

## Ядерная криминалистика

*Казбекова Д. Б., магистрант БГУ,  
науч. рук. проф. Байчоров А. М., д-р филос. наук*

Проблеме незаконного оборота ядерных материалов и радиоактивных веществ начали уделять повышенное внимание в 1990-х гг. в связи с выявлением случаев ядерной контрабанды. При этом возникал ряд вопросов, связанных с идентификацией, назначением, степенью опасности, происхождением и путями транспортировки задержанных материалов. Ответы на данные вопросы могла дать только специализированная экспертиза, поэтому службы, отвечающие за расследования случаев ядерной контрабанды, прибегали к помощи различных научно-исследовательских институтов и предприятий, оснащенных необходимым оборудованием для проведения подобных исследований. Однако специфика проводимых анализов и чувствительность результатов требовали более тщательного и глубокого подхода. Так постепенно развивалось новое направление исследований — ядерная криминалистика

Термин «ядерная криминалистика» (nuclear forensics) был введен в употребление в отношении незаконного оборота ядерных и радиоактивных материалов [1]. Ядерная криминалистика — это анализ изъятых из незаконного оборота ядерных материалов в целях установления места их производства и стадии ядерного топливного цикла (ЯТЦ), на которой был получен материал. В ходе анализа определяются «ядерные отпечатки» материала посредством определения его элементного и изотопного составов, изотопных и масс-соотношений, возраста, содержания примесей, химической формы и физических параметров. Далее путем сопоставления полученных данных с накопленными знаниями о характеристиках ядерных материалов из того или иного этапа ЯТЦ (аффинажный завод, обогатительная установка, завод по производству ядерного топлива и т. д.), предприятия, места производства (России, Франции, США и т. д.), ядерного реактора водо-водяного энергетического реактора, реактора большой мощности (ВВЭР, РБМК) и т. д., географического места добычи (например, характеризующегося различным изотопным составом кислорода) представляется возможным определить потенциального производителя и «историю производства» задержанного ядерного материала [2].

Ядерная криминалистика проводится в три основных этапа:

- определение характеристик ядерного материала (characterization) при помощи различных аналитических методов и технических средств (см. таблицу 1);

- интерпретация (interpretation) — сопоставление полученных характеристик с информацией о существующих способах и местах производства ядерных материалов;
- установление источника, способа производства, пунктов отправки и назначения, а также участка, на котором был потерян контроль (attribution). На данном этапе также предпринимаются попытки определения возможности существования других ядерных материалов, украденных из того же источника. «Атрибуция» является заключительным этапом, на котором осуществляется производство всей поступившей информации, информации из баз данных МАГАТЭ (например, «Illicit Trafficking Database» [3]) и свидетельств традиционной судебной экспертизы.

Поскольку ядерная контрабанда выходит за рамки одного государства, то она автоматически становится предметом международного внимания и сотрудничества. Так, в 1996 г. была создана Международная техническая рабочая группа по ядерной контрабанде, вплотную занимающаяся рассмотрением случаев незаконного оборота ядерных материалов, систематизацией накопленного опыта, техническими рекомендациями и протоколами в области ядерной криминалистики.

Большое внимание данной проблеме уделяет МАГАТЭ. Под эгидой агентства в 2006 г. вышел Типовой план действий [4], в котором рассмотрены основные процедуры судебной ядерной экспертизы, описаны наиболее используемые методы и заложена основа для международной помощи по проведению судебной ядерной экспертизы странам, не обладающим соответствующими возможностями. Современное состояние ядерной криминалистики определяется, прежде всего, техническими возможностями и накопленным опытом ведущих стран в этой сфере, а также поддержкой этими странами соответствующих исследований.

Имея дело как с задержанными, так и с образцовыми ядерными материалами, за последние десять лет ядерная криминалистика достигла определенных успехов в установлении происхождения материалов. Были разработаны различные методики и техники экспертизы с привлечением оборудования и программных вычислений.

