейтронных и гамма-детекторов также чрезвычайно затрудняют замену сигнала злоумышленником.

Типичная последовательность действий в случае использования нескольких мониторов UFFM может включать перемещение сборки свежего топлива в активную зону реактора и извлечение сборки отработавшего топлива и ее доставку в бассейн хранения. Комбинация сигнатур нейтронного и гамма-

излучения последовательных систем характеризует перемещаемый материал как свежее топливо, отработавшее топливо или другой материал (например, облученный нейтронами материал зоны воспроизводства реактора-размножителя). Как правило, системы предназначаются для конкретных установок, однако на транспортных средствах используются типовые детекторы нейтронов - обычно  $^3\text{He}$ -пропорциональные счетчики или камеры деления и детекторы гамма-излучения - обычно NaI-сцинтилляторы или ионизационные камеры. Под водой в бассейне хранения в качестве детектора нейтронов обычно применяется газонаполненный пропорциональный счетчик с покрытием В-10, и в качестве детектора гамма-излучения - газонаполненная ионизационная камера. Мониторы UFFM предназначены для непрерывного контроля счета нейтронов и гамма-счета, однако хранят только данные, которые значительно превышают фоновые уровни. МАГАТЭ проводит модернизацию всех генераторов данных, которые осуществляют сбор данных, с применением сменной флэш-памяти, способной хранить объем данных, накопленный как минимум за 100 дней. Это соответствует применяемому в настоящее время инспекционному периоду и обеспечивает необходимую отказоустойчивость в случае выхода из строя компьютера. Камеры наблюдения обычно дополняют мониторы UFFM по маршруту перемещения топлива.

**ENGM.** На реакторных установках с плутониевым топливом, на которых устанавливается монитор UFFM, применяется монитор въездных ворот (ENGM). Это - стационарно установленный пассивный детектор нейтронных совпадений воротникового типа (PNCL). Сборки свежего топлива, поступающие на реакторную установку, должны проходить через монитор ENGM таким образом, чтобы можно было проверить содержание Pu в них. Следовательно, монитор ENGM является системой, которая проверяет количество свежего делящегося топлива в сборке и служит в качестве первого детектора в последовательности детекторных систем, которые отслеживают перемещение топливныхборок в пределах реакторной установки.

**VIFB.** Счетчик отработавших топливныхборок реактора CANDU (рис. 37) представляет собой автономную систему, которая контролирует ключевое место на пути следования сборки отработавшего топлива энергетического реактора с перегрузкой на мощности. Коллимированные детекторы гамма-излучения контролируют тепловыделяющую сборку по мере ее перемещения по своему пути. Надлежащее размещение детекторов и использование соответствующего алгоритма для конкретной установки позволяют этому устройству производить счетборок в момент их прохождения мимо него и регистрировать направление, в котором они перемещаются даже в случае, когда две сборки движутся вместе, что обычно имеет место на практике.

Высокая надежность в работе, повышенная динамическая чувствительность обнаружения (охватывающая все эксплуатационные



*Рис. 37. VIFB: счетчик отработавших топливных сборок реактора CANDU.*

возможности) и нечувствительность к прекращению подачи электроэнергии – вот некоторые из важных характеристик счетчика топливных сборок. С целью компенсации отказов отдельных компонентов и исключения нарушений в работе оборудования предусматривается резервирование в достаточном объеме.

**VIFC.** Монитор выгрузки топлива из активной зоны реактора CANDU является типичной системой автономного мониторинга, работающей в недоступной зоне. Монитор VIFC используется для обнаружения облученного топлива после его выгрузки из активной зоны реактора CANDU.

Непрерывно контролируются как интенсивность нейтронов (нормальный сигнал выгрузки на мощности), так и интенсивность гамма-излучения. Инспектор после изучения данных может прямым путем и однозначно определять резкие и вместе с тем характерные изменения в скорости счета,

связанные с выгрузкой тепловыделяющих сборок. Такой метод анализа может применяться для контроля выгрузки облученного топлива, когда реактор работает на мощности и когда он остановлен. По линейному увеличению фонового сигнала система может также отслеживать уровень эксплуатационной мощности реактора.

Монитор VIFC имеет отказоустойчивую конструкцию. С целью компенсации отказов отдельных компонентов и исключения нарушений в работе оборудования предусматривается резервирование в достаточном объеме (в случае отказа монитора VIFC ситуация чрезвычайно трудно поддается восстановлению с точки зрения гарантий). Детекторные модули конструируются так, чтобы они сохраняли работоспособность на протяжении всего жизненного цикла реактора, поскольку их места нахождения в зоне сохранения ограничивают возможности технического обслуживания и ремонта. В конструкции монитора VIFC предусмотрен автоматический контроль работы и отказов.



## 6. СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Дистанционный мониторинг в контексте гарантий в целом предусматривает передачу данных за пределы площадки в Центральные учреждения МАГАТЭ или в региональное бюро МАГАТЭ. Эффективность затрат является главным фактором, который учитывается при принятии решения относительно применения этого метода в случае систем наблюдения, электронных печатей и других автономных систем. Когда обеспечивается возможность пересылки данных инспектору, частоту посещений установки для инспекционных целей можно сократить, экономя таким образом время и денежные средства. В принципе система дистанционного мониторинга с функцией информирования о 'работоспособности' также может функционировать значительно надежнее, чем автономная система, техническое обслуживание которой проводится через установленные интервалы времени. Некоторые события, которые в конечном счете могут привести к отказам системы, можно дистанционно оценивать, и сообщения о них могут быть своевременно переданы по соответствующему адресу для принятия соответствующих мер. Ограниченные кадровые ресурсы МАГАТЭ, растущие объемы ядерного материала и экономические факторы, вероятно, будут обуславливать ускорение в ближайшем будущем темпов внедрения методов дистанционного мониторинга.

МАГАТЭ в течение более чем двух десятилетий исследовало использование дистанционного мониторинга (ДМ) в качестве дополнительного инструмента гарантий. В октябре 1996 года Департамент гарантий МАГАТЭ приступил к осуществлению своего проекта по дистанционному мониторингу (ПДМ). Его главными целями являлись определение и развитие инфраструктуры дистанционного мониторинга и ее реализация с использованием имеющихся технологий. В частности, ПДМ позволил разработать политику осуществления гарантий применительно к дистанционному мониторингу, определить подходы и процедуры для легководных реакторов (LWR), хранилищ и реакторов с перегрузкой на мощности, конкретизировать основное оборудование для ДМ, провести полевые испытания, выполнить анализ затрат и результатов для двух стран и разработать план Департамента гарантий по осуществлению ДМ. После завершения проекта в декабре 1998 года Департамент гарантий одобрил план, который позволил перейти к этапу осуществления ДМ, при этом соответствующие обязанности были распределены между Отделами операций и поддержки.

