

Национальная Академия наук Беларуси  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

УДК 621.039.58+539.1.074+519.245

УЛАНОВСКИЙ  
Александр Васильевич

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ  
АВАРИЯХ НА АЭС

05.14.03 "Ядерные энергетические установки"

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Минск – 1999

Работа выполнена в Институте проблем энергетики Национальной академии наук Беларуси и в Научно-исследовательском клиническом институте радиационной медицины и эндокринологии Минздрава Республики Беларусь

Научный руководитель – кандидат технических наук Савушкин И.А.

Научный консультант – кандидат биологических наук Миненко В.Ф.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Тарутин И.Г.

доктор технических наук Трифонов А.Г.

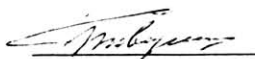
Оппонирующая организация - Институт радиационных физико-химических проблем Национальной академии наук Беларуси

Защита состоится 6 июля 1999 г. в 12<sup>00</sup> ч на заседании Совета по защите диссертаций Д01.10.01 Института проблем энергетики Национальной Академии наук Беларуси по адресу: 220109, Минск, Сосны, ИПЭ НАНБ.  
Телефон ученого секретаря Совета: 246-75-93.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПЭ НАНБ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1999 г.

Ученый секретарь Совета  
по защите диссертаций  
доктор технических наук



Б.Е. Тверковкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

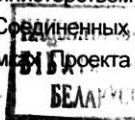
Актуальность темы. Аварии на АЭС, сопровождающиеся выбросом радиоактивных материалов в окружающую среду, приводят к облучению как персонала станции, так и населения. Поступление радионуклидов в организм человека является причиной внутреннего облучения. Методы оценки доз внутреннего облучения, использующие прямые инструментальные измерения, являются потенциально наиболее точными и надежными.

Основные проблемы при использовании прямых инструментальных методов контроля внутреннего облучения связаны с процессом калибровки измерительного устройства: а) сложность геометрии измерения, поскольку объект измерения (тело человека) варьирует значительно как по размерам, так и по форме; б) распределение радионуклидов в теле в зависимости от их химических свойств изменяется значительно от равномерного как, например, в случае Cs или K, до практически точечного в случае I; в) сложность, а в ряде случаев и невозможность приготовления стандартных образцовых источников короткоживущих радионуклидов. Проблемы калибровки могут быть более эффективно решены путем численного математического моделирования приборов и их калибровочных характеристик, поскольку альтернативный процесс калибровки с использованием специальных фантомов тела человека и образцовых радиоактивных источников зачастую оказывается более трудоемким, значительно более дорогим, а также не всегда может обеспечить получение необходимой информации о приборе.

Таким образом, разработка и применение подхода для математического моделирования измерений радиоактивности в теле человека (а, в принципе, в любых других объектах сложной геометрии и состава) является весьма актуальной задачей, что подтверждается ростом интереса в последние годы к решению методом Монте-Карло таких задач, как  $\gamma$ -спектрометрия нестандартных образцов и полевая  $\gamma$ -спектрометрия.

В настоящей работе используется метод Монте-Карло для моделирования измерений, выполнявшихся в Белоруссии после Чернобыльской аварии, с целью измерения активности радиойода в ЩЖ. Важность решения задачи по реконструкции доз облучения ЩЖ обусловлена, в первую очередь, значительным ростом числа случаев рака ЩЖ у лиц, бывших в момент аварии детьми или подростками. Поскольку результаты, так называемых, "прямых" измерений радиойода в ЩЖ способны предоставить наиболее надежную основу для реконструкции доз, то математическое моделирование методом Монте-Карло таких измерений позволяет получить информацию о характеристиках приборов в условиях, сложившихся в мае-июне 1986 г. в период проведения этих измерений.

Связь с научными программами и темами. Данная работа выполнялась в Научно-исследовательском клиническом институте радиационной медицины и эндокринологии Минздрава Республики Беларусь и в Институте проблем энергетики Национальной академии наук Беларуси, в основном, в рамках дозиметрической части белорусско-американского "Протокола по изучению рака и других заболеваний щитовидной железы в Белоруссии после Чернобыльской аварии", заключенного между Министерством здравоохранения Республики Беларусь и Департаментом энергетики Соединенных Штатов Америки. Отдельные этапы исследования были выполнены в рамках проекта ECP-10



"Retrospective dosimetry and dose reconstruction", выполнявшегося в 1991 – 1995 гг. по программе международного сотрудничества Европейского сообщества, Беларуси, Российской Федерации и Украины по изучению последствий Чернобыльской аварии.

Цель и задачи исследования. Цель работы состоит в разработке и применении подхода, использующего моделирование методом Монте-Карло измерений активности радионуклидов, инкорпорированных в организм человека, для анализа источников погрешности прямых измерений активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ после Чернобыльской аварии, в аварийных ситуациях и при нормальной эксплуатации АЭС различных типов. Для достижения указанной цели решались следующие основные задачи:

- 1) разработка и тестирование математических моделей тела человека и детекторов;
- 2) моделирование различных условий измерения активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ человека приборами СРП-68-01 и ДП-5;
- 3) изучение степени влияния различных «мешающих» факторов на оценку содержания  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ в момент измерения.

Объект и предмет исследования. Объектом изучения являются методы и средства инструментального контроля внутреннего облучения человека. Предмет исследования охватывает характеристики дозиметрических приборов в условиях, соответствующих условиям реальных измерений активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ в Беларуси в начальный период после Чернобыльской аварии в мае-июне 1986 г.

Методология и методы проведенного исследования. Используется метод стохастического моделирования переноса излучения в веществе – метод Монте-Карло. Применение данного метода позволяет моделировать отклик приборов при измерениях активности радионуклидов, находящихся в теле человека. Альтернативный путь – экспериментальные исследования с применением физических антропоморфных фантомов тела человека и образцовых радиоактивных источников. Однако реализация экспериментального исследования затрудняется сложностью и высокой стоимостью изготовления и аттестации образцовых радиоактивных источников и фантомов. Кроме того, в ряде случаев, например для короткоживущих изотопов йода, невозможно или весьма сложно использовать образцовые источники. По этой причине для успешного решения задачи моделирования отклика приборов был выбран комбинированный подход. А именно, для относительно простых случаев были получены экспериментальные данные, которые использовались затем для разработки и тестирования моделей детекторов и тела человека, что позволило применять данные модели для изучения более сложных практически важных ситуаций.

Научная новизна:

- 1) Разработан и апробирован новый реалистичный возрастно-зависимый математический фантом щитовидной железы.
- 2) Разработан набор модифицированных возрастно-зависимых математических фантомов человека, отличающихся более реалистичным описанием, для устранения систематической погрешности, вносимой стандартными фантомами.
- 3) Получены новые расчетные данные о практически важных характеристиках дозиметрических приборов СРП-68-01 и ДП-5:

а) калибровочные коэффициенты, зависящие от возраста человека, по нуклидам  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ , локализованным в теле человека;

б) энергетическая зависимость чувствительности приборов ("ход с жесткостью");

в) зависимость чувствительности от ориентации детектора.

4) Выполнена оценка погрешностей прямых измерений активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ человека и проведен анализ влияния условий измерений на значение измеренной активности.

Практическая значимость. Данное исследование выполнялось, прежде всего, для реконструкции доз облучения ЩЖ после Чернобыльской аварии в 1986 г. Результаты, полученные в ходе исследования, обеспечивают большую надежность ретроспективных дозиметрических оценок и, как следствие, оказывают значительную поддержку эпидемиологическим исследованиям риска рака ЩЖ, вызванного облучением вследствие радиационной аварии.