Важным этапом в проведении экспертизы является определение типа реактора. Зная определенные характеристики ядерного материала, можно утверждать, является ли он ядерным топливом или продуктом его переработки после облучения в реакторе. При этом устанавливаются параметры, позволяющие соотнести данный материал с каким-либо типом реактора, а также определить по возможности его физические характеристики. Здесь стоит рассмотреть два случая: когда ядерный материал представляет собой топливную таблетку и когда он является продуктом переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ).

**Таблица 1 — Методы и технические средства гарантии**

| Метод                                                                                                           | Краткое описание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Технические средства                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Что позволяют определить                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Анализ ЯМ. Неразрушающий анализ — в образце без изменения характеристик образца или проникновения в него</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Гамма-спектрометрия                                                                                             | Регистрация энергетических спектров гамма-излучения, испускаемого ядерными материалами. Для детектирования используется эффект взаимодействия гамма-излучения с детектором. Импульсы напряжения, сформированный электроникой, соответствует энергии поглощенного гамма-кванта                                                                                                                           | Сцинтилляционные (NaI) и полупроводниковые (HrGeCdZnTe) детекторы                                                                                                                                                                                                                                                  | Энергия гамма-излучения является специфичной для каждого из существующих изотопов. Анализ спектра излучения образца позволяет определять его изотопный состав, относительную концентрацию изотопов и в некоторых случаях — обогащение. Определение количества и соотношение различных изотопов дает возможность на основе законов радиоактивного распада рассчитывать различные временные характеристики ядерной деятельности. Например, дату выгрузки облученного ядерного топлива, время последней химической обработки материала |
| Счет нейтронов (нейтронных совпадений)                                                                          | Регистрация эмитируемых нейтронов ЯМ при их спонтанном делении или в результате индуцируемых ядерных реакций внешними источниками излучения (низкоэнергетические источники нейтронов, альфа-частицы). Для детектирования используются реакции захвата нейтронов материала детектора, в результате которых образуются высокоэнергетические частицы, характеризующие нейтронное взаимодействие по энергии | Пассивные и активные счетчики нейтронных совпадений:<br>(1) колодезные детекторы, полностью охватывающие пробу; (2) воротниковые детекторы, кольцеобразно охватывающие пробу. Активно счетчики используют источники нейтронов индуцирования ядерных реакций; пассивные — регистрируют нейтроны спонтанного деления | Энергия нейтронов ядерных реакций является специфичной для каждого из существующих изотопов, а интенсивность испускаемых нейтронов пропорциональна массе изотопа. Таким образом, измерение интенсивности позволяют определять массу изотопа. Данный метод широко используется для проверки состава облученного ядерного топлива. Высокая концентрация Pu-239 при незначительных количествах Pu-240 может служить индикатором переклещения                                                                                           |