По состоянию на июнь 2002 года МАГАТЭ использовало 54 цифровых системы наблюдения с ДМ, которые установлены в разных странах мира.



Тридцать три из этих систем снабжены 71 камерой, работающей в режиме ДМ. В дополнение к уже развернутым системам в настоящее время проводится дальнейшая работа по обеспечению дополнительных функций контроля с тем, чтобы ДМ можно было распространить на другие типы оборудования.

### 6.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

В основе оборудования МАГАТЭ для ДМ применяются системы, которые могут интегрироваться с сервером на базе операционной системы Microsoft Windows NT. В настоящее время только компоненты систем С/Н достигли достаточного уровня разработки для того, чтобы после получения официального разрешения их можно было использовать для инспекционных целей. При этом в стадии разработки и оценки находятся другие системы автономного мониторинга, которые расширят функциональные возможности и дополнят основные устройства, применяемые для С/Н, что позволит использовать дистанционный мониторинг на более сложных установках.

Разработка модуля цифровой камеры DCM14 – это важный рубеж, достигнутый в реализации концепции ДМ. Модуль DCM14 стал для МАГАТЭ единым устройством, способным оцифровывать выходной сигнал стандартной видеокамеры, преобразовывать аналоговый видеосигнал в цифровые изображения, которые при необходимости могут далее подвергаться сжатию, аутентификации и шифрованию. Это устройство также обеспечило возможность хранения изображений и данных о состоянии на внутренних сменных носителях и передачи этих изображений и данных на внешнее устройство сбора данных.

Центральный контроллер сбора данных и связи МАГАТЭ, предназначенный для полевого использования – это цифровая оптическая система наблюдения на базе сервера (SDIS). Кроме обеспечения связи цифровых камер с печатями VACOSS сервер SDIS также обеспечивает возможность шифрования данных и поддержания связи с учреждениями МАГАТЭ по различным каналам связи, включая PSTN, ISDN и спутниковую связь. Планируется также, что сервер SDIS будет соединен через Ethernet с другими САМ для передачи зашифрованных данных. В дополнение к серверу SDIS в настоящее время МАГАТЭ испытывает цифровую многокамерную оптическую систему наблюдения для дистанционного мониторинга в случаях, когда требуется сравнительно большое количество камер.

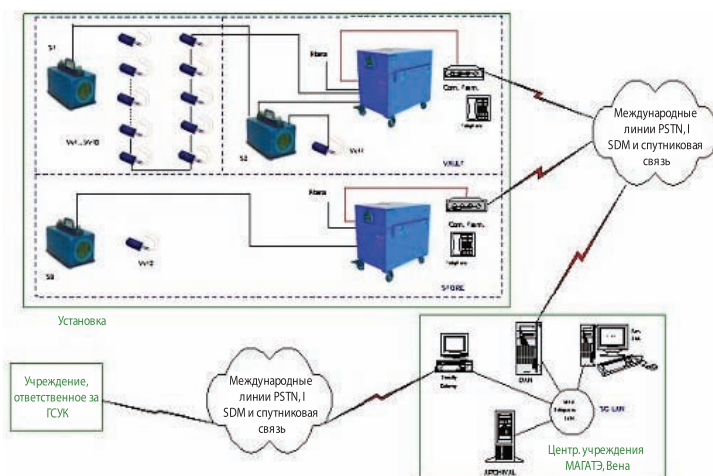


Рис. 38. Схемное решение дистанционного мониторинга.

## 6.2. БУДУЩИЕ ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИЕ РАБОТЫ

Из анализов, проведенных к настоящему времени, ясно, что расходы на осуществление ДМ зависят от типа установки, используемой системы мониторинга, а также стоимости связи в стране и ее ядерного топливного цикла. Кроме того, в случае интегрированных гарантий применение ДМ может не представляться оправданным в случае реакторов LWR в странах, в которых Дополнительный протокол уже действует или, как ожидается, вступит в силу в ближайшем будущем. Поэтому было решено, что все предложения о включении ДМ в инспекционную деятельность до их одобрения будут оцениваться посредством анализа затрат и результатов. К настоящему времени отделы операций представили предложения в отношении соответствующих установок еще в 10 странах. Эти предложения будут тщательно изучены на основе анализа затрат и результатов.

Сейчас в сфере гарантий поставлена задача добиться дальнейшего сокращения затрат на осуществление ДМ. Уже определены области, в которых, согласно предложениям, может быть достигнута значительная экономия на издержках. Ниже приведены соответствующие примеры.

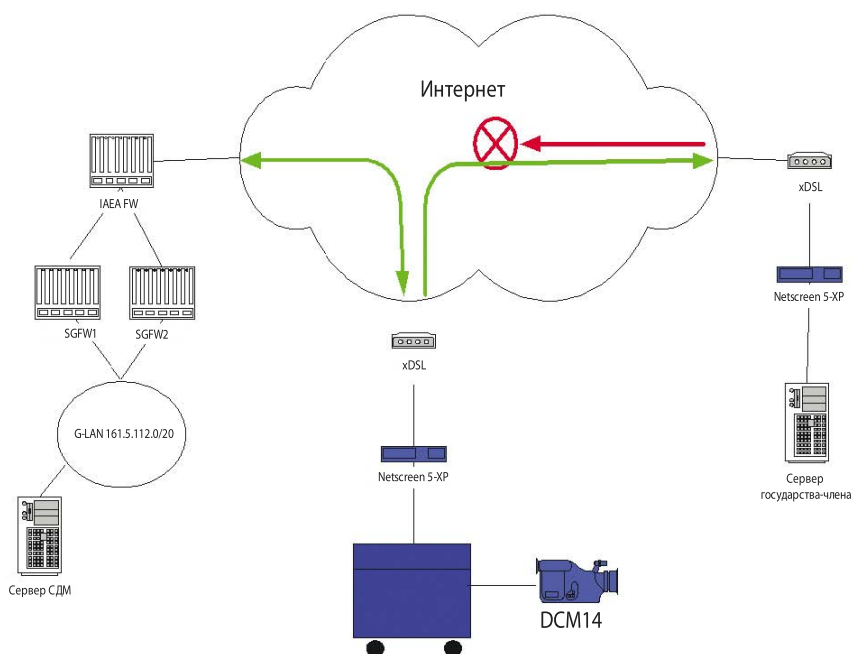


Рис. 39. Дистанционный мониторинг по В4С.

### 6.2.1. Сокращение объема данных

В настоящее время сбор всех изображений и данных осуществляется на площадке, и затем они передаются в учреждения МАГАТЭ. При правильном выборе интервала съемки инспекторы с высокой степенью уверенности могут полагаться на то, что деятельность, значимая с точки зрения гарантий, полностью фиксируется, однако из-за большого количества получаемых изображений осуществляется передача чрезмерно объёмных файлов данных. Это приводит к высоким затратам на связь, и при этом большая доля передаваемых изображений содержит кадры, совершенно не значимые с точки зрения гарантий или являющиеся избыточными.

