

ПРОВЕРКА ПРИЛОЖЕНИЯ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА КРУПНЫХ ЖИВОТНЫХ

*Яценко В.Н., Кочетков О.А., Борисов Н.М., Гусев И.А., Власов П.А.,
Калистратова В.С., Нисимов П.Г., Левочкин Ф.К., Боровков М.В., Столяров В.П.
(Ин-т биофизики), Цэдиш С.Ц., Тюрин И.Н. (Клиническая больница № 6),
Франк Д., де Карлан Л. (Ин-т радиационной защиты
и ядерной безопасности, Франция)*

Контроль внутреннего облучения персонала предприятий ядерной отрасли включает в себя измерение содержания инкорпорированных радионуклидов на спектрометре. Измерение содержания актиноидов, таких, как уран, плутоний или америций, сопряжено с трудностями, которые обусловлены низкой энергией γ -излучения радионуклидов, находящихся на разной глубине в теле пациентов. Различия в антропометрических данных пациентов существенно влияют на геометрию измерений и, как следствие, на их результаты. Во избежание указанных трудностей показания спектрометров интерпретируют с помощью расчетов методом Монте-Карло [1, 2]. При этом используют математические фантомы, полученные с помощью компьютерной томографии или магнитно-резонансного сканирования, для того чтобы моделировать измерения в реальных, т.е. близких к индивидуальной геометрии условиях.

Разработанное в Институте радиационной защиты и ядерной безопасности (Франция) программное обеспечение OEDIPE* (ранее называвшееся Anthropro) [1, 2] описывает индивидуальную анатомию пациента с помощью прямоугольных параллелепипедов малого размера (вокселей) на основании данных индивидуального томографического сканирования для расчетов по программе MCNP [3]. MCNP является хорошо зарекомендовавшей себя программой расчета переноса разных видов излучения (фотонного, нейтронного, электронного) в широком энергетическом диапазоне. Она описывает геометрию переноса с помощью поверхностей первого и второго порядков, а также тороидальных поверхностей, что позволяет задавать геометрию в виде вокселей.

*Outil d'Evaluation de la Dose Interne Personnalisée (Средство оценки персональной дозы внутреннего облучения).

В Институте биофизики осуществлена проверка метода измерений на спектрометре излучения человека с расчетной калибровкой. Для такой проверки поставлен эксперимент на крупных животных, используемых как фантомы.

Исследованиями предусмотрено использование ^{241}Am в качестве радионуклида для измерения на спектрометре. Указанный радионуклид является сопутствующим ^{239}Pu и обычно депонируется в легких, печени и скелете работников предприятий ядерного топливного цикла. Содержание ^{241}Am определяют по γ -квантам энергией 59,54 кэВ.

Одной из основных задач было обеспечение максимального соответствия общей геометрии переноса излучения при измерении животных и потенциальных пациентов — работников ядерного производства. Геометрия переноса излучения зависит от расположения инкорпорированных источников, которое определяется

биокинетикой актиноидов после ингаляции. Суммируя данные [4—6] о поведении ^{241}Am в организме человека при различных условиях поступления в органы дыхания, можно констатировать следующее:

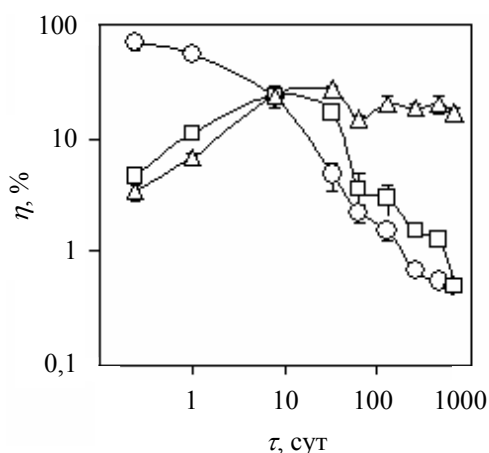
при поступлении некоторых химических соединений может наблюдаться быстрое (в течение первых нескольких часов) перемещение из легких в кровяное русло;

часть радионуклида, поступившего в легкие, может удаляться с периодом полувыведения, равным нескольким неделям;

через несколько месяцев после попадания в организм его обнаруживают в печени, легких и скелете;

через 6—7 лет после начала ингаляции его основное количество находится в скелете.