| Метод                                                                                                                                                                                                                                                                                | Краткое описание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Технические средства                                                                                                                            | Что позволяют определить                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Калориметрия (от лат. calor 'тепло' и metro 'измеряю')                                                                                                                                                                                                                               | Количество измерения тепла, выделяемого ядерным материалом в результате ядерных превращений                                                                                                                                                                                                                                                         | Калориметр — прибор для измерения количества тепла, выделяемого предметом                                                                       | Каждый радиоактивный изотоп характеризуется периодом полураспада. Каждый период полураспада характеризуется тепловыделением, выгружаемом в ваттах на грамм вещества. Зная количество радиоактивных изотопов для химического элемента, их периоды полураспада, суммарное тепловыделение и предварительно определенный изотопный состав образца, можно определить количество элемента в граммах |
| Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА)                                                                                                                                                                                                                                                  | Регистрация рентгеновских лучей, испускаемых ионизированным атомом. Для неразрушающего анализа применяют фотонную ионизацию, которая достигается использованием рентгеновской трубки или радиоизотопного источника                                                                                                                                  | Обычно установка для РФА состоит из самого измерителя, источника, источника возбуждения и полупроводникового детектора рентгеновского излучения | Рентгеновские лучи, испускаемые ионизированным атомом, являются характеристикой элемента. РФА позволяет определить элементный состав, а также концентрации элементов по интенсивности рентгеновского излучения                                                                                                                                                                                |
| <b>Анализ ЯМ. Разрушающий анализ — определение вида и / или количества ядерного материала в образце путем проникновения в него. Анализ включает этапы отбора пробы, химической подготовки образца и изменений. Проводятся на всех типах твердых и жидких материалов в балк-форме</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Масс-спектрометрия                                                                                                                                                                                                                                                                   | Разделение ионизированных изотопов элемента по массе. Масс-спектрометр состоит из источника ионов (в нем получают и ускоряют ионы, формируют пучок ионов), масс-анализатора (служит для разделения ионов по массам) и детектирующей системы. В результате измерения получают соотношение между массой ядер и их количеством в образце — масс-спектр | Масс-спектрометр вторичной ионизации, термоионизационный масс-спектрометр, масс-спектрометр индуктивной плазмы и др.                            | Главный результат исследования в масс-спектрометре — изотопный состав элемента (урана, плутония и т. д.). Изотопный состав, в свою очередь, позволяет найти обогатение по тому или иному изотопу, выгорание ядерного топлива и некоторые временные характеристики ядерной деятельности (например, дата выгрузки или последней химической обработки ОЯТ)                                       |

| Метод                                                                                                                              | Краткое описание                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Технические средства                                                                                                                                                                                                                                        | Что позволяют определить                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Электронная микроскопия                                                                                                            | Формирование изображения поверхности исследуемого вещества посредством бомбардировки его сфокусированным электронным пучком и сбора различных сигналов отклика от образца при помощи сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов                                                                                | Растровый (РЭМ) и трансмиссионный (ТЭМ) электронные микроскопы                                                                                                                                                                                              | Наблюдение внутренней структуры (ТЭМ) и морфологии (РЭМ) исследуемого образца. РЭМ, совмещенный с детектором рентгеновского излучения и энергодисперсионным микроанализатором, позволяет также определять элементный состав и концентрации элементов |
| <b>Сохранение и наблюдение — совокупность методов, используемых МАГАТЭ для визуального контроля обращения с ядерным материалом</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>и индикации несанкционированных попыток получения доступа к контролируемому ядерному материалу</b>                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Автономные методы оптического наблюдения                                                                                           | Автономное оптическое наблюдение используется для записи изображений, может также использоваться в сочетании с другим оборудованием для мониторинга с целью получения данных по ядерным измерениям, истории обращения с ЯМ и других данных. Системы наблюдения могут также автоматически передавать данные в МАГАТЭ | Одно- и многокамерные системы наблюдения применяются для наблюдения долгосрочных или краткосрочных (например, перегрузка ЯТ) видов деятельности на установке и могут устанавливаться как в помещениях, так и под водой (например, в бассейнах выдержки ОЯТ) | Обеспечивают непрерывность поступления информации о ядерных материалах и установках в период между инспекциями МАГАТЭ                                                                                                                                |
| Устройства индикации вмешательства (печати)                                                                                        | Печать используется для сохранности ядерных материалов, документов или любых других важных предметов. Печати также служат уникальными идентификаторами контролируемого объекта. Важно отметить, что они не предназначены для обеспечения физической защиты ЯМ                                                       | Печати различаются по материалам и конструктивному использованию. Они могут быть бумажными (адгезивными), металлическими, оптоволоконными, ультразвуковыми, электронными                                                                                    | Нарушение целостности или изменение специальных параметров печати позволяет определять попытки несанкционированного доступа. Печать невозможно восстановить в первоначальный вид после снятия                                                        |