Используя методы, позволяющие получать изображения только в случае, когда происходят изменения, или в случае, когда соответствующее событие включает наблюдение, можно сократить объем передаваемых избыточных и несвязанных с гарантиями данных. Согласно исследованиям, ранее проведенным МАГАТЭ, использование техники обнаружения изменений в кадре на основе записи результатов через фиксированные интервалы времени (SCD) позволит обеспечить сокращение на 90% количества избыточных кадров

и кадров, совершенно не значимых с точки зрения гарантий. Все системы с модулем DCM14 могут работать в режиме SCD. МАГАТЭ в настоящее время накапливает практический опыт применительно к установкам различных типов с тем, чтобы можно было с высокой степенью уверенности принять такие методы для полномасштабного применения.

### 6.2.2. Альтернативные методы связи

В настоящее время МАГАТЭ использует PSTN, ISDN, ретрансляцию кадров и INMARSAT для обеспечения связи отдаленных площадок с коммуникационными концентраторами или непосредственно с учреждениями МАГАТЭ. Высокие расходы обусловлены использованием обычной телефонной связи, сетей и спутниковой связи. В случаях, когда это возможно, Интернет предоставляет сравнительно недорогие услуги по передаче данных. Устанавливая виртуальную частную сеть (ВЧС) с использованием поставщика услуг Интернета в качестве компании, предоставляющей услуги связи, МАГАТЭ, вероятно, сможет воспользоваться экономией от масштаба, которую обеспечивают эти недавно появившиеся альтернативные методы связи. Виртуальные частные сети позволят найти реальные решения проблем, связанных с обеспечением безопасности. Согласно некоторым коммерческим оценкам типичных условий, экономию может составить 20-40% по сравнению со стоимостью арендуемого канала и 60-80% по сравнению с затратами на услуги автоматической телефонной связи.

## 7. БЕЗОПАСНОСТЬ ДАННЫХ

Обеспечение безопасности данных является важным элементом реализации систем автономного и дистанционного мониторинга. Фактически в системах гарантий, стационарно размещаемых на установках и периодически посещаемых инспекторами, передача данных между различными элементами системы и между самими системами и Центральными учреждениями МАГАТЭ осуществляется по незащищенным каналам передачи данных. Данные необходимо криптографически аутентифицировать, с тем чтобы гарантировать их подлинность, и, возможно, шифровать в целях предотвращения их раскрытия в хост-узле или обеспечения конфиденциальности для государств-членов.

Требования в отношении безопасности определяются в соответствии с целью обеспечения безопасности и с учетом вида необходимых сервисов безопасности и требующейся мощности этих сервисов. В таблице XI приведен перечень сервисов безопасности.

В этом перечне ‘аутентификационный сервис безопасности’ выделен в качестве отдельной функции, хотя в других случаях она нередко используется в качестве вспомогательной функции обеспечения безопасности. Например, конфиденциальность нельзя гарантировать даже при шифровании данных, если идентичность получателя вызывает сомнение (т.е. если отправитель не уверен, что получатель имеет право расшифровывать данные). Аналогичным образом защита целостности теряет свою ценность в случае сомнительной идентичности автора.

### 7.1. ТРЕБОВАНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Для упрощения архитектуры физической безопасности и, в частности, обеспечения возможности использования ограниченного набора ‘уровней устойчивости’ в криптографических подходах каждый вид информации оценивается с точки зрения отрезка времени, в течение которого без ущерба должны выполняться требования по обеспечению ее безопасности. Это наряду с уровнем угрозы определяет интенсивность (устойчивость) подхода и выбранных алгоритмов.

Информация по гарантиям, используемая в системах автономного и дистанционного мониторинга, может быть описана с применением общей информационной модели, показанной на рис. 40, данные о которой представлены в таблице XII. Эта модель основывается на Документе по политике МАГАТЭ при использовании дистанционного мониторинга<sup>1</sup> и

---

<sup>1</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Remote Monitoring for Safeguarding Nuclear Facilities, Safeguards Policy Series No. 16, IAEA, Vienna (1998).

дополнена 'данными управления'. Данные в модели подразделяются на основе их предполагаемого использования следующим образом:

ТАБЛИЦА XI. СЕРВИСЫ БЕЗОПАСНОСТИ\*

Сервис безопасности	Обеспечиваемые функции	Механизм достижения
Конфиденциальность (включая анализ потоков трафика и разделение данных)	Сохранение конфиденциального характера информации	Информация шифруется. Данные дополняются заполнителями с целью предотвращения анализа потоков трафика. Барьеры (например, брандмауэры) предотвращают незаконные потоки данных (например, появление скрытого канала). Обеспечение конфиденциальности требует аутентификации получателя(ей).
Целостность (включая защиту от воспроизведения/ замещения данных)	Невозможность изменения информации и представления копии предыдущих данных	'Сигнатура' данных позволяет выявлять изменения. Применение счетчиков/ временных интервалов предотвращает воспроизведение данных. Обеспечение целостности требует аутентификации происхождения.
Контроль доступа	Возможность получения доступа к ресурсу только для аутентичного пользователя, имеющего достаточные полномочия	Пользователи подтверждают свою идентичность и полномочия с использованием доверенных средств.
Невозможность отказа от авторства	Невозможность последующего отрицания действий пользователями ('утверждение')	Пользователь включает в файл информацию (подпись или сигнатуру), которую может создать только он. Невозможность отказа от авторства означает аутентификацию пользователя. Могут требоваться отметки времени.
Аутентификация	Проверка того, что пользователь является тем, кем себя заявляет	Пользователи подтверждают свою идентичность, применяя доверенные аутентификационные средства (пароль, обладание уникальным объектом, биометрия).
-----		

## БЕЗОПАСНОСТЬ ДАННЫХ

ТАБЛИЦА XI. СЕРВИСЫ БЕЗОПАСНОСТИ\* (продолж.)

Сервис безопасности	Обеспечиваемые функции	Механизм достижения
Готовность (включая обнаружение проникновения, сопротивление атакам)	Обеспечение работоспособности системы, невозможность создания помех работе несанкционированными действиями	Системы иммунизированы против атак (например, используются брандмауэры), соответствующие механизмы посылают сообщения об атаках агенту реагирования. Предотвращение атак с целью вызвать отказ в обслуживании.
Аудит	Функционирование учета всех значительных событий	Производятся записи (контрольные сообщения) в случае возникновения значительных событий. Необходимо обеспечивать целостность и гарантированную доставку всех сообщений.
Гарантии	Наличие всех требующихся функций в развернутом оборудовании	Проектные решения и их исполнение тщательно проверяются.

\* Составлено с использованием стандарта "Взаимодействие открытых систем (ВОС) – основы безопасности", Технических основ защиты информации (IATF) и Общих критериев (СС).

