УДК 614.876

АВАРИЙНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОБЛУЧЕНИЕ: НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ

Д.В. Арефьева, Ю.В. Грабский, Д.Д. Куруч, Ю.С. Турлаков, В.Б. Фирсанов
Федеральное государственное унитарное предприятие НИИ промышленной и морской медицины ФМБА России

Ключевые слова. Радиационные аварии, внутреннее облучение, дозиметрия, спектрометрические исследования.

Аннотация. Для определения перспективных направлений работ по повышению эффективности спектрометрических исследований, проводимых при ликвидации последствий радиационных аварий, выполнен обзор используемых и перспективных спектрометров излучений человека, средств и способов их градуировки, систем детектирования. Обоснована целесообразность разработки переносного, а также высокочувствительного передвижного спектрометров излучений человека для оперативной оценки поступления радионуклидов в организм человека в начальный период радиационной аварии.

EMERGENCY INTERNAL EXPOSURE: DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF OPERATIONAL CONTROL DEVICES

Arefyeva D.V., Grabsky Y.V., Kuruch D.D., Turlakov Y.S., Firsanov V.B.
Research Institute of Industrial and Maritime Medicine of the FMBA of Russia

Key words: Radiation accidents, internal exposure, dosimetry, spectrometry

Abstract. In order to determine the promising directions of work to improve the effectiveness of spectrometry conducted during the elimination of the consequences of radiation accidents, a review of the used and prospective spectrometers of human radiation has been carried out, means and ways of grading them, detection systems. The feasibility of developing portable and highly sensitive mobile human radiation spectrometers for rapid assessment of radionuclide levels in humans in the event of a radiation accident is substantiated.

Введение. Вероятность возникновения радиационных аварий в ходе эксплуатации и промышленной утилизации атомных электростанций, кораблей и судов с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) при условии соблюдения норм безопасности оценивается как весьма низкая, однако последствия таких аварий могут привести к значительному радиоактивному загрязнению и ущербу для персонала и населения. Одним из мероприятий обеспечения радиационной безопасности персонала и населения является послеаварийный радиационный контроль, включающий прогноз эффектов поражения на начальном этапе аварии на основе оперативной

информации о воздействующих радиационных факторах, в том числе о дозах внутреннего облучения.

При возможных авариях на объектах с ядерными энергетическими установками состав инкорпорированных радионуклидов может быть достаточно сложным с большой долей короткоживущих продуктов ядерного деления. Если обследование пострадавших не проведено в ближайшие 10-12 ч после поступления радионуклидов в организм, то информация о внутреннем облучении будет безвозвратно потеряна из-за распада короткоживущих радионуклидов. При этом необходимо иметь в виду, что зарегистрированные от тела человека, либо от отдельных органов спектры гамма-излучения достаточно трудно расшифровать, что ограничивает применение традиционных методов оценки дозы внутреннего облучения.

Выполнение плановых защитных медико-санитарных мероприятий, проводимых при ликвидации последствий возможных радиационных аварий на объектах с ЯЭУ, должно включать приборно-методическое обеспечение оперативного послеаварийного контроля внутреннего облучения, особенно в случаях сложного состава инкорпорированных радионуклидов. Оперативная оценка (на начальном этапе радиационной аварии) уровней поступления радионуклидов в организм человека обеспечивает специалистов в области радиационной медицины объективной информацией для диагностики и прогнозирования состояния пострадавшего.

Целью настоящей работы явилось определение направлений совершенствования приборно-методического обеспечения контроля доз внутреннего облучения персонала и населения на начальном этапе радиационной аварии с выходом продуктов ядерного деления.

Материалы и методы. Проведен анализ тенденций развития методологии и технического обеспечения спектрометрии излучения человека применительно к текущему, оперативному и аварийному контролю. В публикациях Международной комиссии по радиологической защите обозначены основные направления развития радиационной защиты [1, 5]. Предложен ряд нововведений в доктрину предотвращения радиационных рисков, а рекомендации по их практическому применению были распространены на большое число ситуаций, связанных с облучением человека. Дальнейшие разработки в области дозиметрии и радиационной защиты касаются, в частности, методов измерения физических величин, характеризующих облучение человека. Одним из направлений совершенствования методов измерения, средств измерений и методик является аппаратурное обеспечение текущего, оперативного и аварийного

контроля с использованием прямых (in-vivo) методов определения. Объектом контроля является, в частности, контроль доз внутреннего облучения персонала и населения в контролируемых условиях, а также в условиях выхода источника из-под контроля.