Кроме того, практическая значимость результатов работы заключается в возможности применения разработанного подхода для изучения таких характеристик ядерно-физических приборов, которые сложно или невозможно получить, используя традиционные способы калибровки с применением образцовых источников.

Данный подход может быть широко применен при ретроспективном анализе аварийных ситуаций, а также для подготовки приборов и методик измерения к применению в аварийных ситуациях и в практике нормальной эксплуатации АЭС различных типов. В частности, разработанный подход, включающий в себя набор математических фантомов человека, может быть эффективно использован для исследования характеристик спектрометров и счетчиков излучения человека, для ретроспективного изучения измерений, выполненных ранее. Например, в настоящее время подход используется при разработке экспертного СИЧ в рамках п. 3.2.2.7. Государственной научно-технической программы "Радиозкология".

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- 1) Новый реалистичный математический фантом ЩЖ человека для различных возрастов, включая период внутриутробного развития.
- 2) Новое, более реалистичное геометрическое описание стандартных математических фантомов тела человека МКРЗ.
- 3) Рассчитанные методом Монте-Карло характеристики дозиметрических приборов для использования в реконструкции доз облучения ЩЖ.
- 4) Оценка влияния на результаты измерений активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ таких факторов, как нарушение геометрии измерения, вклад в показания приборов от радионуклидов, распределенных в теле человека.
- 5) Способ "математической" калибровки дозиметрических приборов для использования при разработке новых средств и методик радиационного контроля.

Личный вклад соискателя. В диссертации представлены результаты научных исследований, выполненных автором самостоятельно, а также при его участии в 1991 – 1999 гг. Лично автором: 1) выполнены спектрометрические измерения; 2) разработаны математические фантомы ЩЖ; 3) модифицированы стандартные фантомы тела человека; 4) разработаны и протестированы модели детекторов; 5) выполнены расчеты метрологических характеристик и возрастно-зависимых калибровочных коэффициентов прибо-

ров: 6) выполнены обработка и анализ результатов, оценка погрешностей; 7) представлены результаты работы и сформулированы основные выводы.

Автор благодарит В.Ф.Миненко (НИКИ РМиЭ), В.А.Кожемякина и В.Д.Гузова (ГНПП "Атомтех"), И.А.Савушкина и В.В.Дроздовича (ИПЭ НАНБ), К.Ф.Эккермана (ОРНЛ) за помощь в проведении исследований, ценные обсуждения и замечания по работе.

Апробация и опубликованность результатов. Результаты работы были представлены на двух Международных совещаниях "Реконструкция доз" в г. Бад-Хоннеф (Германия) в 1994 и 1995 гг., на Международном совещании "Поступление радионуклидов в организм человека" в г. Авиньон (Франция) в 1997 г., опубликованы в 6-ти статьях (30 стр.) в журналах "Известия АН Беларуси", "Health Physics", "Radiation Protection Dosimetry" и в отчете по проекту ЕСР-10; в 1-м докладе (12 стр.) на международной конференции; в 3-х тезисах докладов (5 стр.) на всесоюзном совещании и республиканских конференциях; 4-х препринтах (126 стр.) ИПЭ НАН Б и НИКИ РМиЭ Минздрава РБ, докладывались на научных семинарах в Ок-Риджской национальной лаборатории (США) и Ядерно-технологическом институте (Португалия).

#### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 110 страницах машинописного текста и содержит 35 рисунков и 23 таблицы. Список литературы содержит 96 библиографических ссылок.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечается, что проблема облучения человека при авариях на предприятиях атомной энергетики вызывает наибольшую озабоченность общества, особенно, после Чернобыльской аварии. Изучение медико-биологических последствий Чернобыльской аварии дает дополнительный импульс к дальнейшему развитию принципов и норм радиационной защиты, уточнению и анализу факторов радиационного риска, сопутствующего использованию ядерных источников энергии.

Специфика послеаварийного дозиметрического контроля заключается в том, что облучаемая группа не ограничивается только персоналом АЭС, а включает в себя представителей всех возрастных групп населения. Зачастую средства и методики дозиметрического контроля, разработанные для случаев профессионального облучения, не отвечают критериям точности или качества дозиметрического мониторинга населения, поэтому особое значение приобретает проблема заблаговременной калибровки приборов и анализа возможных условий применения в аварийных условиях. Традиционным способом калибровки ядерно-физических приборов и средств радиационного контроля является использование образцовых средств: стандартных радиоактивных источников, эталонов экспозиционной дозы. Альтернативным способом является моделирование, т.н. "математическая" калибровка, когда искомые характеристики исследуемого прибора не измеряются, а рассчитываются или воспроизводятся в численном эксперименте. Оба метода – использование образцовых источников и численное моделирование – не отвергают друг друга, наоборот, недостатки одного компенсируются достоинствами другого, по-

этому эти подходы следует рассматривать как взаимодополняющие. Одним из наиболее перспективных является метод стохастического моделирования – метод Монте-Карло.

В данной работе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой, обоснованием и использованием способа моделирования измерений, выполняемых с различными дозиметрическими приборами. Используется метод Монте-Карло для описания процесса переноса излучения в теле человека и в детекторе прибора и математические фантомы тела человека, которые основаны на стандартных дозиметрических фантомах МКРЗ.

**В первой главе** рассмотрены пути облучения и меры защиты населения после радиационной аварии на АЭС, основные задачи инструментального дозиметрического контроля в ситуациях, связанных с аварийным облучением населения. Мониторинг отдельных лиц из населения после крупной аварии является наиболее надежным способом оценки доз внутреннего облучения. Рассматриваются только инструментальные методы контроля внутреннего облучения, а именно, прямое прижизненное измерение активности радионуклидов в организме человека. В аварийной ситуации большое значение имеет заблаговременная подготовка средств измерений, наличие адекватных образцовых средств поверки и контроля точности, стандартизация методик поверки (метрологической аттестации), методик измерения и интерпретации данных. Только при выполнении отмеченных выше условий можно избежать импровизации и ошибок при организации программы мониторинга в аварийной ситуации. Так, например, развертывание программы мониторинга внутреннего облучения населения после Чернобыльской аварии сдерживалось отсутствием средств калибровки, учитывающих возраст человека [1, 11], (МАГАТЭ, 1991). В этих условиях одной из наиболее важных задач стала разработка системы калибровочных фантомов тела человека, учитывающих возрастные и антропометрические характеристики населения [13], (НИИ ГМТ, 1991).

Среди лиц, подвергшихся облучению после Чернобыльской аварии, наибольшие значения дозы наблюдались у ликвидаторов (доза на все тело) и у детей (доза на ЩЖ). На сегодняшний день, прежде всего резкий рост числа случаев рака ЩЖ, намного превосходящий все ранние оценки, вызывает максимальную озабоченность в мире (Демидчик с соавт., 1996), (Тронько с соавт., 1996), (Цыб с соавт., 1996), (Astakhova et al., 1998). Данные (Pacini et al., 1997) подтверждают, что рост заболеваемости, начиная с 1990 г., был значительным и достоверным, превышающим фоновые значения более чем на порядок. Оценка факторов радиационного риска возникновения рака ЩЖ является одной из наиболее важных задач радиационной защиты.