ТАБЛИЦА XII. ВИДЫ ДАННЫХ АВТОНОМНОГО И ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Вид данных	Образцы данных	Использование данных	Частота использования
Данные проверки	Изображения, передаваемые камерой, состояние печати, заявление оператора	Используются в рассмотрениях для целей гарантий. Для составления выводов об осуществлении гарантий на установке можно использовать только 'данные проверки'.	Интервал времени между рассмотрениями для целей гарантий зависит от договоренностей, достигнутых с установкой, и варьируется в диапазоне от одного до шести месяцев.

## МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ГАРАНТИЙ

ТАБЛИЦА XII. ВИДЫ ДАННЫХ АВТОНОМНОГО И ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА (продолж.)

Вид данных	Образцы данных	Использование данных	Частота использования
Технические данные, включая сводки и данные о работоспособности	Номер включенной записи, уровня зарядки батареи, индикация вмешательства, температура оборудования, индикация отказа, данные журнала аудита	Используются в технических рассмотрениях для: 1) планирования инспекционной деятельности 2) обслуживания и ремонта оборудования или другой последующей деятельности.	Применительно к системам дистанционного мониторинга технические рассмотрения проводятся ежедневно, но в отдельных случаях их проведение может задерживаться максимально до трех рабочих дней. В случае других систем технические рассмотрения проводятся во время посещения площадки или вскоре после этого.
Данные управления	Установленное время дня, установленный интервал выборки, управление диагностикой, данные управления ключами	Используются для управления: 1) программами применения гарантий, 2) инспекторами МАГАТЭ и техническим персоналом	Онлайн-операции в режиме реального времени (в процессе работы).

- (a) данные проверки используются во время рассмотрений для целей гарантий, выполняемых назначенными инспекторами МАГАТЭ,
- (b) технические данные используются во время технических рассмотрений, выполняемых назначенными техническими сотрудниками МАГАТЭ,
- (c) данные управления используются для управления оборудованием 'в режиме реального времени', осуществляемого автоматизированными программами применения гарантий или вручную во время проведения инспекций или выполнения работ по техническому обслуживанию.

Некоторые технические данные - в зависимости от конструктивного решения системы наблюдения - могут также включаться в 'данные проверки',



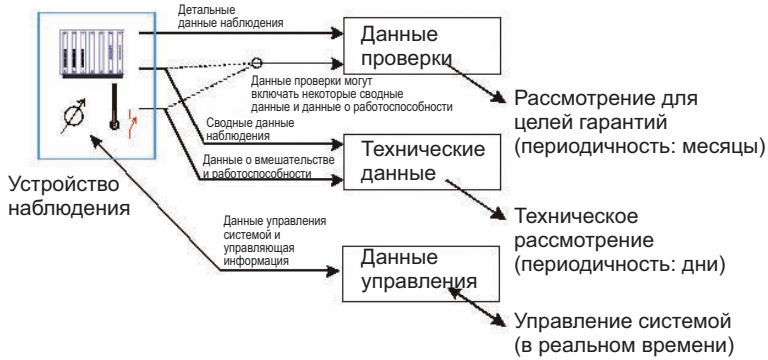


Рис. 40. Информационная модель автономного и дистанционного мониторинга.

если они считаются важными для рассмотрения в целях осуществления гарантий (показаны пунктирными линиями на рис. 40). Относительно видов данных, используемых в модели, можно сделать некоторые общие выводы, однако в конкретном проекте автономного мониторинга могут быть предусмотрены исключения.

## 7.2. ТРЕБОВАНИЯ МАГАТЭ

В данном разделе рассматриваются требования МАГАТЭ в отношении обеспечения безопасности данных. Информация о требованиях государств-членов приводится в разделе 7.3.

### 7.2.1. Данные проверки

Данные систем автономного и дистанционного мониторинга необходимо анализировать, используя заслуживающую доверия информацию, позволяющую делать достоверные выводы. Таким образом, информация, используемая для анализа, должна однозначно поступать из искомого источника, определенно не должна подвергаться изменениям при передаче и, разумеется, не должна быть повторением предыдущих данных.

Документ по политике МАГАТЭ при использовании дистанционного мониторинга гласит (см. сноску 2):

“Должны приниматься меры по обеспечению аутентичности передаваемых и запоминаемых данных”.

Термин 'аутентичность' в этом контексте подразумевает сочетание защиты целостности (включая воспроизведение/замещение данных) и аутентификации (происхождения), как определено выше.

Требования МАГАТЭ в отношении конфиденциальности формулируются следующим образом:

“Как правило, детальная информация по гарантиям, поступающая от оборудования Агентства, не предоставляется государствам. Однако могут предприниматься меры для обмена некоторыми данными в рамках сотрудничества с компетентными органами государств”.

Хотя целостность и аутентификация имеют первостепенное значение, в отношении некоторых данных по гарантиям может требоваться защита конфиденциальности, так как знание фактически измеренных величин может позволить государствам использовать характеристики или погрешности приборов. Например, если фактическая измеренная величина и точность прибора известны, заявления могут подтасовываться таким образом, чтобы каждое из них было в пределах границ погрешности измерения, и это позволит осуществлять переключение небольших количеств материала в течение продолжительного времени.

Для данных, содержащихся в заявлении оператора, требуется защита в отношении невозможности отказа от авторства (от происхождения). В зависимости от механизма обеспечения безопасности<sup>2</sup> базовая функция невозможности отказа от авторства (от происхождения) может быть внутренне присущей методу, используемому для защиты целостности и аутентификации. Как правило, в заявлении оператора необходимо указывать время представления заявления, если в доставке заявления в МАГАТЭ может быть существенная задержка. Если МАГАТЭ получает заявление быстро, оно может надежно заархивировать информацию по получению и будет в состоянии

---

<sup>2</sup> Например, если используются сигнатуры (подписи) на основе открытого ключа, обеспечивается базовая функция невозможности отказа от происхождения. Более мощная защитная функция невозможности отказа требует применения дополнительных механизмов, связывающих время подписи с самой сигнатурой. Например, копия (или полный дайджест с подписью пользователя) сообщения может храниться в доверенном блоке памяти с тем, чтобы имелось свидетельство того, что в определенный момент времени прилагалась подпись. В других случаях копию (или дайджест и подпись) можно направлять доверенному сервису временных меток, который будет добавлять временную маску и подписывать общую комбинацию. От доверенных сервисов временных меток и блоков памяти может также требоваться, чтобы они поддерживали другие сервисные функции безопасности, такие, как доверенные функции аудита и отслеживания.

подтвердить, что это заявление не было заменено более поздним вариантом. С другой стороны, в случае возможной задержки в доставке будет требоваться отметка времени.