| Метод                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Краткое описание                                                                                               | Технические средства                                                    | Что позволяют определить                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Отбор проб окружающей среды на обширной территории означает отбор проб окружающей среды (например, воздуха, воды, растительности, почвы, загрязнений) в ряде определенных агентством мест нахождения с целью подготовки выводов об отсутствии незаявленных ЯМ или ядерной деятельности на обширной территории (см. INFCIRC/540)</b> |                                                                                                                |                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Инспектора МАГАТЭ собирают пробы окружающей среды, которые далее отправляются в лаборатории МАГАТЭ для анализа | Для анализа проб могут быть использованы все ранее перечисленные методы | Анализ проб сверхчувствительными методами позволяет раскрывать следы прошлой и нынешней деятельности в местах, где осуществляется (осуществлялось) обращение с ядерными материалами, а также призван обеспечивать подтверждение отсутствия незаявленного ядерного материала или ядерной деятельности |

а. Спектр — распределение физической величины, обычно представляемое графически в виде диаграммы, графика. Например, распределение гамма-квантов по энергии.

б. Ватт — производная единица измерения мощности в системе СИ. 1 ватт определяется как мощность, при которой за 1 секунду времени выделяется энергии в 1 джоуль. 1 Дж  $\approx$  0,238846 ккалории.

в. Рентгеновская трубка — электровакуумный прибор, служащий источником рентгеновского излучения. Радиоизотопные источники — устройства различного конструктивного исполнения, содержащие радиоактивный материал.

г. Балк-форма — ядерный материал в виде газа, жидкости, порошка или большого количества твердых предметов, не имеющих индивидуальных номеров или других идентификаторов.

д. Выгорание ядерного топлива — снижение концентрации любого нуклида в ядерном топливе вследствие ядерных превращений этого нуклида при работе реактора.

В первом случае определяемыми характеристиками являются линейные размеры топливной таблетки, микроструктура поверхности, обогащение до I категории по  $^{235}\text{U}$ , наличие или отсутствие примесей [5]. Линейные размеры и геометрия таблеток позволяют определить параметры тепловыделяющего элемента, а в ряде случаев непосредственно указать на тип реактора. Также тип реактора можно определить, зная обогащение таблетки. Хорошие результаты по анализу обогащения дает гамма-спектрометрия. Поверхностная микроструктура (измеряемая профилометрией) указывает на способ, которым были произведены топливные таблетки (так называемые «сухой» и «мокрый»), а также является уникальным показателем производителя топлива, поскольку последний при контроле качества таблеток этим же способом измеряет поверхностную микроструктуру. Аналогично знание состава и количественных характеристик примесей позволяет идентифицировать изготовителя, поскольку исходные материалы у производителей разные, а значения примесей могут быть подчинены определенному стандарту. Для качественного определения примесей может использоваться рентгенофлуоресцентный анализ, а для точного количественного определения интересующих элементов — различные виды масс-спектрометрии.

Для определения типа реактора, отработавшее ядерное топливо которого было использовано для выделения плутония, применяют специально разработанные программные коды, на основе которых строятся зависимости между соотношениями изотопов плутония.

Следующим этапом экспертизы является определение «возраста» ядерного материала. Одной из важных характеристик для установления происхождения ядерного материала является его возраст, то есть время с момента его изготовления или последнего процесса очистки. Зная возраст материала, можно вычислить дату его производства с различной точностью и тем самым исключить места происхождения, явно не попадающие под этот критерий. Основным способом определения возраста является вычисление соотношения родительских и дочерних изотопов в материале. Для урана и плутония существует свой набор таких изотопов, и, соответственно, методы определения возраста слегка разнятся.

Задача определения возраста урана осложняется рядом причин. Во-первых, ядерные материалы имеют достаточно малую «историю», самые ранние образцы насчитывают не более 60 лет. Этот факт в связи с очень большими периодами полураспада изотопов урана усложняет точность определения отношения родительских изотопов к дочерним. Во-вторых, не все возможные соотношения изотопов технически подходят для точного вычисления возраста.