Выявить связь между облучением и возникновением рака ЩЖ, оценить величину риска радиационно-индуцированного рака – это задачи, решаемые в эпидемиологических исследованиях. В Беларуси уже завершено одно эпидемиологическое исследование типа "случай-контроль" (Astakhova et al., 1998), продолжаются исследования, проводимые совместно с Национальным институтом рака США и Комиссией Европейского сообщества. В эпидемиологическом когортном исследовании первостепенную важность имеет знание индивидуальных доз облучения, опирающихся на результаты прямых измерений активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ. В Белоруссии после Чернобыльской аварии в мае-июне 1986 г. было выполнено более 200 тыс. измерений ЩЖ. Результаты примерно 130 тыс. измерений

сформировали базу данных (Гаврилин с соавт., 1992), которая используется в эпидемиологических исследованиях.

При расчете доз облучения ЩЖ с использованием результатов прямых измерений активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ необходимо: 1) знать калибровочные характеристики прибора и учесть влияние геометрии измерения, присутствия в ЩЖ других изотопов йода, внутреннего и внешнего радиоактивного загрязнения тела человека в момент измерения, величины и неравномерности фона в месте измерений; 2) оценить кинетику содержания  $^{131}\text{I}$  в организме человека в зависимости от характера и хронологии радиоактивных выпадений в конкретном населенном пункте, параметров перехода  $^{131}\text{I}$  по пищевым цепям, проведения йодной профилактики, выездов, переселения или эвакуации населения, характера потребления загрязненных продуктов питания. В данной работе рассматриваются только погрешности, связанные с оценкой активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ в момент измерения.

В мае-июне 1986 г. в Белоруссии для измерения радиойода в ЩЖ использовались: радиометр СРП-68-01, дозиметры ДП-5 и ДРГЗ-03. Анализ и обработка результатов измерений, выполненных с этими приборами, затрудняется следующими причинами:

- приборы функционировали в радиометрическом режиме, поэтому не только  $^{131}\text{I}$ , но и другие радионуклиды могли вносить вклад в показания приборов;
- как правило, эти приборы использовались без защитных коллиматоров, что означало, что радионуклиды, находившиеся в теле человека и/или на коже, одежде, в волосах также могли влиять на показания приборов;
- при измерениях детекторы этих приборов размещались вплотную к поверхности шеи, поэтому из-за близкого расположения детектора и ЩЖ изменения в размерах и положении ЩЖ вносили дополнительную погрешность.

Первоначальные попытки калибровки приборов были экспериментальными, однако, они не достигли успеха из-за неадекватности имевшихся физических фантомов поставленным задачам. Изготовление и аттестация образцовых радиоактивных источников и антропоморфных фантомов тела человека – сложная и дорогостоящая процедура, а в случаях, когда необходимо использование короткоживущих радионуклидов, таких как  $^{131}\text{I}$ , практически нереализуемая.

Задача настоящего исследования заключалась в применении метода Монте-Карло для моделирования условий измерения активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ в ранний период после аварии на ЧАЭС. Для решения данной задачи были разработаны математические модели детекторов и тела человека, а также общий методический подход для моделирования показаний приборов и предсказания таких характеристик детекторов, которые невозможно или невыгодно исследовать экспериментально, например, калибровочных коэффициентов для различных вариантов локализации радионуклидов в теле человека различного возраста или зависимости отклика детекторов от энергии и угла падения излучения.

**Вторая глава** посвящена описанию материалов и методов исследования. Изучались характеристики приборов СРП-68-01 и ДП-5, применявшихся для радиометрии ЩЖ после Чернобыльской аварии в Беларуси. Прибор СРП-68-01 имеет сцинтилляционный блок детектирования на основе кристалла  $\text{NaI(Tl)}$ . Дозиметр ДП-5 имеет блок детектирования на основе счетчиков Гейгера-Мюллера в металлическом корпусе с окном для одновременного измерения  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения (т.н. режим измерения "Б+Г").



Экспериментальные исследования зависимости показаний радиометра СРП-68-01 и дозиметра ДП-5 производились на стандартной поверочной установке НПП "Атомтех" по ГОСТ-27451-87 с источниками  $\gamma$ -излучения:  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57,60}\text{Co}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ; кроме того, использовались стандартные источники ОСГИ-3-2, унифицированный фантом тела человека УФ-02Т и фантом ЩЖ ФЩЖ-04Т (НИИ ГМТ, 1991) трех типоразмеров, соответствующих возрастной сетке 6, 12 и 20 лет.

Расчеты выполнялись с использованием программ EGS4-M (Ланцов с соавт., 1992), [2] и MCNP4 (Briestmeister, 1993), библиотеки сечений для фотонов и электронов DLC-181 (Hedricks et al., 1994). Для визуализации геометрии задачи применялись программы SABRINA (Van Riper, 1993) и POV-Ray (Young et al., 1996). Рассмотрены особенности применения метода Монте-Карло для расчета отклика сцинтилляционных детекторов и газоразрядных счетчиков.

**В третьей главе** представлены результаты разработки математического фантома щитовидной железы человека, основанного, главным образом, на данных (Лихтарев и др., 1993) и (Tanaka, 1992). Щитовидная железа представлена как орган, состоящий из двух долей и перешейка. Каждая доля образована прямым эллипсоидом вращения, усеченного цилиндром трахеи. Шея аппроксимирована прямым круговым цилиндром. Перешеек между двумя долями ЩЖ образован сегментом прямого кругового коаксиального цилиндра, ограниченного двумя плоскостями.

Новый фантом ЩЖ включен в описание стандартных математических фантомов ОРНЛ-МКРЗ (Cristy and Eckerman, 1987). Также разработаны фантомы ЩЖ для различных сроков внутриутробного развития, которые использовались для расчета дозовых коэффициентов [3]. Приведены уравнения и параметры модели ЩЖ (см. рис. 1).

**В четвертой главе** представлены изменения, внесенные в описание стандартных фантомов семейства ОРНЛ-МКРЗ (Cristy, 1980) и (Cristy and Eckerman, 1987). Нереалистичная внешняя форма стандартных фантомов в области шеи и ЩЖ являлась источником значительной систематической погрешности. Шесть математических фантомов, образующих стандартное семейство фантомов ОРНЛ-МКРЗ, были модифицированы в верхней части туловища. При этом изменения затронули верхние ребра и ключицы. На рис. 2 представлен внешний вид верхней части скелета модифицированного фантома взрослого, на рис. 3 изображена вся "семья" модифицированных фантомов. Приведены уравнения и параметры для всех шести стандартных фантомов.

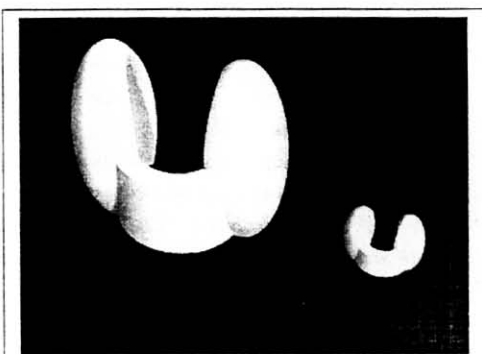


Рис. 1. Вид моделей щитовидной железы для фантомов взрослого (слева) и новорожденного (справа)

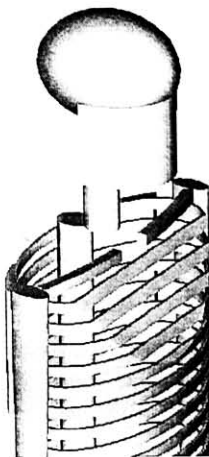


Рис. 2.