Для определения индивидуальных доз внутреннего облучения применяют прямые и косвенные методы контроля. В прямом методе используются спектрометры излучения человека (СИЧ), имеющие в составе полупроводниковые или сцинтилляционные блоки детектирования, блоки питания и усиления импульсов, многоканальные анализаторы импульсов и соответствующую защиту (защитные камеры, теневую защиту). На практике применяют различные типы СИЧ с учетом задач радиационного контроля, характеристик и условий применения средств измерения.

Условно их можно разделить на три типа:

- СИЧ первого типа – применяются для массовых обследований населения на территориях, загрязненных радиоактивными веществами в результате аварий;
- СИЧ второго типа – применяются для периодического радиационного контроля персонала и населения;
- СИЧ третьего типа – применяются для текущего радиационного контроля персонала и населения.

Применительно к условиям повышенного (потенциально опасного) облучения разработаны методические указания Роспотребнадзора [4]. Они основаны на требованиях НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010, а также концепций и подходов, изложенных в руководстве по мониторингу при ядерных или радиационных авариях IAEA-TECDOC-1092/R [2] и руководстве по радиационной защите при авариях на ядерных реакторах IAEA-TECDOC-955/R [3].

С использованием СИЧ может быть обнаружено и идентифицировано свыше 40 гамма-излучающих радионуклидов, поступивших в организм при радиационных авариях. В зависимости от инцидента одновременно могут наблюдаться до 10-12 радионуклидов с достаточно сложным суммарным спектром гамма-излучения. За исключением СИЧ на основе полупроводниковых детекторов, применяемые в большинстве установок блоки детектирования на основе монокристаллов иодида натрия, активированного таллием (NaI(Tl)), имеют энергетическое разрешение по гамма-линии 661,7 кэВ радионуклида цезий-137 в диапазоне от 7 до 10%, что приводит к практически неразрешимой задаче определения активности в

организме в случае поступления нескольких радионуклидов без проведения соответствующих дополнительных градуировок СИЧ.

Результаты исследования. Нами проведен анализ характеристик 11 образцов СИЧ отечественного и зарубежного производства всех трёх типов (первого типа – СЕГ-10П, СКГ-АТ1322, СКГ-АТ1316, СИЧ-АКП-3; второго типа – Standfast II, Fastscan, Accuscan, Accuscan-II; третьего типа – СИЧ-9.1М, СИЧ-100, СИЧ-Э), а также средств метрологического обеспечения измерений.

Анализ перечня и характеристик современных СИЧ (в том числе используемых в ФГУП НИИ ПММ) позволяет сделать вывод о том, что технический уровень разработки отечественных и зарубежных изделий практически совпадает. Имеющиеся различия связаны с их назначением. В качестве средств метрологического обеспечения измерений в настоящее время для получения градуировочных коэффициентов при различных геометриях измерения (во всем теле, легких, щитовидной железе и других органах) широко используются различного типа фантомы. Перспективным направлением является расчет дозы от внешнего и внутреннего облучения с использованием условных вычислительных фантомов тела человека, разработанных на основе медицинских томографических изображений, что позволит заменить различные математические модели, используемые в расчетах [2].

Применение современных методов расчета переноса излучений через вещество дает возможность упростить решение практических задач по разработке, оптимизации и калибровке самых разнообразных систем детектирования ионизирующих излучений, что позволяет решать следующие задачи, например:

- улучшить тактико-технические характеристики указанных систем, в частности, предел допускаемой основной погрешности характеристики преобразования, расширить диапазон их применения;
- сократить время и расход средств на их проектирование и оптимизацию;
- получать характеристики системы регистрации для радиоактивных источников, недоступных в обычной практике;
- избежать или сократить проведение экспериментальных исследований, в частности смоделировать взаимодействие ионизирующего излучения инкорпорированных в теле или отдельных органах человека радионуклидов с детектирующей системой (градуировка СИЧ).

Использование фантомов в совокупности с математическими моделями и условными вычислительными фантомами тела человека, разработанными на основе медицинских томографических изображений, позволит обеспечить

преемственность результатов измерений и уменьшить неопределенность результатов контроля внутреннего облучения.