В ходе экспертизы особое внимание уделяется выявлению микроскопических «отпечатков». Это не дактилоскопическая идентификация, к чему мы привыкли в криминалистике. В экспертизе неизвестных образцов ядерных материалов ключевую роль играет анализ изотопного состава, или так называемые изотопные отпечатки урана или плутония. Однако в ряде случаев точное определение изотопного состава может быть осложнено либо исследуемый образец может представлять собой смесь материалов различного происхождения. Для точной идентификации таких образцов используют концепцию микроскопических отпечатков. Суть ее состоит в том, что определяемые при помощи оптической и электронной микроскопии микрохарактеристики по определенным критериям сравниваются с аналогичными характеристиками уже известных или подозреваемых в качестве возможных источников образцов. Даже при отсутствии образцов для сравнения можно получить полезную информацию, используя методы учета и контроля. Например, характер и плотность дислокаций могут свидетельствовать о величине деформации при производстве, а размерное распределение микрозерен характеризует температуру и степень реакции в производственном процессе [6].

Ключевыми составляющими микроотпечатков являются:

- морфология частиц;
- размер и размерное распределение микрочастиц;
- размер и размерное распределение микрозерен;
- плотность и размерное распределение пор;
- плотность и характер дислокаций;
- присутствие других фаз и компонентов.

Важной особенностью применения электронной микроскопии в изучении микроотпечатков образцов является не только высокое разрешение получаемых изображений, но и возможность проведения элементного анализа интересующих частиц при помощи анализа характеристического рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии падающих электронов с атомными оболочками элементов.

В экспертизе также применяется геолокация. Как сказано выше, это географическое место добычи. В ряде случаев существенную помощь в установлении происхождения ядерных материалов может дать знание о географическом регионе, где данный материал мог быть произведен. Для этих целей активно используются методы геолокации. В настоящее время в ядерной криминалистике географическое происхождение образцов (в зависимости от их формы) определяют тремя способами:

- по соотношению изотопов кислорода в соединении  $n(18O)/n(16O)$ , которое варьируется в зависимости от географического региона и климатических условий;

- по соотношению изотопов свинца  $p(208\text{Pb})/p(206\text{Pb})$ , которое аналогично кислороду географически варьируется;
- по наличию и количественному составу примесей и сравнению их с информацией по примесям различных урановых (ториевых) месторождений [7].

Описанные выше, а также в таблице 1, технические методы экспертизы ЯМ и аналитическая интерпретация полученных с их помощью результатов вносят существенный вклад в идентификацию и установление происхождения задержанных образцов. Однако в ряде случаев требуются дополнительные исследования и подходы. В связи с этим в ядерной криминалистике можно выделить несколько перспективных направлений развития. Это касается не только технических, но и международно-правовых аспектов, а также более тесного сотрудничества между различными ведомствами. Как, например, между странами ЕЭП и ТС, так как это позволяет создать благоприятную платформу сотрудничества. Как и Республика Беларусь, Казахстан в ближайшей перспективе намерен строить АЭС. Такое направление способствует сотрудничеству в сфере физической защиты и ядерной криминалистики в рамках ТС.

Ряд методик экспертизы ядерных материалов требует определенного минимального количества образца. В некоторых случаях имеющегося материала может быть недостаточно для того или иного метода анализа. Помимо этого, при разрушающем анализе материалов в форме топливных таблеток или других изделий требуется взять как можно меньшую пробу с исходного образца, чтобы не нарушать его целостности. В случае анализа образцов, извлеченных из проб окружающей среды или мазковых проб, размер анализируемой частицы может составлять менее микрометра. В этих случаях малые количества образцов требуют применения более высокочувствительных и высокоточных методик и техник анализа, а также совершенствования специального программного обеспечения в сторону точного числового анализа малых и сверхмалых концентраций.