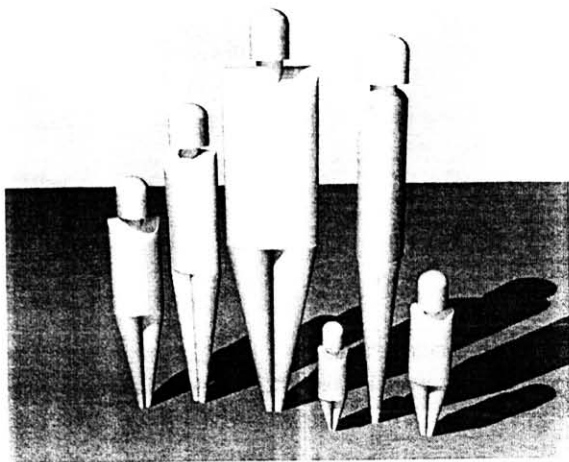


Рис. 3.

**В пятой главе** представлены результаты расчетов характеристик радиометра СРП-68-01 в различных условиях измерений активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ человека.

Для разработки и тестирования модели детектора прибора СРП-68-01, были использованы простейшие геометрии источников – точечный изотропный источник и параллельный мононаправленный пучок. В частности, прибор СРП-68-01 подключался к многоканальному амплитудному анализатору, что позволило измерить амплитудные (т.е. энергетические) спектры от различных источников  $\gamma$ -излучения. Для моделирования амплитудных спектров рассчитывалось значение полной энергии, поглощенной в кристалле NaI на одну историю. Спектр поглощенной энергии модифицировался с учетом реального энергетического разрешения детектора и нормировался на полное число разыгранных историй, давая тем самым вероятность  $\eta(E, E_0)$  поглощения в объеме кристалла энергии  $E$  для одного первичного  $\gamma$ -кванта с начальной энергией  $E_0$ . Рассчитаны и измерены спектры для точечных источников  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ . Отклик детектора на параллельный моноэнергетический пучок  $\gamma$ -квантов определялся как отношение измеренной  $P_{\text{изм}}$  и истинной  $X_0$  МЭД в воздухе в месте измерения. Экспериментально отклик детектора измерялся на стандартной поверочной установке НПП "Атомтех" с  $\gamma$ -источниками  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57,60}\text{Co}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  (МНИПИ, 1992). Согласие между рассчитанными и измеренными характеристиками детектора (дифференциальными и интегральными) подтвердило вывод о физической корректности разработанной модели детектора.

Для моделирования отклика детектора от более сложных объемных источников использовались физические фантомы шеи и ЩЖ из комплекта ФЩЖ-04Т (НИИ ГМТ, 1991). Качество моделирования системы "детектор-фантом" проверялось путем сравнения рассчитанных и измеренных амплитудных спектров и интегральных скоростей счета. Согласие между рассчитанными и измеренными величинами свидетельствовало о том, что разработанный подход, включающий в себя модели детектора и фантома, а также способ

расчета характеристик детектора, может применяться для моделирования показаний прибора в ситуациях, когда экспериментальное изучение невозможно или затруднено.

Модель детектора радиометра СРП-68-01 и математические фантомы ЩЖ и шеи использовались для оценки влияния положения детектора относительно ЩЖ на результаты измерений активности  $^{131}\text{I}$ . Определялась зависимость скорости счета от расстояния между детектором и поверхностью шеи математических фантомов. Также были рассчитаны относительные показания детектора в зависимости от угла поворота детектора в горизонтальной плоскости и при смещении детектора в вертикальном направлении вдоль поверхности шеи.

Пределы изменения калибровочного коэффициента прибора из-за различных видов нарушения геометрии измерения даны в табл. 1, откуда видно, что наибольшую погрешность в результаты измерений вносит изменение расстояния между детектором и поверхностью шеи. Если источники ошибок независимы, то диапазон суммарной ошибки которую вносят в величину измеренной активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ различные нарушения геометрии измерения, составляет от -32 до +17%.

Таблица 1

Диапазон ошибок, вызванных нарушением геометрии измерения

Тип отклонения	Диапазон ошибок, %
Расстояние "шея-детектор", см	[-30; +15]
Угловое в горизонтальной плоскости, град	$\pm(5-10)$
Угловое в вертикальной плоскости, град	$\pm(5-10)$
Вертикальное смещение, см	$\pm 5$

Разработанный подход к моделированию отклика прибора позволяет рассчитать не только относительные, но и абсолютные характеристики детектора. Например, на рис. 4 приведены рассчитанные калибровочные коэффициенты для  $^{131}\text{I}$ , а также данные, которые были получены при измерении в клинических условиях взрослых людей (Хрущ с соавт., 1989) и людей разного возраста (Кайдановский и Долгирев, 1996) с известным содержанием  $^{131}\text{I}$ . Рассчитанные калибровочные факторы ( $\blacktriangle$ ) получены для шести фантомов всего тела, в которых ЩЖ являлась органом-источником. Также на этом рисунке обозначен ( $\bullet$ ) результат расчета отклика прибора для математического аналога стандартного фантома шеи и ЩЖ (ANSI, 1972), который находится в хорошем согласии с ранними оценками (Герасимова и Левочкин, 1981) и (Кеирим-Маркус с соавт., 1986). Наблюдаемое согласие между расчетом и экспериментальными значениями подтвердило возможность использовать моделирование для расчета абсолютных значений калибровочных коэффициентов по другим нуклидам, в частности, для короткоживущих изотопов йода —  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ . Рассчитанные методом Монте-Карло калибровочные коэффициенты для короткоживущих радиоизотопов йода представлены в табл. 2.

Знание калибровочных коэффициентов по короткоживущим изотопам йода может оказаться необходимым при анализе результатов измерений, выполненных сразу после аварии или в первых числах мая 1986 г. Например, присутствие  $^{132}\text{I}$  в ЩЖ в момент измерения может служить объяснением заниженного значения калибровочного коэффициен-

та, полученного в начале мая 1986 г. для группы лиц, эвакуированных из г. Припять (Хрущ с соавт., 1989).

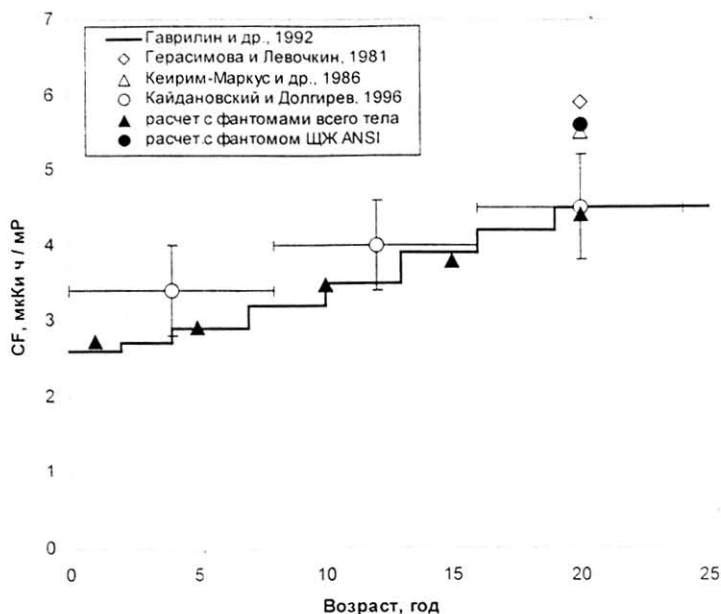


Рис. 4. Сравнение рассчитанных и измеренных разными авторами калибровочных коэффициентов СРП-68-01 по  $^{131}\text{I}$ . Показан также (●) результат расчета для математического аналога фантома ANSI для шеи и ЩЖ (ANSI, 1973)

Таблица 2  
Калибровочные коэффициенты СРП-68-01 по радиоизотопам йода, рассчитанные методом Монте-Карло, мкКи·ч·мР $^{-1}$ .