В последнее время разработаны новые типы детекторов, которые могут быть использованы для разработки СИЧ на основе современных сцинтилляторов с улучшенными энергетическим разрешением и эффективностью регистрации. Возможность изготовления кристаллов галогенидов лантана, легированных церием ($LaBr_3(Ce)$ и $LaCl_3(Ce)$), больших размеров представляет собой наиболее значимое достижение современных технологий в приложении к сцинтилляционным методам регистрации ионизирующих излучений [6]. Применение блоков детектирования на основе таких кристаллов, имеющих энергетическое разрешение по гамма-линии 661,7 кэВ радионуклида цезий-137 около 3%, позволит значительно облегчить расшифровку измеренных гамма-спектров и расчет инкорпорированной активности в случае поступления в организм сложной смеси радионуклидов.

Результаты анализа номенклатуры применяемых в настоящее время технических средств и тенденций развития технологий позволили сделать вывод о необходимости совершенствования приборно-методического обеспечения дозиметрического контроля при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций радиационного характера и определить его основные направления:

- разработка экспресс-методик оценки доз персонала и населения в случае радиационной аварии на объектах использования атомной энергии;
- создание мобильных (переносных) установок СИЧ, необходимых для проведения оперативного послеаварийного (в период до 10-12 ч после инцидента) обследования персонала и населения на содержание радионуклидов в организме;
- создание высокочувствительных транспортабельных (передвижных) СИЧ для обследования в период до нескольких суток после аварии.

Порядок применения оборудования на различных этапах послеаварийного контроля приведен в таблице.

Таблица

Этапность послеаварийного контроля внутреннего облучения

Время после аварии	Цель	Метод получения информации	Характер полученной информации
(3-5) 7 ч	Установление факта инкорпорации гамма-излучающих	Радиометрия гамма-излучения всего тела с	Скорость счета свыше контрольного

	радионуклидов и выявление лиц, подлежащих дальнейшему обследованию на переносном СИЧ	помощью переносного СИЧ, производимая после дезактивации поверхностного загрязнения (первое измерение)	уровня, говорящая о наличии и ориентировочно о степени инкорпорации радионуклидов
(5-10) 12 ч	Оценка начального уровня суммарного поступления радионуклидов и оценка вклада внутреннего облучения в сочетанное для прогнозирования возможных ближайших эффектов	Повторная радиометрия гамма-излучения всего тела с помощью переносного СИЧ (второе измерение)	Определение по результатам двух измерений уровня начального поступления сумм радионуклидов и вклада внутреннего облучения в сочетанное облучение
7…24 ч	Оценка поглощенных доз излучения в легких и щитовидной железе	Радиометрия гамма-излучения легких и щитовидной железы с помощью переносного СИЧ	Оценка доз внутреннего облучения легких и щитовидной железы
> 2 сут.	Уточнение доз внутреннего облучения от долгоживущих и медленно выводящихся радионуклидов, их распределения по организму и эффективности применения лечебных мероприятий	Гамма-спектрометрия излучения всего тела и органов человека на высокочувствительном СИЧ	Содержание отдельных радионуклидов, их распределение по органам и индивидуальный период их полувыведения

В качестве аналогов для разработки перспективных средств оперативного послеаварийного контроля внутреннего облучения целесообразно определить СИЧ первого типа – транспортабельные устройства с ограниченной по весу теневой защитой. Они могут применяться как для оперативной оценки уровней поступления радионуклидов в организм человека, так и для уточнения доз внутреннего облучения от долгоживущих и медленно выводящихся радионуклидов и их распределения в организме. Развитие системы детектирования СИЧ путем применения блоков детектирования на основе кристаллов $LaBr_3(Ce)$ является, на наш взгляд, предпочтительным вариантом для обеспечения чувствительности и оперативности послеаварийного контроля внутреннего облучения в случае сложного состава инкорпорированных радионуклидов.

Таким образом, для повышения эффективности спектрометрических исследований, проводимых при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций радиационного характера, необходимы целевые исследования и разработки. Ожидаемым результатом является создание для аварийных медико-санитарных формирований, организаций и учреждений ФМБА России нового средства дозиметрии внутреннего облучения – передвижного автоматизированного высокочувствительного комплекса спектрометрии излучения человека (ПАВК СИЧ), включающего:

– малогабаритный переносной СИЧ на основе одного сцинтилляционного блока детектирования, предназначенный для оперативного (в период до 10-12 ч после аварии) измерения в спектрометрическом режиме потока излучения от всего тела, легких или щитовидной железы;

– многофункциональный высокочувствительный передвижной СИЧ с применением детекторов на основе современных сцинтилляторов, предназначенный для уточнения состава, активности и распределения по органам инкорпорированных радионуклидов.