Важным является также поиск новых дополнительных характеристик ядерных материалов, анализ которых позволит более эффективно и точно определить их источник и характер процессов, приведших к их появлению. Это касается как изотопного и элементного состава образцов, так и исследований макро- и микроструктуры.

Другой подход связан уже не с исследованием и выявлением характеристик образцов, а с искусственным заданием таких характеристик материалу, которые позволят однозначно его идентифицировать и определить производителя. Речь идет о применении специальных элементных меток, добавляемых в ядерное топливо при производстве и несущих информацию

о производителе и материале [8]. Эти метки представляют собой очень малые количества специально выбранных для этого элементов, добавление которых в материал не испортит его топливных и механических свойств, а также не повлияет на нейтронный поток в реакторе. Элементные метки не должны разрушаться под действием высокого облучения и должны быть относительно легко идентифицированы и проанализированы при последующей экспертизе.

Возможность их применения, подбор элементов, удовлетворяющих всем требованиям, и вопросы сохранения меток при химической переработке облученного топлива являются предметом исследований, в частности в Сандийской лаборатории в США и в других международных лабораториях по ядерной судебной экспертизе под эгидой МАГАТЭ.

В ядерной криминалистике большое внимание уделяется развитию специальных баз данных. Наличие точных результатов и данных, полученных в ходе ядерной судебной экспертизы, является лишь первым шагом в установлении происхождения задержанных ядерных материалов. Вторым шагом является интерпретация полученных результатов и поиск аналогов по базам данных. На сегодняшний день в мире существует множество разнообразных баз данных по ядерным материалам, куда внесены те или иные их характеристики. Однако информация, содержащаяся в них, практически во всех случаях является закрытой в силу государственной или коммерческой тайны, поэтому доступ к этим базам требует особых полномочий и договоренностей. Для целей ядерной криминалистики в базах данных должны быть отражены все необходимые для установления происхождения ядерного материала характеристики: изотопные «отпечатки», микроотпечатки, значения примесей и другие физические параметры. Кроме того, в такой базе должны отражаться характеристики производственных процессов, приводящих к созданию ядерных материалов.

Из-за большой сложности создания всеобъемлющей базы данных некоторые специалисты предлагают создать «базу данных ядерных баз данных» — аналоговую серию баз данных по инциденту и незаконному обороту (ITDB), которую можно использовать исключительно в режиме поиска для выявления совпадения результатов экспертизы со значениями аналогичных параметров в какой-либо из баз [9].

Эффективное расследование случаев ядерной контрабанды невозможно без тесного взаимодействия различных структур и ведомств. Поскольку ядерная криминалистика — относительно молодое направление, то процедуры взаимодействия и юридическая база находятся в процессе формирования. Безусловно, данный аспект наиболее хорошо проработан в ядерных странах и Евросоюзе, однако многие государства не обладают необходи-

мыми возможностями для ядерной судебной экспертизы, и поэтому обращаются к государствам, имеющим такие технологии. Также существует возможность проведения межлабораторных экспертиз, когда различные характеристики одного образца исследуются в различных лабораториях ядерных судебных экспертиз. Данные аспекты требуют развития юридической базы, специальных протоколов и соглашений. Часть этой работы проходит в рамках Международной технической рабочей группы по ядерной контрабанде.

Традиционная криминалистическая экспертиза является важной составляющей в установлении происхождения задержанных ядерных материалов. Зачастую ядерные и традиционные улики перемешаны, а поэтому целесообразно проводить обе экспертизы в одной лаборатории. Для экспертизы образцов пыли, причастных материалов, контейнеров, упаковок и т. д. подходит то же оборудование, что и для анализа ядерных материалов. Все это создает пространство для более тесного сотрудничества между ядерными криминалистами и органами, расследующими определенное преступление.