Возраст фантома, год	Радиоизотоп йода			
	$^{131}\text{I}$ $T_{1/2}=8,04$ сут	$^{132}\text{I}$ $T_{1/2}=2,3$ ч	$^{133}\text{I}$ $T_{1/2}=20,8$ ч	$^{135}\text{I}$ $T_{1/2}=6,61$ ч
1	2,48	1,29	3,23	3,62
5	2,65	1,38	3,45	3,86
10	3,15	1,61	4,04	4,49
15	3,44	1,76	4,40	4,91
20	4,00	2,04	5,13	5,66

В Беларуси после Чернобыльской аварии часть измерений активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ была выполнена в "поздний йодный" период – в последних числах мая и в начале июня 1986 года, когда содержание  $^{131}\text{I}$  в организме человека значительно снизилось, а содержание радиоизотопов цезия возрастало из-за параллельного процесса накопления в организме. Поэтому результаты прямых измерений активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ, выполненные в

это время, принято считать ненадежными для реконструкции доз облучения ЩЖ. Чтобы оценить возможность использования таких данных для расчета доз облучения ЩЖ, был выполнен анализ влияния радиоцезия в теле человека на отклик прибора СРП-68-01.

Если в теле человека инкорпорированы  $n$  радионуклидов, то, пренебрегая эффектом экранирования фона телом человека и внешним радиоактивным загрязнением тела человека, его одежды и волос, активность отдельного радионуклида  $j$  может быть выражена с использованием поправочного коэффициента  $k_{\text{corr}}$ :

$$Q_j^{\text{изм}} = k_j \cdot k_{\text{corr}} \cdot (P_{\text{изм}} - P_{\text{ф}}) = k_{\text{cal}} \cdot \frac{1}{1 + \sum_{i, i \neq j} \frac{Q_i}{Q_j} \cdot \frac{k_j}{k_i}} \cdot (P_{\text{изм}} - P_{\text{ф}}) \quad (1)$$

где  $P_{\text{ф}}$  – значение фона в месте измерения, т.е. показания прибора, обусловленные источниками, не связанными с измеряемым человеком;  
 $P_{\text{изм}}$  – показания прибора;  
 $k_i$  – калибровочный коэффициент прибора по радионуклиду  $i$ ,  $i=1 \dots n$ ;  
 $Q_i$  – активность радионуклида  $i$  в организме.

Уравнение (1) позволяет рассчитать активность радионуклида  $j$  через отношения активностей и калибровочных коэффициентов. Если ограничиться только практически важными радионуклидами:  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ и  $^{134,136,137}\text{Cs}$  во всем теле человека, то для расчета значения поправочного коэффициента  $k_{\text{corr}}$  требуется оценить: 1) калибровочные коэффициенты радиометра СРП-68-01 по изотопам цезия во всем теле и  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ в зависимости от возраста человека; 2) отношения активностей изотопов  $^{134,136,137}\text{Cs}$  во всем теле и  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ в зависимости от времени и возраста. Первая задача была решена методом Монте-Карло с использованием доступной экспериментальной информации. Вторая задача потребовала использования радиоэкологической модели, адаптированной к реальным условиям, наблюдавшимся после Чернобыльской аварии в Белоруссии [5, 8].

Расчет отклика детектора на  $\gamma$ -излучение нуклидов, локализованных в ЩЖ и однородно распределенных в теле, выполнялся с использованием модифицированных фантомов. Детектор рассматривался в стандартном положении для измерения радиойода в ЩЖ – вплотную к передней поверхности шеи, напротив середины ЩЖ. Калибровочные коэффициенты рассчитывались для двух органов-источников – ЩЖ и тела человека. Наблюдалось хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными.

Для оценки отношения активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ и содержания радиоизотопов цезия в теле, использовалась модель миграции радионуклидов по пищевой цепи (Müller and Pröhl, 1993) в сочетании с моделью метаболизма данных радионуклидов в человеческом организме (МКРЗ, 1989). Функция поступления оценивалась по радиоэкологической модели, адаптированной к условиям Беларуси (Drozdovitch et al., 1997), [8]. В качестве основного пути поступления йода и цезия в организм человека принималось потребление коровьего молока из личных хозяйств. Поступление радионуклидов ингаляционным путем и со свежими листовыми овощами не учитывалось. Предполагалось, что: 1) радиоактивное загрязнение территории сформировалось в результате однократного выпадения; 2) население постоянно употребляло молоко из частного сектора; 3) эвакуация и переселение на "чистые" территории не производились; 4) другие контрмеры не применялись.

В рамках рассмотренных модельных предположений отношение активностей радиоизотопов цезия  $^{134}\text{I}$ ,  $^{136}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  в организме человека и активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ в зависимости от времени может быть выражено через отношения следующих величин: а) активностей  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в выпадениях; б) коэффициентов начального удержания  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$  травой; в) скоростей очистки травы от  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$  из-за роста и выветривания; г) значений коэффициентов перехода "травы-молоко" для  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Рассматривались два сценария радиоактивного загрязнения, типичные для территории Беларуси после Чернобыльской аварии. Первый сценарий выпадений реализовался на территории т.н. "Могилевского" цезиевого пятна в результате, прежде всего, влажных выпадений в период 26-29 апреля 1986 г. (Израэль с соавт., 1990), (Borzilov et al., 1993), (Орлов с соавт., 1992). В качестве второго сценария выпадений было выбрано "Центральное" пятно (за пределами 30-км зоны ЧАЭС), которое согласно тем же источникам образовалось, в основном, благодаря сухим выпадениям в период 26-27 апреля 1986 г.

Используя рассчитанные калибровочные коэффициенты и оцененные отношения активностей, была оценена зависимость поправочного коэффициента  $K_{\text{соп}}$  от времени и возраста индивидуума. Поскольку доза облучения ЩЖ, рассчитанная по результатам прямых измерений, пропорциональна измеренному содержанию  $^{131}\text{I}$ , то поправочный коэффициент  $K_{\text{соп}}$  характеризует собой величину ошибки в определении дозы из-за "подсветки" изотопами цезия  $\Delta$ , значения которой приведены в табл. 3.

Таблица 3

Величина завышения дозы внутреннего облучения ЩЖ из-за "подсветки" радиоцезия в теле при измерениях активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ прибором СРП-68-01

Время, сут	Ошибка дозы $\Delta$ , %					
	Новорожденный	1 год	5 лет	10 лет	15 лет	Взрослый
<b>Центральное пятно</b>						
5	+2,8	+2,2	+1,5	+1,2	+0,09	+0,08
15	+8,4	+5,9	+4,1	+3,2	+2,5	+2,4
30	+36	+22	+15	+12	+10	+9,7
45	+154	+80	+57	+46	+41	+38
60	+657	+293	+212	+175	+164	+147
<b>Могилевское пятно</b>						
5	+11	+8,6	+6,1	+4,8	+3,6	+3,4
15	+34	+24	+17	+13	+10	+9,6
30	+144	+88	+61	+48	+41	+39
45	+615	+321	+226	+183	+165	+152

Анализ временной и возрастной зависимости  $K_{\text{соп}}$  показывает, что эффект "подсветки" ярче выражен на территории "Могилевского" пятна, чем "Центрального" пятна. Кроме того, "подсветка" оказывает более заметное влияние при измерении детей, чем в случае измерения взрослых. В условиях, типичных для "Центрального" пятна, при измерении взрослого величина погрешности от "подсветки" радиоцезия, на 30-й день после аварии не превышает 10%, а на 45-й день составляет, примерно, 40%. Для ребенка 5-ти лет эти значения составляют 15 и 57%, а для годовалого ребенка – 22 и 80%. соответственно. Таким образом, в условиях "Центрального" пятна величина погрешности дозы облучения

ЩЖ из-за "подсветки" радиоцезия в теле человека в течение первого месяца сохраняется в приемлемых пределах и не превышает 20-30%, и погрешность дозы уменьшается при увеличении относительной доли йода в выпадениях. С другой стороны, в условиях, принятых для "Могилевского" пятна, на 30-й день значения погрешностей для взрослого, ребенка 5-ти лет и 1 года составляют примерно 40, 60 и 90%, а на 45-й день – 150, 230 и 320%, соответственно.