В качестве биологического фантома в эксперименте были выбраны свиньи, которые по сравнению с другими животными наиболее близки к человеку по совокупности биометрических (размеры и масса тела), анатомических (соотношение по массе, топография и взаимное расположение костной, мышечной, жировой и легочной тканей), биохимических (элементарный состав тканей), физиологических (скорость метаболизма) и радиобиологических характеристик (реакция на лучевое поражение) [7] (табл. 1). При изучении биокинетики ^{241}Am после поступления в органы дыхания в качестве подопытных животных чаще всего используют крыс, данных для крупных животных существенно меньше. В частности, сведений об обмене ^{241}Am в организме свиней нет. Ограниченные данные для организма собак [10, 11] показывают, что динамика растворимых солей ^{241}Am в разных органах и тканях после однократной ингаляции близка к человеческой (рис. 1).



Р и с. 1. Содержание ^{241}Am в форме нитрата в легких (O), печени (Δ) и скелете собак (□) в различные сроки после однократной ингаляции

более адекватна поступлению актиноидов в легкие работников ядерного производства, поэтому первоначально она предполагалась в эксперименте. Однако от использования такой затравки отказались вследствие неизбежного наличия несмываемого наружного загрязнения, трудности создания затравочного аэрозоля соответствующего химического состава и концентрации.

Таким образом, максимальное по сравнению с другими органами количество ^{241}Am содержится в первые дни после ингаляции в легких. Ингаляционная затравка животных физиологически наиболее близка к человеческой (рис. 1).

Таким образом, максимальное по сравнению с другими органами количество ^{241}Am содержится в первые дни после ингаляции в легких. Ингаляционная затравка животных физиологически наиболее

Использование в эксперименте пищевой затравки вместо ингаляционной приводит к незначительному содержанию радионуклида в легких по сравнению с другими органами, что также не отвечает задачам эксперимента. Прямая инъекция радионуклида в легкие трупа привела бы к несоответствию экспериментального животного пациенту из-за посмертного коллапса (свертывания) легких. При специальной хирургической операции можно избежать указанного недостатка и достичь желаемого эффекта: известного количественного содержания радионуклида в легких при одновременном его отсутствии в других органах и на поверхности тела, а также при сохранении прижизненной анатомии животного. Был использован инъекционный способ введения радионуклида как адекватно моделирующий его поступление в легкие человека, имеющего профессиональный контакт с актиноидами через органы дыхания. Кроме того, инъекционное введение нуклида в легкие животного наиболее удобно для измерений с помощью спектрометра излучения человека.

После экспериментов на первом животном было обнаружено распространение радиоактивного раствора по кровеносным сосудам и бронхам, а также его вытекание за пределы легких. Это привело к неравномерному распределению радионуклида внутри легких, а также частичному нахождению за пределами легких. В результате точное воспроизведение условий эксперимента в расчетах для животных с инъекционной затравкой было затруднено. Чтобы обойти

указанные трудности, было предложено вводить в легкие двух последних свиней пластиковые капсулы с ^{241}Am .

Эксперимент выполнен на четырех свиньях массой 35—40 кг в возрасте 3,5—4 мес. Перед томографическим сканированием и оперированием животным был введен наркоз.

Главной задачей подготовки к затравке было предотвращение посмертной потери крови и коллапса легких. Для этого осуществляли следующие мероприятия:

свиньям, находившимся под наркозом, скальпелем рассекали кожу над трахеей выше щитовидного хряща. Длина разреза не превышала 7 см, что обеспечивало минимальную кровопотерю и необходимую свободу для последующих манипуляций;

нережущими инструментами (ручка скальпеля, пинцет), не травмируя сосуды, раздвигали подкожную клетчатку и мышцы, тщательно освобождая трахею от прилегающих тканей по всему периметру;

на высоте вдоха просвет трахеи пережимали зажимом с браншами, длина которого превосходила диаметр дыхательной трубки.

На следующие сутки после сворачивания крови свиньям реберным ножом рассекали кожу над грудиной (по середине) до уровня границы между грудной клеткой и брюшной полостью (проекция диафрагмы). Два других разреза кожи и подлежащих тканей проводили перпендикулярно первому по направлению к позвоночнику. Большим секционным ножом отделяли кожно-мышечный лоскут от грудной клетки слева и справа над грудиной до реберных хрящей. Рассекая реберные хрящи, выделяли грудину. Затем изнутри грудной клетки рассекали все ребра с обеих сторон на расстоянии 4—5 см от позвоночника, не нарушая целостности межреберных мышц, раздвигали их в стороны, и таким образом открывали необходимый для равномерного введения радионуклида широкий доступ ко всем отделам легких.