Функции невозможности отказа от авторства, защиты целостности и аутентификации, а также защиты конфиденциальности, когда это необходимо, должны быть достаточно мощными, чтобы выдерживать внешние атаки. Как указывалось выше, защита конфиденциальности может требоваться не для всей информации, и даже в случае, когда эта защита требуется, ее применение может быть необходимым лишь в течение ограниченного интервала времени. Например, данные измерений могут оставаться чувствительными только до тех пор, пока не сделано соответствующее заявление государства-члена.<sup>3</sup>

Таким образом, хотя функции невозможности отказа от авторства, целостности и аутентификационной защиты требуются в течение всего жизненного цикла данных проверки (т.е. в течение многих лет), защита конфиденциальности может<sup>4</sup> требоваться только до тех пор, пока не будет завершено рассмотрение для целей гарантий (например, в течение нескольких месяцев).

### 7.2.2. Технические данные

Глоссарий по гарантиям МАГАТЭ<sup>5</sup> гласит:

“Получение данных о работоспособности с достаточной частотой обеспечивает возможность обнаруживать отказы оборудования или вмешательство достаточно рано для принятия восстановительных мер, которые должны осуществляться с целью выполнения требований в отношении своевременности”.

В Документе по политике МАГАТЭ при использовании дистанционного мониторинга (см. сноску 3) указано:

---

<sup>3</sup> Это не всегда верно. Долгосрочный анализ погрешностей приборных данных иногда позволяет делать прогноз будущих неточностей. В таких случаях данные приборов, по-видимому, необходимо защищать до тех пор, пока приборы не будут повторно откалиброваны.

<sup>4</sup> В более изощренных атаках могут использоваться исторические данные для прогнозирования будущих инструментальных погрешностей. В таких случаях защита конфиденциальности будет необходима до тех пор, пока оборудование не будет повторно откалибровано.

<sup>5</sup> МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Глоссарий по гарантиям МАГАТЭ, издание 2001 года, IAEA/NVS/3, МАГАТЭ, Вена (2002).

“Данные, дистанционно передаваемые в Центральные учреждения или региональные бюро, как правило, ежедневно подвергаются техническому рассмотрению. Если это не представляется возможным, без рассмотрения они не должны оставаться более трех последовательных рабочих дней. Техническое рассмотрение включает контроль сообщений о работоспособности и вмешательстве”.

Цель состоит в передаче этих данных в кратчайший возможный срок для того, чтобы можно было начать осуществление восстановительных мер. На практике, однако, и особенно в случае систем автономного мониторинга, не связанных с сетью передачи данных, получение этих данных может задерживаться до прибытия инспектора на объект.<sup>6</sup>

Защита целостности и аутентификации требуется для всех технических данных с целью обеспечения того, чтобы сообщения об отказах, о регистрационных записях и признаках вмешательства надежно передавались сотрудникам МАГАТЭ. Кроме того, для данных, которые могут указывать на повышенную степень уязвимости оборудования, необходимо обеспечивать защиту конфиденциальности до тех пор, пока не будут приняты восстановительные меры. Например, данные о работоспособности, указывающие на отказ внутренней резервной батареи, могут свидетельствовать о повышенной уязвимости, связанной со сбоем в работе основного источника питания. Такая информация может позволить агенту угрозы оптимизировать атаки на оборудование.

Функции защиты целостности и аутентификации, а также защиты конфиденциальности, когда это необходимо, должны быть достаточно мощными, чтобы выдерживать внешние атаки. По всей видимости, такая защита может требоваться только в течение ограниченного отрезка времени. Например, данные о работоспособности могут оставаться чувствительными только до тех пор, пока оборудование не будет отремонтировано. Таким образом, защита может требоваться только до момента, когда будет завершено техническое рассмотрение и когда будут приняты восстановительные меры.

Иногда целесообразно обеспечивать защиту целостности и аутентификации некоторой информации аудита, а также другой информации в течение более длительных периодов, если ее значимость не может быть определена во время первоначального технического рассмотрения. Для выработки выводов может требоваться анализ исторических тенденций. В

---

<sup>6</sup> Отказ в сети на площадке может привести к задержке в доставке данных о работоспособности даже при наличии систем, соединенных в сети.

таких ситуациях эта информация может быть также включена в данные проверки.

### 7.2.3. Данные управления

В настоящее время данные управления оборудованием обычно не используются в системах автономного и дистанционного мониторинга. Однако следует отметить, что данные управления во все большей степени будут использоваться для настройки датчиков и управления ими с компьютера сбора данных и в конечном счете для управления системами дистанционного мониторинга из учреждений МАГАТЭ. Данные управления передаются в 'режиме реального времени' и могут охватывать:

- (а) распределение общих временных параметров среди датчиков компьютером сбора данных,
- (б) управление работой датчиков (например, фокусом камеры, наклонно-поворотным устройством, частотой выборки),
- (с) активацию испытательных и калибровочных программ в датчиках.

В будущем всей системой дистанционного мониторинга можно будет управлять из учреждений МАГАТЭ при условии применения достаточных мер безопасности. В таких случаях необходимо будет обеспечивать, чтобы средства управления дистанционным входом в систему и доступом были адекватными для обеспечения безопасного управления оборудованием. Типичная управляющая информация может охватывать:

- (1) безопасный вход в компьютер сбора данных,
- (2) инициирование передач файлов и данных,
- (3) оперативное управление системой дистанционного мониторинга,
- (4) активацию тестовых программ в компьютере сбора данных,
- (5) безопасный ввод команд в компьютер сбора данных, который, в свою очередь, может передавать безопасные сигналы управления соответствующим датчикам,
- (6) обновление программного обеспечения.

Защита целостности и аутентификации требуется для всех таких данных в целях предотвращения их изменения. В случае некоторых данных управления требуется обеспечение их конфиденциальности, так как съём информации может привести к раскрытию секретных сведений, таких, как, критерии,

используемые для регулирования механизмов запуска наблюдения.<sup>7</sup> Наличие функций защиты контроля доступа и готовности необходимо для предотвращения маскарада - маскирования источников угрозы под подлинные источники данных управления, а также предотвращения атак с целью нарушения нормального обслуживания в коммуникационных портах. Управляющие команды могут также использоваться для анализа трафика, посредством которого съемщик информации может извлекать сведения из анализируемых моделей трафика. Например, даже если команда зашифрована, в случае когда она приводит к более высокой скорости передачи данных, съемщик информации может, по-видимому, составлять достоверные выводы о содержании команды.

Все необходимые меры защиты должны быть достаточно мощными, с тем чтобы противостоять внешним атакам. Эти меры требуются в течение всего жизненного цикла данных.

### 7.3. ТРЕБОВАНИЯ ГОСУДАРСТВ-ЧЛЕНОВ

Государства-члены заинтересованы главным образом в обеспечении того, чтобы в отношении предоставляемой ими информации соблюдалась конфиденциальность, а также в обеспечении того, чтобы программа по гарантиям надежно отражала выполнение ими соглашений.