В шестой главе приведены результаты, относящиеся к моделированию отклика дозиметра ДП-5 с гейгеровским счетчиком. Дозиметр ДП-5 может рассматриваться как радиометрическое устройство, поэтому на результаты измерений оказывали влияние те же факторы, что и для СРП-68-01. Однако, в приборе ДП-5 используется счетчик Гейгера-Мюллера, поэтому методика моделирования дозиметра ДП-5 имела свои особенности.

Разработка модели детектора была начата с расчета отклика собственно гейгеровского счетчика СБМ-20 в простейшей геометрии облучения – параллельный моноэнергетический пучок. Адекватность модели счетчика проверялась путем сравнения рассчитанного и экспериментального (Кожемякин и Гузов, 1998) откликов на параллельный моноэнергетический пучок  $\gamma$ -квантов. После обоснования модели счетчика СБМ-20, была разработана модель детектора ДП-5 и рассчитана относительная энергетическая зависимость его отклика на параллельный пучок моноэнергетических  $\gamma$ -квантов, которая хорошо согласовывалась с экспериментальными данными (МНИПИ, 1992) и (Хрущ с соавт., 1989).

Для расчета абсолютных значений показаний дозиметра ДП-5 был определен коэффициент связи  $s$  между скоростью счета и показаниями прибора, для чего использовалась информация о методике поверки дозиметра ДП-5, выполняемой в геометрии параллельного пучка фотонов от  $\gamma$ -источника  $^{60}\text{Co}$ . При калибровке источником  $^{60}\text{Co}$  показания прибора  $R(E)$  соответствуют истинной МЭД, т.е.  $X(E') \equiv R(E')$ , где  $E' = 1.25$  МэВ. Для расчета коэффициента связи  $s$  использовалось выражение:

$$s = \frac{c \cdot \mu_{\text{en}}(E') \cdot E'}{S \cdot \eta(E')} \quad (2)$$

где  $\mu_{\text{en}}$  – массовый коэффициент поглощения энергии в воздухе,  $\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ ;  
 $\eta(E)$  – вероятность появления импульса при попадании в детектор одного  $\gamma$ -кванта с энергией  $E$ ,  $\text{имп} \cdot \text{част}^{-1}$ ;  
 $S$  – площадь сечения детектора, пересекемая пучком,  $\text{см}^2$ ;  
 $c$  – коэффициент пропорциональности,  $\text{мкР} \cdot \text{г} \cdot \text{с} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1} \cdot \text{част}^{-1}$ .

Расчеты с использованием серии математических фантомов позволили получить новые данные – калибровочные коэффициенты дозиметра ДП-5 по радионуклиду  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ в зависимости от возраста человека, которые представлены в табл. 4. Погрешности в табл. 4 соответствуют доверительной вероятности  $P=0.95$ .

Переход от геометрии параллельного пучка к реалистичной геометрии ЩЖ и тела человека значительно снижает эффективность аналогового метода Монте-Карло. Способы уменьшения дисперсии, реализованные в программе MCNP, не применимы для моделирования связанного переноса электронов и фотонов, поэтому значение энергии обреза для электронов выбиралось в зависимости от геометрической зоны. Источник в

ЩЖ разыгрывался со спектром испускания  $^{131}\text{I}$ , что позволило получать калибровочные коэффициенты за один расчет.

Из-за низкой эффективности аналогового моделирования газоразрядного счетчика для оценки влияния ориентации детектора (вращения) на калибровочные коэффициенты была применена комбинированная двухэтапная схема, что позволило существенно сократить время расчетов. Цилиндрическая внешняя поверхность детектора служила поверхностным источником на втором этапе расчетов. С таким поверхностным источником моделировалось вращение детектора вокруг оси симметрии.

Таблица 4  
Рассчитанные калибровочные коэффициенты дозиметра ДП-5 по  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ

Возраст, год	$CF_{I-131}$ , $\text{мкКи} \cdot \text{ч} \cdot \text{мР}^{-1}$
1	$6,44 \pm 0,25$
5	$6,98 \pm 0,28$
10	$8,47 \pm 0,42$
15	$9,21 \pm 0,46$
20	$11,62 \pm 0,66$

Рассчитанная угловая зависимость калибровочных коэффициентов для взрослого фантома показана на рис. 5. Статистическая погрешность рассчитанных точек составляет 3 – 5%, черные точки обозначают экспериментальные значения (Хрущ с соавт., 1989). Сравнение рассчитанных и измеренных данных показывает удовлетворительное согласие для случая закрытого окна, хотя экспериментальные точки систематически ниже расчетных, в то же время для случая открытого окна расхождение несколько больше. Рассчитанные точки были аппроксимированы аналитической функцией вида:  $f(\alpha) = a \cdot \sin(\alpha - (\frac{\pi}{2} + b)) + c$ , параметры которой приведены в табл. 5.

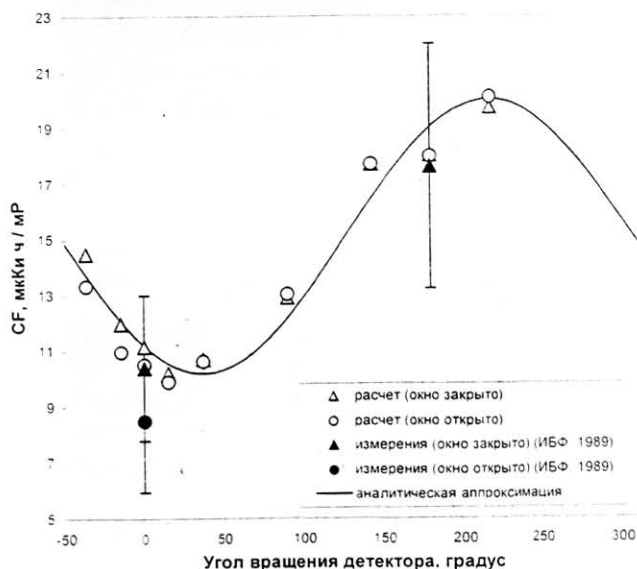


Рис. 5. Угловая зависимость калибровочного коэффициента ДП-5 для взрослого фантома. Расчет (светлые точки) имеет статистическую погрешность 3 - 5%, результаты измерений (темные точки) - 30%



Таблица 5

Параметры функции, аппроксимирующей угловую зависимость калибровочных коэффициентов.