В обнаженные легкие свиней № 1, 2 вводили по 200 мкл азотно-кислого ^{241}Am (рН 1), рабочий раствор которого приготавливали из образцового. Средняя активность ^{241}Am одной инъекции, измеренная на сцинтилляционном спектрометре «Gamma Track» фирмы Delta Medica (США), составила $1,03 \pm 0,05$ кБк, удельная активность рабочего раствора — 4,9 кБк/мл. Для маркировки мест инъекции после введения радиоактивного раствора через тот же шприц, не вынимая иглы из ткани легкого, вводили раствор синего красителя в объеме 50 мкл. В левое легкое свиньи № 1 сделано 13 инъекций, в правое — 14. В каждое легкое свиньи № 2 сделано по 27 инъекций.

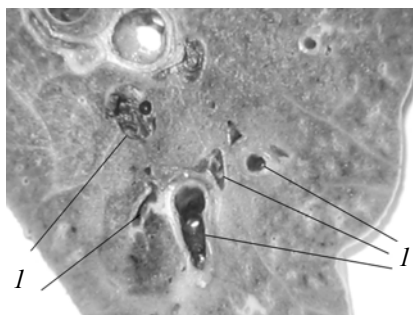
Для предотвращения вытекания радионуклида за пределы легких, а также фиксации положения источника внутри легких азотно-кислый ^{241}Am в легкие свиней № 3, 4 вводили другим способом — в составе пластиковых капсул, содержащих бумагу с высушенным раствором. В обнаженных легких скальпелем делали равномерно распределенные надрезы, в которые вставляли капсулы, снабженные крючками из медной проволоки для фиксации в легочной ткани. Средняя активность ^{241}Am в капсулах составила 2,155 кБк, максимальная — 2,251 кБк, минимальная — 2,102 кБк. В каждое легкое свиньи № 3 ввели по 27 капсул. В левое легкое свиньи № 4 — 13 капсул, в правое — 14 капсул. По завершении введения радионуклида восстанавливали целостность грудной клетки (закрепление грудины на прежнем месте) и кожи по ходу разрезов путем наложения швов. Такой способ подготовки

животных к измерениям позволяет сохранить естественную топографию органов и поверхностных тканей грудной клетки.

γ -Излучение ^{241}Am , введенного хирургическим путем, измеряли двумя германиевыми детекторами «Canberra Industries» (США), расположенными напротив левого и правого легких. Активность каждого легкого свиньи № 1 измеряли дважды — при размещении детекторов напротив верхней и нижней части легких, свиней № 2—4 — один раз при положении детектора напротив верхней части легких. Для определения положения капсул с источниками в легких свиней № 3, 4 проводили повторное сканирование на рентгеновском компьютерном томографе «Toshiba Aquilion» (Япония).

После исследования животных на спектрометре излучения человека и повторного томографического сканирования вновь рассекали грудную клетку по наложенным швам, перевязывали трахею и извлекали легкие. Легкие свиней № 1, 2 помещали в 10%-ный раствор нейтрального формалина для фиксации. Легкие свиней № 3, 4 после извлечения капсул с радиоактивным препаратом подлежали утилизации. Правое легкое свиньи № 1 после фиксации было разрезано на отдельные пластины толщиной 2—3 мм (всего 41 пластина). Левое легкое свиньи № 1 и оба легких свиньи № 2 сохраняются в формалине в качестве архивного материала.

Измерение активности легких. Правое легкое свиньи № 1, разрезанное на пластины, исследовали как визуальным путем с помощью меток красителя, так и посредством спектрометра «Gamma Trac» на пространственное распределение ^{241}Am . Данные визуального осмотра свидетельствуют как о распространении радионуклида внутри легкого по кровеносным сосудам и бронхам (рис. 2, а), так и о возможном вытекании радиоактивного раствора за пределы легкого через проколы в легочной ткани (рис. 2, б).



а

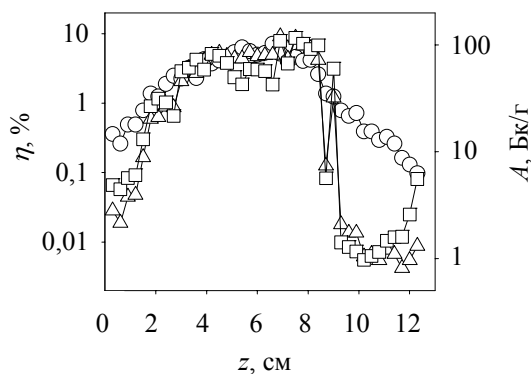


б

Р и с. 2. Срез (а) и общий вид (б) правого легкого свиньи № 1: 1 — распространение радиоактивного раствора по кровеносным сосудам и бронхам внутри легкого; 2 — вытекание раствора за пределы легкого через проколы от иглы шприца

(рис. 2, б).