К настоящему времени ядерная криминалистика достигла определенных успехов в области судебной экспертизы ядерных материалов в различных формах. Несмотря на то, что незаконный оборот ядерных материалов — явление довольно редкое (с 1992 по 2007 г. зафиксировано всего 18 случаев контрабанды высокообогащенного урана и плутония), нелегальный провоз зараженных материалов и радиоактивных источников все же происходит. По оценкам МАГАТЭ, с 1997 г. зафиксировано более 2 тыс. случаев. Кроме того, методы ядерной криминалистики активно используются в целях осуществления Гарантий МАГАТЭ при анализе проб с ядерных установок и поиске «улик» переключения ядерного материала или незаконного его производства. Также дополнительно изучаются возможности судебной экспертизы радиоактивных остатков после гипотетического применения террористического ядерного взрывного устройства или «грязной бомбы» с целью определения происхождения ядерного материала, используемого в начинке. Данные задачи требуют дальнейшего совершенствования технической составляющей, баз данных и международного сотрудничества.

Используя весь свой потенциал, ядерная криминалистика успешно вписывается в рамки обеспечения национальной и международной ядерной безопасности как его составляющая. Возможность определения источника ядерного материала и, как следствие, всей цепочки незаконного оборота может оказать определенный эффект сдерживания на тех, кто пытается его незаконно заполучить, а также позволит укрепить слабые участки в системах его учета, контроля и физической защиты.

## Литература

1. Mayer K., Wallenius M., Fanghannel T. Nuclear Forensic Science — from Cradle to Maturity // *Journal of Alloys and Compounds*. 2007. № 444–445. P. 50–56.
2. Nuclear Forensics Support // IAEA Nuclear Security Series no. 2. Vienna : The Agency, 2006. — 81 p. // IAEA Official web-site [Electronic resource]. — Mode of access : [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1241\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1241_web.pdf). — Date of access : 25.06.2010.
3. Illicit Trafficking Database // IAEA Official web-site [Electronic resource]. — Mode of access : <http://www-ns.iaea.org/security/itdb.htm>. — Date of access : 01.08.2010.
4. Kristo M. J. et al. Model Action Plan for Nuclear Forensics and Nuclear Attribution // Lawrence Livermore National Laboratory [Electronic resource]. — 2004. — Mode of access : <https://e-reportsext.llnl.gov/pdf/305453.pdf>. — Date of access : 15.01.2010.
5. Pajo L. UO<sub>2</sub> Pellet Impurities, Pellet Surface Roughness and n(18O)/n(16O) Ratios Applied to Nuclear Forensic Science // The National Library of Finland [Electronic resource]. — Mode of access : <https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/2797/uo2fuelp.pdf?sequence=1>. — Date of access : 15.01.2010.
6. Ray I. L. F., Schubert A., Wallenius M. A concept of a “microstructural fingerprint” for the characterization of samples in Nuclear Forensic Science // International Conference on Advances in Destructive and Non-destructive Analysis for Environmental Monitoring and Nuclear Forensics, 21. — 23.10.2002, Karlsruhe, Germany.
7. Niemeyer S., Hutcheon I. Geolocation and Route Attribution in Illicit Trafficking of Nuclear Materials // Lawrence Livermore National laboratory [Electronic resource]. — 1999. — Mode of access : <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/235370.pdf>. — Date of access : 14.02.2010.
8. Kristo M., Robel M., Hutcheon I. Nuclear Forensics and Attribution for Improved Energy Security : the Use of Taggants in Nuclear Fuel // Lawrence Livermore National laboratory [Electronic resource]. — 2007. — Mode of access : <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/346122.pdf>. — Date of access : 15.02.2010.
9. May M. Et al. Nuclear Forensics. Role, State of the Art, Program Needs // Stanford University [Electronic resource]. — 2007. — Mode of access : [http://iisdb.stanford.edu/pubs/22126/APS\\_AAAS\\_2008.pdf](http://iisdb.stanford.edu/pubs/22126/APS_AAAS_2008.pdf). — Date of access : 20.02.2010.