Фантом	a, мкКи·ч·мР <sup>-1</sup>	b, град	c, мкКи·ч·мР <sup>-1</sup>	c - a, мкКи·ч·мР <sup>-1</sup>
1 год	4,3	37	9,9	5,6
5 лет	4,2	37	10,5	6,3
10 лет	5,0	37	13,0	8,0
15 лет	5,1	37	13,9	8,8
Взрослый	4,9	37	15,1	10,2

Поскольку модель детектора ДП-5 учитывает возможность измерений с открытым окном, то угловая зависимость калибровочных коэффициентов исследовалась и для этого случая. Изменение калибровочного коэффициента из-за различного положения окна заметно в диапазоне углов от  $-45^\circ$  до  $+35^\circ$  с максимальным отклонением 8 – 12% в зависимости от возраста фантома.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специфика реализации программ дозиметрического мониторинга населения после аварии на АЭС заключается в том, что обследуемый контингент весьма разнороден по возрастным и антропометрическим параметрам, вследствие чего актуальной оказывается проблема корректной калибровки инструментальных средств дозиметрического контроля [1, 12]. С другой стороны, в случае запроектной аварии, сопровождающейся ширококомасштабным радиоактивным загрязнением окружающей среды [11], для проведения полноценного дозиметрического контроля может оказаться, что имеющихся специализированных средств измерения недостаточно. В таких условиях, как показала Чернобыльская авария [1], (Likharev et al., 1993), (Кайдановский и Долгирев, 1996), следует ожидать широкого использования разнообразных средств радиационного контроля, не приспособленных для измерения активности инкорпорированных радионуклидов в теле человека, поэтому проблема калибровки таких средств измерения встает чрезвычайно остро.

Измерение активности инкорпорированных в организме человека радионуклидов является сложной задачей из-за того, что тело человека является объемным источником сложной геометрической формы, а распределение радионуклидов в органах и тканях изменяется от практически равномерного до локального. Традиционным является способ калибровки средств измерения с использованием образцовых радиоактивных фантомов тела человека или отдельных его частей. Разработка, изготовление и аттестация таких фантомов является сложной и дорогостоящей. В ряде случаев невозможно или нецелесообразно изготавливать фантомы с короткоживущими изотопами, например,  $^{131}\text{I}$ . Кроме того, как показал опыт организации радиометрического контроля населения после Чернобыльской аварии [13, 14], (МАГАТЭ, 1991), даже для таких "удобных" в измерении радионуклидов, какими являются изотопы цезия  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , необходимо иметь целый набор стандартных фантомов для моделирования людей различного возраста и телосложения. Все

эти особенности чрезвычайно затрудняют оперативное развертывание аварийного мониторинга населения в случае крупномасштабной радиационной аварии.

Альтернативой использованию радиоактивных физических фантомов для калибровки средств радиационного контроля служит математическое моделирование приборов и тела человека. В данной работе на примере моделирования радиометрических и дозиметрических приборов, применявшихся после Чернобыльской аварии для измерения активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ человека, показано, что использование метода стохастического моделирования – метода Монте-Карло – позволяет решить многие проблемы, связанные с калибровкой приборов и их показаниями в различных условиях измерений.

1. Для решения поставленной задачи был разработан новый математический фантом ЩЖ человека различного возраста, включая период внутриутробного развития [4, 6]. Новый фантом включен в описание стандартных математических фантомов тела человека ОРНЛ-МКРЗ, которые были модифицированы с целью добиться более реалистичной формы верхней части туловища и шеи. Полученный набор параметров математических моделей признан в качестве дальнейшего развития стандартных фантомов [7].

2. Полученные в данной работе результаты используются для реконструкции доз облучения ЩЖ жителей Республики Беларусь после Чернобыльской аварии [3]. Важность данных работ обусловлена тем, что неопределенность дозовой оценки, полученной из результатов прямых измерений, зависит, во-первых, от неопределенности результата измерения, и, во-вторых, от погрешности оценки динамики содержания радионуклида в организме человека. Очевидно, что уменьшение неопределенности любой из этих двух составляющих, приводит к уточнению оценки дозы на ЩЖ.

3. В данной работе показано, что моделирование радиационных детекторов методом Монте-Карло, опирающееся на результаты простых экспериментов, позволяет рассчитывать абсолютные значения калибровочных характеристик приборов, т.е. моделирование играет роль математической "калибровки". Получены (рассчитаны) практически важные характеристики дозиметрических приборов [5, 4, 8 – 10], часть из которых не может быть определена экспериментально. Моделирование показаний приборов позволило уточнить степень неопределенности результатов прямых измерений и оценить влияние на результат измерений активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ следующих факторов [5, 8, 10]:

- нарушение геометрии измерения;
- влияние короткоживущих изотопов йода;
- влияние радиоизотопов цезия, распределенных в теле человека.

Все расчеты и оценки выполнены для широкого возрастного диапазона, используемые фантомы моделируют человека от новорожденного до стандартного взрослого.

4. В рамках данной работы рассмотрена задача моделирования методом Монте-Карло отклика детектора, построенного на основе газоразрядного счетчика Гейгера-Мюллера [9, 10]. Показано [9], что из-за малой вероятности процесса взаимодействия  $\gamma$ -кванта в счетчике вычислительная эффективность наиболее достоверного аналогового метода Монте-Карло оказывается чрезвычайно низкой, что затрудняет широкое применение данного метода. При исследовании влияния положения детектора на показания дозиметра ДП-5 был обоснован и применен комбинированный двухступенчатый подход [10], с помощью которого часть расчета выполнялась однократно, промежуточные дан-

ные о характеристиках частиц запоминались и использовались снова. Применение данного подхода позволило сократить полное время расчетов примерно на порядок.

5. Успешное решение поставленных задач позволяет сделать вывод о том, что способ математической "калибровки" дозиметрических приборов может быть применен при разработке новых средств и методик радиационного контроля. Подтверждением этому является выполняемая в настоящий момент в Республике Беларусь по разделу 3.2.2.7 Государственной программы "Радиозкология" разработка экспертного СИЧ, в рамках которой выполняется расчет и оптимизация метрологических характеристик устройства методом Монте-Карло, а также исследование степени влияния геометрии устройства и тела человека на параметры измерительной системы в целом.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. Миненко В.Ф., Улановский А.В. Радиометрический контроль облучения населения БССР // *Здравоохранение Белоруссии*. – 1990. – №6. – С. 60 – 61.
2. Рахно И.Л., Ланцов И.Е., Корнеев С.В., Улановский А.В. Моделирование гамма-спектрометров. // *Известия АН Беларуси, физико-техническая серия*. – 1996. – №1. – С. 104 – 108.
3. Stepanenko V., Gavrilin Yu., Khrousch V., Shinkarev S., Zvonova I., Minenko V., Drozdovitch V., Ulanovsky A., Heinemann K., Pomplum E., Hille R., Bailiff I., Kondrashov A., Yaskova E., Petin D., Skvortsov V., Parshkov E., Makarenkova I., Volkov V., Korneev S., Bratilova A., Kaidanovsky J. The reconstruction of thyroid dose following Chernobyl // EUR 16544 - The radiological consequences of the Chernobyl accident. Proceedings of the first international conference, Minsk, Belarus, 18-22 March 1996. / Eds.: A. Karaoglou, G. Desmet, G.N. Kelly, H.G. Menzel. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. – 1996. – P. 937 – 948.
4. Ulanovsky A., Minenko V., Korneev S. Monte Carlo simulation of a detector and a thyroid phantom // EUR 16540 – Retrospective dosimetry and dose reconstruction / Eds. I.K. Bailiff and V. Stepanenko. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. – 1996. – P. 111 – 115.
5. Ulanovsky A.V., Minenko V.F., Korneev, S.V. Influence of measurement geometry on the estimate of  $^{131}\text{I}$  activity in the thyroid: Monte Carlo simulation of a detector and a phantom. // *Health Phys.* – 1997. – V.71. – P. 34 – 41.
6. Ulanovsky A.V., Eckerman K.F. Absorbed fractions for electron and photon emissions in the developing thyroid: fetus to five years old // *Radiat. Prot. Dosim.* – 1998. – Vol. 79, №(1-4). – P. 419 – 424.
7. Ulanovsky A.V., Eckerman K.F. Modification of ORNL phantom series in simulation of the responses of thyroid detectors. // *Radiat. Prot. Dosim.* – 1998. – Vol. 79, №(1-4). – P. 429 – 432.
8. Улановский А.В., Дроздович В.В. Влияние радионуклидов, распределенных в теле человека на оценку доз облучения щитовидной железы. – Минск. 1997. – 32 с. – (Препринт / Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т проблем энергетики: ИПЭ-27).