Типовой протокол по применению гарантий<sup>8</sup> гласит, в частности:

“Статья 14:

- b. При установлении связи и передаче информации ... надлежащим образом учитывается необходимость обеспечения защиты находящейся в частной собственности или коммерчески чувствительной информации или той информации о конструкции, которую государство-член считает особо чувствительной.

---

<sup>7</sup> Защита конфиденциальности данных управления обновлением времени дня может не требоваться.

<sup>8</sup> МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Типовой дополнительный протокол к Соглашению(ям) между государством(ами) и Международным агентством по атомной энергии о применении гарантий, INFCIRC/540, МАГАТЭ, Вена (1997).

### Статья 15:

- а. Агентство поддерживает строгий режим обеспечения эффективной защиты от раскрытия коммерческих, технологических и промышленных секретов и другой конфиденциальной информации, которая становится ему известной, включая такую информацию, которая становится известной Агентству в ходе осуществления настоящего Протокола.”

В Документе по политике МАГАТЭ при использовании дистанционного мониторинга (см. сноску 2) указано:

“Во время передачи данных следует применять шифрование в соответствии с договоренностью, достигнутой с государством. Передаваемые данные рассматриваются и сохраняются как 'конфиденциальная информация по гарантиям'. Государства имеют право знать, какой вид информации передается, и право на защиту данных посредством соответствующего шифрования. Как правило, детальная информация по гарантиям, поступающая от оборудования Агентства, не предоставляется государствам. Однако могут предприниматься меры для обмена некоторыми данными в рамках сотрудничества с компетентными органами государств. Меры по обмену такими данными подлежат одобрению на индивидуальной основе заместителем Генерального директора по гарантиям.”

Можно отметить, что эти требования государств-членов конкретно ориентированы на защиту конфиденциальности ‘коммерческих, технологических и промышленных секретов’. Это требование государств-членов в отношении конфиденциальности обычно не обуславливает необходимость применения дополнительных механизмов обеспечения безопасности, когда информация содержится в физически безопасном месте у государства-члена. Это требование государств-членов обычно касается только информации, находящейся в коммуникационных сетях МАГАТЭ, на переносных носителях информации, а также в учреждениях МАГАТЭ или инспекционном оборудовании. Исключения из этого могут составлять случаи, когда датчики и компьютеры сбора данных не находятся на одной прилегающей установке (и, таким образом, требуется канал передачи данных через незащищенные зоны), или если линии связи установки иным образом уязвимы

(например, из-за использования беспроводных линий или применения сетей установки, используемых совместно с другими пользователями).<sup>9</sup>

В случае САМ и СДМ при такой архитектуре безопасности требования государств-членов в отношении конфиденциальности включают два элемента:

- (1) обеспечение наличия адекватной защиты каналов передачи данных между датчиками и компьютерами сбора данных, если они не защищены государствами-членами посредством физических границ,
- (2) обеспечение адекватной защиты данных, хранимых на переносных носителях информации.

Кроме того, если безопасность портативных компьютеров, используемых инспекторами и техническим персоналом, не может быть обеспечена во всех местах, важно, чтобы любая информация государства-члена, хранящаяся или просматриваемая на этих устройствах, была надлежащим образом защищена.

Функция защиты конфиденциальности должна быть достаточно мощной, с тем чтобы противостоять внешним атакам. Поскольку именно обладатель защищаемой информации может наилучшим образом определить значение своих данных, необходимо предусматривать удовлетворение требований государств-членов в отношении степени защиты. При отсутствии требований со стороны государства-члена в архитектуре безопасности МАГАТЭ определяется уровень минимальной степени защиты, соответствующий общепринятой коммерческой практике и требованиям, определенным МАГАТЭ для 'конфиденциальной информации по гарантиям'.

---

<sup>9</sup> Такие варианты не предполагаются. Использование беспроводных сетей и общих сетей не рекомендуется, но может требоваться из-за ограничений, действующих на конкретных установках.



## 8. ОТБОР ПРОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Отбор проб окружающей среды был введен в 1996 году в качестве одной из новых мер гарантий МАГАТЭ, призванных обеспечивать подтверждение отсутствия незаявленного ядерного материала или ядерной деятельности. Отбор проб окружающей среды на ядерном объекте или около него наряду с применением сверхчувствительных аналитических методов, таких, как масс-спектрометрия, анализ частиц и низкоуровневые радиометрические методы, позволяет раскрывать сигнатуры прошлой и нынешней деятельности в местах, где осуществляется обращение с ядерным материалом. Начальное осуществление отбора проб окружающей среды для целей гарантий сводится к сбору мазковых проб на установках по обогащению и установках с горячими камерами. Реализация этого метода распространяется на другие типы ядерных установок, и отбор проб проводится в связи с инспекционной деятельностью в рамках дополнительного доступа в соответствии с Дополнительным протоколом.

Образцы исследуются в режиме анализа частиц или всей пробы в зависимости от целей отбора проб и уровней активности мазковых проб. Массовый анализ предусматривает анализ всей пробы, обычно посредством гамма-спектрометрии или термоионизационной масс-спектрометрии с изотопным разбавлением; аналитические измерения позволяют получить средние результаты для материала, охваченного мерами сохранения. Анализ частиц основан на обнаружении и анализе отдельных частиц в микрометровом диапазоне размеров и обеспечивает получение результатов, касающихся содержания U и Pu, а также отношения изотопов U и/или Pu в этих частицах.

### 8.1. ЧИСТАЯ ЛАБОРАТОРИЯ МАГАТЭ ПО ГАРАНТИЯМ

Чистая лаборатория МАГАТЭ по гарантиям (рис. 41) была создана в декабре 1995 года с целью обеспечения чистого помещения класса 100 для подготовки и сертификации наборов для отбора проб, а также для получения, скрининга и распределения проб окружающей среды, получаемых в результате проведения инспекций по гарантиям. Эта лаборатория значительно снижает риск перекрестного загрязнения, которое может приводить к неверным выводам в связи с осуществлением гарантий. Чистая лаборатория имеет более 200 м<sup>2</sup> лабораторных помещений, при этом приблизительно 50 м<sup>2</sup> соответствует уровню чистоты класса 5 ИСО (рис. 42). В арсенале лаборатории имеется целый ряд аналитических методов, включая  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - и рентгенофлуоресцентную спектрометрию, растровую электронную микроскопию с



Рис. 41. Чистая лаборатория МАГАТЭ по гарантиям.



Рис. 42. Аналитик, работающий в чистом модуле Чистой лаборатории МАГАТЭ.

электронно-зондовым анализом и высокочувствительную термоионизационную масс-спектрометрию.