Данные о вытекании раствора азотно-кислого ^{241}Am подтверждают результаты радиометрии срезов правого легкого свиньи № 1, по которым его суммарная активность составила 9,5 кБк, что примерно на 30% меньше введенной (14 кБк) (табл. 2). Анализ пространственного распределения ^{241}Am , представленный на рис. 3, сви-



Р и с. 3. Зависимость распределения массы правого легкого свиньи (○) и введенного в легкое ^{241}Am (△), удельной объемной активности ^{241}Am (□) от расстояния до вершины легкого по данным взвешивания и радиометрии срезов легкого

детельствует о том, что его основная доля сосредоточена в центральной части легких, вытекание произошло главным образом в небольших по размерам сечениях в верхней и нижней части легкого. В отличие от правого легкого свиньи № 1 существенного вытекания препарата из левого легкого свиньи № 1, а также из обоих легких свиньи № 2 не наблюдалось. Это подтверждается результатами измерения суммарной активности ^{241}Am на германиевом спектрометре ORTEC (США) по методике [12, 13]. В пределах погрешности (около 30%) измеренная активность не отличается от введенной (см. табл. 2).

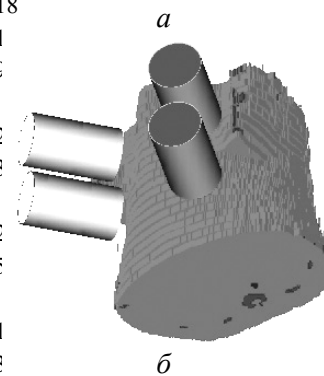
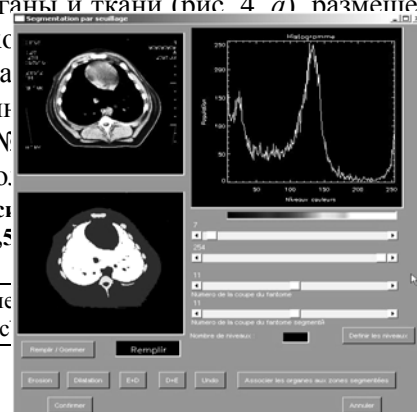
Т а б л и ц а 2. Радиоактивность ^{241}Am в легких свиней, кБк

Животное	Содержание ^{241}Am	
	Введено	Измерено
Свинья № 1, легкое:		
левое	13	12
правое	14	9,5
Свинья № 2, легкое:		
левое	27	24
правое	27	28

Сравнение расчетных и экспериментальных спектров. Для проверки применения программного комплекса OEDIPE для расчетной калибровки спектрометров излучения человека в условиях произвольной анатомии сравнивали экспериментальные и расчетные спектры. В ходе обработки результатов томографического сканирования свиней (разрешение 256×256 пикселей в каждом срезе) с помощью программы OEDIPE были выделены основные органы и ткани (рис. 4 а) размещение которых было представлено в виде файла исходных данных по программе MCNP (версия 4с2). В расчетной модели (введение радиоактивного препарата) источник был распределенный по объему легких, для свиней № 1 (введение препарата в капсулах) — как многоточечный (по

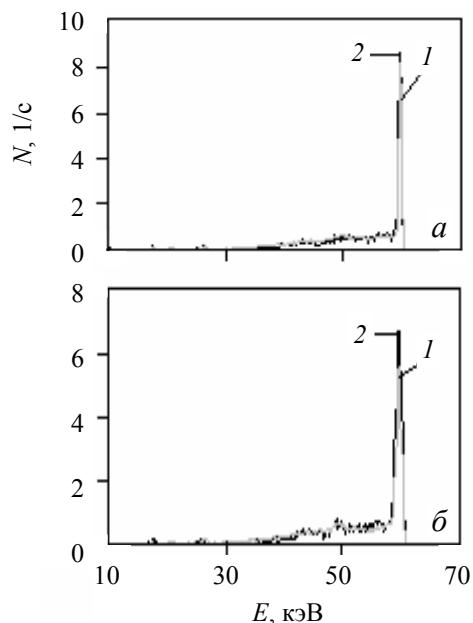
Т а б л и ц а 3. Расчетная и экспериментальная интенсивность основной линии ^{241}Am (59,5

Животное	Расчет (C), с ⁻¹ ·кБк ⁻¹	Эксперимент (E), с ⁻¹ ·кБк ⁻¹
Свинья № 1, детектор:		
левый верхний	1,23	1,18
» нижний	1,13	1,1
правый верхний	1,53	0,5
» нижний	0,88	0,2
Свинья № 2, детектор:		
левый	0,29	0,3
правый	0,40	0,2
Свинья № 3, детектор:		
левый	0,25	0,5
правый	0,55	0,1
Свинья № 4, детектор:		
левый	0,18	0,3
правый	0,28	