9. Улановский А.В. Моделирование дозиметра ДП-5 методом Монте-Карло. – Минск, 1998. – 27 с. – (Препринт / Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т проблем энергетики. Минздрав Республики Беларусь. Научн.-иссл. клинич. ин-т радиац. медицины и эндокринологии; ИПЭ-30).
10. Улановский А.В. Влияние ориентации детектора на показания прибора ДП-5 при измерении активности  $^{131}\text{I}$  в щитовидной железе человека. – Минск, 1999. – 22 с. – (Препринт / Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т проблем энергетики. Минздрав Республики Беларусь. Научн.-иссл. клинич. ин-т радиац. медицины и эндокринологии; ИПЭ-41).
11. Равкова Е.И., Савушкин И.А., Улановский А.В., Дроздович В.В. Радиологическая опасность радиоактивных выбросов при запроектных авариях реактора типа ВВЭР. – Минск, 1999. – 45 с. – (Препринт / Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т проблем энергетики; ИПЭ-44).
12. Миненко В.Ф., Улановский А.В. О требованиях к установкам СИЧ для массового контроля внутреннего облучения населения // Актуальные вопросы дозиметрии внутреннего облучения: Тезисы докл. Всесоюзн. совещ., г. Гомель, 20-21 сент. 1989 г. / М., 1989. – С. 60 – 61.
13. Миненко В.Ф., Улановский А.В., Корнеев С.В. Состояние и перспективы контроля внутреннего облучения населения БССР // Методы и средства радиационного контроля: Тезисы докл. респ. научн.-практ. конф., г. Минск, 12-13 июня 1991 / Минский научн.-исслед. ин-т приборостроения. – Мн., 1991. – С.49.
14. Миненко В.Ф., Улановский А.В. Выбор антропометрических показателей при массовом обследовании населения на установках СИЧ // Научно-практические аспекты сохранения здоровья людей, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на Чернобыльской АЭС: Тез. докл. 2<sup>ой</sup> респ. конф., Минск, 12-14 марта 1991 г. / Минздрав БССР. НИИ радиационной медицины. – Минск, 1991. – с.28 – 29.

## РЕЗЮМЭ

Уланоўскі Аляксандр Васільевіч, РАЗЛІКОВА-ЭКСПЕРЫМЕНТАЛЬНАЕ АБГРУНТАВАННЕ МЕТАДАЎ КАНТРОЛЮ ЎНУТРАНАГА АПРАМЕНЬВАННЯ ПРЫ АВАРЫЯХ НА АЭС.

*Ядзерная аварыя, дазіметрычны кантроль, метада Монте-Карла, матэматычныя фантомы, унутранае апраменьванне, шчытападабная залоза.*

Разгледжаны пытанні арганізацыі кантролю ўнутранага апраменьвання насельніцтва пасля аварыі на АЭС. Выкарыстоўваецца метада Монте-Карла для разліку характэрныя дазіметрычных і радыёметрычных прыбораў. Выканана мадэліраванне вымярэнняў актыўнасці  $^{131}\text{I}$  ў шчытападобнай залозе (ШЗ) чалавека пасля Чарнобыльскай аварыі. Распрацаваны новы матэматычны фантом ШЗ і мадыфіцыраваны стандартныя матэматычныя фантомы чалавека.

Прыведзены вынікі мадэліравання характэрныя радыёметра з сцынцыляцыйным дэтэктарам, у прыватнасці, даследуецца ўплыў розных фактараў на вынікі вымярэнняў актыўнасці  $^{131}\text{I}$  ў ШЗ. Прадстаўлены вынікі мадэліравання характэрныя дазіметра з дэтэктарам на падставе лічылніка Гейгера-Мюлера. Апісана працэдура распрацоўкі мадэлі дэтэктара і метада мадэліравання вострага газаразряднага лічылніка. Прыведзены вынікі разлікаў каліброўчых характэрныя прыбору ў розных умовах правядзення вымярэнняў.

Вызначаюцца іншыя вобласці выкарыстання распрацаванага падыходу.

## РЕЗЮМЕ

Улановский Александр Васильевич, РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ АВАРИЯХ НА АЭС.

*Ядерная авария, дозиметрический контроль, метод Монте-Карло, математические фантомы, внутреннее облучение, щитовидная железа.*

Рассмотрены вопросы организации контроля внутреннего облучения населения после аварии на АЭС. Используется метод Монте-Карло для расчета характеристик дозиметрических и радиометрических приборов. Выполнено моделирование измерений активности  $^{131}\text{I}$  в щитовидной железе (ЩЖ) человека после Чернобыльской аварии. Разработан новый математический фантом ЩЖ и модифицированы стандартные математические фантомы человека.

Приводятся результаты моделирования характеристик радиометра со сцинтилляционным детектором, в частности, исследуется влияние различных факторов на результаты измерений активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ. Представлены результаты моделирования характеристик дозиметра с детектором на основе счетчика Гейгера-Мюллера. Описана процедура разработки модели детектора и способа моделирования отклика газоразрядного счетчика. Приводятся результаты расчетов калибровочных характеристик прибора в различных условиях проведения измерений.

Отмечаются другие области использования разработанного подхода.

## SUMMARY

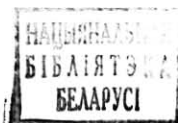
Alexander Ulanovsky, COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE METHODS FOR INTERNAL EXPOSURE MONITORING AFTER ACCIDENTS AT NPPs

*Nuclear accident, dosimetric monitoring, Monte Carlo method, mathematical phantoms, internal exposure, thyroid.*

Organization of internal exposure monitoring of the population after an accident at NPP is considered. The Monte Carlo method is used to calculate characteristics of dose-rate meters and counters. The simulation of measurements of the  $^{131}\text{I}$  activity in thyroid after the Chernobyl accident is performed. The new mathematical phantom of thyroid is developed and the standard mathematical phantoms of a human are modified.

Results of simulation of characteristics of the counter with scintillation detector are presented. Particularly, impact of various measurement conditions on measured  $^{131}\text{I}$  activity in thyroid is studied. Also presented are results of simulation of the dose-rate meter with Geiger-Muller counter. Described are a procedure of the detector model development and simulation technique for a gas-discharge counter. Calculated calibration characteristics of the dose-rate meter are presented for various measurement conditions.

Other possible applications of the approach developed are indicated.

УЛАНОВСКИЙ Александр Васильевич

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ  
КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ АВАРИЯХ НА АЭС

Подписано к печати 25.05.99. Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. I, Iб.

Уч.-изд. л. I. Тираж 70 экз. Заказ 9. Бесплатно •

Отпечатано на ксероксе ИПЭ НАНБ

220109, Минск-Сосны

24,36393



80000002001104