Мазковым пробам окружающей среды, поступающим в Чистую лабораторию, присваивают кодовый номер в целях сохранения конфиденциальности информации об их происхождении. Затем производится измерение проб гамма-спектрометрией для низкого уровня фона с целью выявления наличия актиноидов (прежде всего U и Pu) и продуктов ядерного деления или активации (таких, как  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{106}\text{Ru}$ ); далее пробы измеряются рентгено-флуоресцентной спектрометрией для выявления наличия U, Pu или других важных элементов. Затем применяется счет альфа/бета-частиц у радиоактивных образцов для обнаружения актинидов или бета-излучающих изотопов, таких, как  $^3\text{H}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  или  $^{99}\text{Tc}^m$ .



*Рис. 43. Набор для отбора мазковых проб окружающей среды.*

После скрининговых измерений подпробы направляются в лаборатории САЛ для более детального анализа. Отдельные пробы выбираются для измерений в Чистой лаборатории методом термоионизационной масс-спектрометрии с изотопным разбавлением при использовании высокочувствительных приборов с функцией детектирования в режиме счета импульсов. Конечная чувствительность этого метода лежит в диапазоне  $10^{-15}$  г для U и Pu.

Одним из основных видов деятельности Чистой лаборатории является подготовка чистых наборов для отбора проб окружающей среды. Набор для сбора мазковых проб показан на рис. 43. Он включает все принадлежности, требующиеся инспекторам МАГАТЭ для работы в полевых условиях: чистые мазковые ткани, пластиковые мешки с минизажимами, перчатки для чистой комнаты, формуляр данных проб, ручку и этикетки. Для обеспечения чистой рабочей поверхности в комплект включается рулон алюминиевой фольги. Для пробоотбора внутри горячих камер, когда из-за высокого уровня излучения подпробы необходимо извлекать с помощью дистанционных манипуляторов и отправлять в МАГАТЭ в специальном свинцовом контейнере, требуются другие типы наборов для отбора мазковых проб.

## 8.2. СКРИНИНГ ПРОБ

### 8.2.1. Низкоуровневая гамма-спектрометрия

Пробы окружающей среды сразу после их получения замеряются низкофоновой гамма-спектрометрической системой. Спектрометр основан на

использовании коаксиального Ge-детектора с 90%-ной эффективностью, заключенного в экран из высокочистого свинца толщиной 10 см. Пробы в специальных мензурках помещаются в 15-позиционное устройство для смены проб, и в течение 1 ч производится счет для каждой пробы с целью получения гамма-спектра в энергетическом диапазоне от 5 кэВ до 3 МэВ. Этим методом определяется общая гамма-активность, скорректированная с учетом фона, и в случае обнаружения достаточно высокой активности может проводиться оценка спектральных пиков с целью определения активности в пробе отдельных гамма-излучающих изотопов, таких, как  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$ . В зависимости от числа проведенных операций счета точность этих измерений находится в диапазоне 2-5% отн. Абсолютная активность отдельных радиоизотопов не столь важна, как относительная активность по сравнению с выбранным изотопом, таким, как  $^{137}\text{Cs}$ .

### 8.2.2. Рентгено-флуоресцентная спектрометрия

Рентгено-флуоресцентная спектрометрия используется для обнаружения микрограммовых количеств U, Pu или других представляющих интерес элементов на поверхности мазковых проб. Проба удерживается манипулятором и облучается рентгеновской трубкой, что приводит к эмиссии флуоресцентного рентгеновского излучения из элементов, присутствующих на мазковой пробе. Регистрация флуоресцентного рентгеновского излучения осуществляется с использованием Si(Li)-детектора площадью 100 мм<sup>2</sup>, размещаемого около пробы. Счет производится в течение 4–5 ч, и затем оцениваются спектры для определения количества присутствующего элемента, а также его пространственного распределения. Метод скрининга является полностью неинвазивным, поскольку можно измерять подпробу, находящуюся внутри пластикового мешочка.

### 8.2.3. Счет альфа/бета-частиц

Для скрининга радиоактивных мазковых проб на наличие альфа- или бета-излучающих изотопов применяется счетная система с сеточной ионизационной камерой. Мазковые пробы подразделяются на подпробы с помощью адгезивного угольного диска, который помещается в счетную камеру, где производятся измерения в течение одного часа.

Эта система обладает высокой эффективностью сбора и имеет чувствительность в миллибеккерелевом диапазоне. Измерения в ней альфа-излучающих нуклидов, таких, как  $^{210}\text{Po}$ , и бета-излучателей, таких, как  $^3\text{H}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{99}\text{Tc}^m$ , могут выполняться с намного более высокой чувствительностью, чем гамма- или рентгеновскими методами.



*Рис. 44. Масс-спектрометр для изотопного анализа проб окружающей среды.*

## 8.3. ИЗОТОПНЫЙ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ

### 8.3.1. Термоионизационная масс-спектрометрия со счетом импульсов

Для принятия решения в отношении того, какие пробы следует подвергать более детальному анализу, используются скрининговые измерения. Термоионизационная масс-спектрометрия применяется для измерения концентраций U и Pu и изотопных составов в пробах окружающей среды. Основной метод описан в разделе 3. Однако для измерения проб окружающей среды требуется намного более высокая чувствительность в диапазоне  $10^{-9}$  и  $10^{-12}$  г. Это достигается путем применения специальных процедур подготовки проб, капельного нанесения элементов проб на нить масс-спектрометра и использования систем регистрации со счетом импульсов с высокой эффективностью детектирования. Масс-спектрометр показан на рис. 44.

Изотопные метки ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  или  $^{244}\text{Pu}$ ) вводятся в пробы во время химической обработки, с тем чтобы концентрации U или Pu можно было определить методом изотопного разбавления. Отношения изотопов измеряются для всех изотопов U или Pu относительно изотопной метки, и изотопный состав пробы оценивается путем вычитания известного изотопного состава изотопной метки. Точность этого метода составляет приблизительно 1-10% для концентрации U или Pu в диапазоне  $10^{-9}$  г и для отношений основных изотопов в пробе.



Рис. 45. Сканирующий электронный микроскоп для анализа частиц.