Р и с. 4. Выделение органов и тканей с помощью программы OEDIPE (а) и визуализация с помощью программы Sabrina (США) геометрии переноса излучения, записанной программой OEDIPE (Франция) как файл исходных данных для расчетов по программе MCNP (б)

видимому, вытеканием радиоактивного раствора из легкого. Это подтверждается как появлением цветового маркера на поверхности легкого, так и результатами радиометрии сечений легких, измеренная активность которых на 30% меньше введенной.



Р и с. 5. Экспериментальный (1) и рассчитанный по программе MCNP4c2 спектр (2) левого (а) и правого детектора (б), помещенного напротив верхней части легких свиньи № 1

Поскольку в расчетах вытекание радионуклида не учитывалось, это привело к завышению расчетной интенсивности пика полного поглощения по сравнению с экспериментальной на 27%. В целом измерения свиней с ^{241}Am , введенным в составе капсул, воспроизведены в расчетах с большей точностью вследствие меньшей неопределенности в знании положения источника при подготовке исходных данных программы MCNP.

Таким образом, исследования показали возможность воспроизведения результатов экспериментов методом Монте-Карло с высокой точностью. Введение радионуклида в составе капсул снизило разность между расчетной и экспериментальной интенсивностью основного пика полного поглощения ^{241}Am (59,54 кэВ) с 15–30% до менее чем 10%.

Работа выполнена в рамках проекта ИБФ-IRSN № 2699 под эгидой МНТЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Borisov N., Franck D., Laval L., de Carlan L.** A new graphical user interface for fast construction of computation phantoms and MCNP calculations: application to calibration of in vivo measurement systems. — *Health Phys.*, 2002, v. 83, p. 272–280.
2. **Борисов Н.М., Кочетков О.А., Яценко В.Н. и др.** Современная дозиметрия внутреннего облучения. — *Атомная энергия*, 2004, т. 97, вып. 3, с. 286–292.
3. **Briesmeister J.** MCNP — a General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4c. LA-13709-M, 2000.
4. **Rundo I., Keane A., May H.** Measurement of ^{241}Am in the ten-year-old boy. — In: *Assessment of Radioactive Contamination in Man*. Vienna: IAEA, 1972, p. 579–594.
5. **Whalen R., Davies Sh.** Americium contamination incident in a New York State Health Department Laboratory. — *Rad. Data & Reports*, 1972, v. 13, p. 249–253.
6. **Whalen D., Rosen I., Cohen N.** In vivo measurement of ^{241}Am in man. — In: *Assessment of Radioactive Contamination in Man*. Vienna: IAEA, 1972, p. 595–678.
7. **Даренская Н.Г., Ушаков И.Б., Иванов И.В. и др.** Экстраполяция экспериментальных данных на человека: принципы, подходы, обоснование методов и их использование в физиологии и радиобиологии. М.—Воронеж, 2004.
8. **Brown D., Thomas R., Jones L. e.a.** Lethal dose studies with cattle exposed to whole body ^{60}Co γ -radiation. — *Rad. Res.*, 1961, v. 15, p. 675–683.
9. **Нелюбов А.А.** Количественные закономерности и особенности поражения собак в условиях общих неравномерных γ -лучевых воздействий. Дис. на соискание уч. степени канд. биол. наук. М., Ин-т биофизики МЗ СССР, 1972.
10. **Buldakov L.A., Kalmykova Z.L., Nifatov A.P. e.a.** Metabolism, dosimetry and biological effects of inhaled ^{241}Am and ^{239}Pu in beagle dogs. — *Health Phys.*, 1972, v. 22, p. 863–871.
11. **Проблемы радиобиологии ^{241}Am .** Под ред. Ю.И. Москалева. М.: Атомиздат, 1977.

12. Левочкин Ф.К., Бочвар И.А., Соколова Т.Н. Способ определения активности γ -излучателей в объемных пробах любых составов и плотности и плоский источник-имитатор для его осуществления. — Аппаратура и новости рад. измерений, 2000, № 4, с. 18—24.
13. Левочкин Ф.К., Бочвар И.А., Соколова Т.Н., Яценко В.Н. Способ калибровки спектрометра энергии γ -излучения при измерении активности объемных источников. — Там же, 2003, № 4, с. 34—39.

Поступила в Редакцию 24.12.04