Оптимальным вариантом является размещение ПАВК СИЧ на базе транспортного логистического контейнера. Это позволит осуществлять повседневную эксплуатацию комплекса в стационарных условиях, поддерживать его в оперативной готовности и выполнять перевозку практически любым видом транспорта (наземным, морским, воздушным) с целью обеспечения требуемых временных лимитов доставки к месту аварии.

Обязательным элементом совершенствования технических средств контроля является развитие способов и средств градуировки СИЧ. При этом необходимо разрабатывать не только новые стандартные образцы веществ

(материалов) в виде фантомов, но и математические модели. В частности, имитационную математическую модель взаимодействия ионизирующего излучения инкорпорированных в теле человека радионуклидов с детектирующей системой.

Заключение. Совершенствование методического обеспечения послеаварийной дозиметрии внутреннего облучения должно заключаться в разработке методик выполнения измерений с использованием ПАВК СИЧ, алгоритмов экспресс-оценки дозы внутреннего облучения, а также методических рекомендаций по определению ожидаемой эффективной дозы по результатам измерений активности радионуклидов в теле человека.

Список литературы

1. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 года. Публикация 60 МКРЗ. Ч. 2. Перевод с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1994.

2. Руководство по мониторингу при ядерных или радиационных авариях. МАГАТЭ, Вена. IAEA-TECDOC-1092/R ISSN 1011-4289. IAEA, 2002.

3. Руководство по радиационной защите при авариях на ядерных реакторах. IAEA-TECDOC-955/R. МАГАТЭ. 1998.

4. Оперативная оценка доз облучения населения при радиоактивном загрязнении территории воздушным путем. Методические указания (МУ 2.6.12153-06).

5. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

6. Pania, R. $LaBr_3$:Ce crystal: The latest advance for scintillation cameras [Text] / R. Pania, R. Pellegrinia, M.N. Cintia, P. Bennatia, M. Betti // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2007. – Vol. 572, Issue 1. – P. 268-269.

References

1. Radiation security. Recommendations from the 1990 ICRP. Publication 60 ICRP. Part 2. Translated from English. - M.: Energoatomizdat, 1994.

2. Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency. IAEA, Vena. IAEA-TECDOC-1092/R ISSN 1011-4289, IAEA, 2002.

3. Generic assessment procedures for determining protective actions during a reactor accident. IAEA-TECDOC-955/R. IAEA, 1998.

4. Rapid assessment of radiation doses of the population in case of radioactive contamination of the territory by air. Guidelines (МУ 2.6.12153-06).

5. Publication 103 of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Translated from English /Under the general ed. M.F. Kisheleva

and N.K. Shandala. M.: Edd. Alana, 2009/

6. Pania R., Pellegrinia R., Cintia M.N., Bennatia P., Betti M. $LaBr_3$:Ce crystal: The latest advance for scintillation cameras // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Volume 572, Issue 1, 1 March 2007, Pages 268-269.

Сведения об авторах: Дарья Владимировна Арефьева – и.о. заведующего лабораторией ФГУП НИИ ПММ ФМБА России. Тел.: 8 (812) 415-94-31; E-mail: niipmm@fmbamail.ru; **Юрий Валентинович Грабский** – кандидат медицинских наук, заместитель директора по развитию ФГУП НИИ ПММ ФМБА России. Тел.: 8 (812) 415-94-32, 8 (903) 778-85-71; E-mail: niipmm@fmbamail.ru, yugrabsky@yandex.ru; **Дмитрий Дмитриевич Куруч**– инженер-исследователь ФГУП НИИ ПММ ФМБА России. Тел.: 8 (812) 415-94-31; E-mail: niipmm@fmbamail.ru; **Юрий Сергеевич Турлаков**– доктор медицинских наук, старший научный сотрудник, и.о. директора ФГУП НИИ ПММ ФМБА России. Тел.: 8 (812) 415-94-31; E-mail: niipmm@fmbamail.ru; **Владимир Борисович Фирсанов** – инженер-исследователь ФГУП НИИ ПММ ФМБА России. Тел.: 8 (812) 415-94-31; E-mail: niipmm@fmbamail.ru