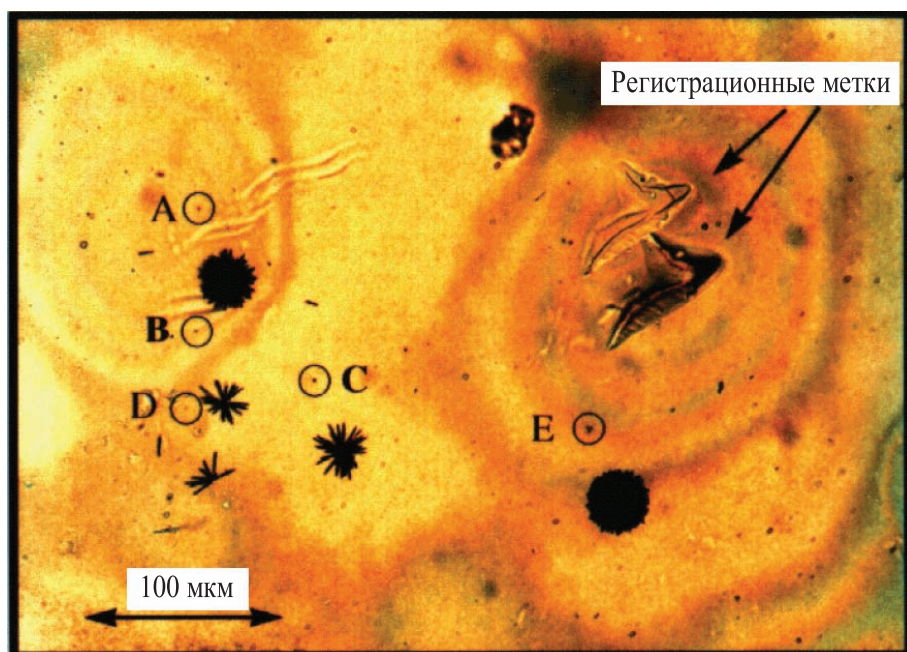
### 8.3.2. Растровая электронная микроскопия с электронно-зондовым анализом

Чистая лаборатория оборудована сканирующим электронным микроскопом с детекторами, позволяющими проводить рентгено-флуоресцентный анализ с дисперсией по длине волны и энергодисперсионный рентгено-флуоресцентный анализ (рис. 45). Представляющие интерес частицы извлекаются из пробы с использованием адгезивных угольных дисков, которые вводятся в электронный микроскоп. При большом увеличении ( $500\text{—}5000\times$ ) частицы исследуются, и сигнал обратнорассеянных электронов используется для поиска частиц, содержащих тяжелые элементы. Эти частицы могут быть затем измерены энергодисперсионной рентгено-флуоресцентной спектрометрией для целей полуколичественного элементного анализа. Таким образом могут быть определены частицы, содержащие U или Pu; их размер и морфология, а также другие присутствующие элементы дают информацию о процессе, в результате которого они были получены. Этот тип анализа является частью классического ‘метода анализа частиц’, который применяется в некоторых лабораториях САЛ в сочетании с термоионизационной масс-спектрометрией.

### 8.3.3. Метод треков ядерного деления

Традиционный анализ частиц на начальном этапе включает операцию, в которой отбор представляющих интерес частиц, содержащих делящиеся изотопы, такие, как  $^{235}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$ , производится методом треков ядерного деления. Затем частицы помещаются на нить термоионизационного масс-спектрометра для измерения изотопного состава присутствующих U и Pu.





Частица	Размер (мм)	Треки	%U-235	Соединение
A	1,2	100	3,0	UO <sub>2</sub>
B	1,0	19	0,5	UO <sub>2</sub>
C	1,5	40	0,5	UO <sub>2</sub>
D	0,7	8	0,5	UO <sub>2</sub>
E	1,5	600	91,8% <sup>239</sup> Pu	PuO <sub>2</sub>

Рис. 46. Мембрана Lexan, на которой видны треки ядерного деления.

Метод треков ядерного деления предусматривает удаление частиц из пробы окружающей среды озолением (в случае растительных или мазковых проб) или физическим извлечением ультразвуковым методом в инертном растворителе. Частицы далее помещаются на пластиковую трековую мембрану травления (например, Lexan) в слое коллодия (нитроцеллюлозы). Затем мембрана облучается в реакторе с тепловыми нейтронами при суммарной дозе  $10^{14}$  нейтронов. Частицы, содержащие делящиеся изотопы, оставляют треки на мембране, которые могут быть проявлены травлением для того, чтобы сделать их видимыми под оптическим микроскопом (рис. 46). Опытный аналитик может сравнить размер и вид частиц с числом треков ядерного деления для

принятия решения в отношении того, какие частицы следует измерять дальше. Аналитик может в этом случае выбирать каждую представляющую интерес частицу и размещать ее непосредственно на нити термоионизационного масс-спектрометра.

В термоионизационной масс-спектрометрии частица находится на нити из металлического рения и нагревается источником ионов масс-спектрометра до 1500–1800°C для получения ионов U или Pu, которые подсчитываются системой детектирования со счетом импульсов. Масс-спектрометр переключается между изотопами U или Pu для накопления масс-спектров. Наличие различных изотопов может быть оценено по полученным ионным отсчетам с точностью лучше чем 1% отн. для изотопов с 1-90% в частицах диаметром 1-5 мм. Частицы диаметром до 0,1 мм могут быть измерены, но с меньшей точностью.

### 8.3.4. Масс-спектрометрия вторичных ионов

Другой метод, используемый в АЛГ и некоторых сетевых лабораториях для измерения изотопного состава частиц проб окружающей среды, имеющих размеры в микрометрическом диапазоне, это - масс-спектрометрия вторичных ионов (рис. 47). Частицы наносятся на проводящую подложку и помещаются в вакуумную систему прибора, где они бомбардируются ионами кислорода. Ионная бомбардировка приводит к распылению пробы и выбросу вторичных ионов, которые являются репрезентативными по отношению к исследуемым частицам. Вторичные ионы ускоряются и анализируются по массе спектрометром и подсчитываются визуализирующим детектором или



Рис. 47. Масс-спектрометрия вторичных ионов(SIMS).



детектором ионов со счетом импульсов. В режиме работы с ионным микроскопом изображение генерируется путем использования вторичных ионов заданной массы (например,  $^{235}\text{U}^+$ ). Другое изображение может быть затем получено путем использования сигнала других вторичных ионов (таких, как  $^{238}\text{U}^+$ ), и два изображения совмещаются для получения отношения  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  для каждой частицы в поле зрения (обычно 150 мм в диаметре). Просматривая 100–200 полей за одну сессию, этим методом можно анализировать несколько тысяч частиц, таким образом определяя распределение обогащения  $^{235}\text{U}$ , обнаруженного в частицах пробы.

После определения интересующей частицы в режиме ионного микроскопа можно проводить ее полное измерение, фокусируя пучок первичных ионов на ней и поэтапно переходя к представляющим интерес изотопам. Это позволяет получить полный изотопный состав частицы, включая незначительные изотопы, такие, как  $^{234}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ . В зависимости от размера частицы точность этого метода может составлять 1% отн. для изотопов с уровнем относительного содержания 1-90% и до 10% отн. для редких изотопов.

Настоящий буклет, который является пересмотренным и обновленным вариантом публикации IAEA/NVS/1, преследует цель дать полное и сбалансированное описание методов и оборудования, используемых для учета ядерного материала и осуществления мер по сохранению и наблюдению, а также для применения новой меры гарантий отбора проб окружающей среды. Был добавлен совершенно новый раздел по безопасности данных, в котором приводится описание особых функций, предусматриваемых в системах стационарного оборудования для обеспечения аутентичности данных.