

## ВНУТРЕННЕЕ ОБЛУЧЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ “ГОРЯЧИМИ” РАДИОАКТИВНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Э.Н. Денисова, Ю.А. Кураченко  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
радиологии и агроэкологии, Обнинск

**Цель:** Исследование транспорта оплавленных радиоактивных частиц (ОРЧ) в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) крыс линии Вистар, их распределение по органам ЖКТ и формирование доз внутреннего облучения органов лабораторной крысы при двух моделях ОРЧ (трехкомпонентной и рениевой).

**Материал и методы:** Объектами исследований являлись крысы породы Вистар массой 200–300 г. В экспериментах использовались модельные ОРЧ с размерами 80–160 мкм “трехкомпонентной” ( $^{165}\text{Dy}$ , 42 %;  $^{142}\text{Pr}$ , 45 % и  $^{90}\text{Y}$ , 13 %) и “рениевой” ( $^{185}\text{Re}$ , 37,40 % и  $^{187}\text{Re}$ , 62,60 %) моделей натуральных выпадений ядерного взрыва. Активация нуклидов выполнялась посредством облучения образцов нейтронами реактора деления при средней плотности потока  $1,20 \cdot 10^{10}$  нейтрон/см<sup>2</sup>с. Время облучения образцов 10 ч, а длительность выдержки после облучения составляла 10 ч.

**Результаты:** Созданы алгоритмы применения воксельных моделей лабораторных животных для расчёта доз внутреннего облучения, обусловленных радиоактивными частицами в ЖКТ. Выполнены прецизионные расчёты, использующие данные, полученные методом Монте-Карло для воксельной модели внутреннего облучения грызунов. Источник в задаче транспорта излучений получен с применением компартментальной модели метаболизма, основанной на экспериментальных данных. Расчёты доз выполнены для основных внутренних органов с применением обеих моделей радиоактивных частиц, трехкомпонентной и рениевой.

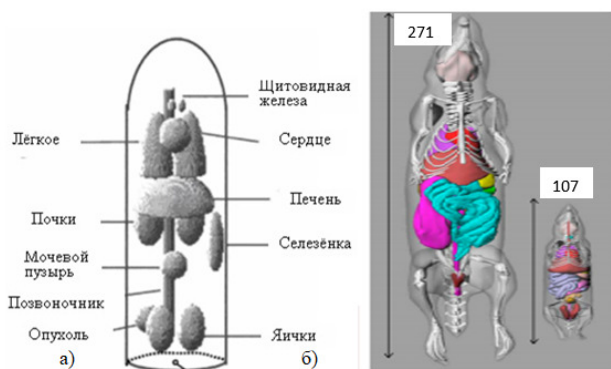
**Заключение:** Значения доз внутреннего облучения, полученные для двух моделей, удовлетворительно согласуются как между собой, так и с устоявшимися эмпирическими данными; расхождение моделей логичны и объяснимы различием характеристик излучения частиц двух моделей.

**Ключевые слова:** горячие радиоактивные частицы, внутреннее облучение, пищеварительный тракт, крысы, воксельный фантом, численные методы, поглощенные дозы

### Введение

Мелкие грызуны широко используются при тестировании новых радиофармпрепаратов, что требует создания фантомных моделей мышей. По мере того как все больше РФП тестируется на моделях животных, расчет точных оценок доз для самих животных становится важным для объяснения и контроля потенциальной радиационной токсичности или эф-

фективности лечения. Исторически сложилось так, что стилизованные и математически обоснованные модели использовались для установления доз для мелких животных ([1]; рис. 1а). Замена этих стилизованных моделей стала возможной после создания реалистичных моделей, основанных на фактических данных КТ-изображений мелких лабораторных животных.



**Рис. 1.** Пример стилизованной модели грызунов, разработанной Hindorf et al (а), [1]; модели ROBY и MOBY [3], показывающие длину каждой модели (в мм)

Segars et al создали модели человеческого тела, используя неоднородный рациональный В-сплайн (NURBS) [2] для построения реалистичных и гибких поверхностей органов. Эти модели представляли собой реалистичные изображения человеческого тела, как мужчин, так и женщин, в различном возрасте. Учитывая гибкость поверхностей NURBS, компьютерные инструменты, разработанные Segars et al, позволили быстро и легко манипулировать моделями органов и тела.

Далее была разработана серия анатомически реалистичных человеческих фантомов с использованием моделей тела, основанных на неоднородном рациональном В-сплайне. Реалистичные численные фантомы всего тела мыши (MOBY) и крысы (ROBY) были разработаны на основе той же технологии NURBS и использовались в исследовании [3] для облегчения расчета дозы внутреннего облучения у различных видов грызунов (рис. 1б).

Наконец, воксельные версии масштабированных моделей MOBY и ROBY применялись в многоузловой вычислительной сети Вандербильта (Advanced Computing Center for Research and Education), используя геометрию и код переноса излучения [4] для расчета конкретных поглощенных фракций (SAF, specific absorbed fraction) с внутренними источниками фотонов и электронов. Затем были рассчитаны фотонные и электронные SAF для соответствующих органов во всех моделях крыс массой 200–600 г, эти SAF разместили в Excel-таблицах [5, 6]. Эти таблицы использовались для расчета доз радиоактивных частиц во внутренних органах лабораторных крыс.

В настоящей работе получены и исследованы алгоритмы расчета доз внутреннего облучения крыс с помощью SAF. Включение радионуклидов в состав частиц с различной степенью растворимости [7] приводит к существенному изменению закономерностей транспорта радионуклидов в пищеварительном тракте и метаболизма радионуклидов в организме в целом. Кроме того, способность частиц к локализации на определенных участках ЖКТ создает условия длительного облучения слизистой оболочки и её радиационного поражения [8]. Отмеченные обстоятельства привели к высокой степени неопределенности в отношении долгосрочных экологических последствий и риска для здоровья человека и животных от присутствия радиоактивных частиц в окружающей природной среде [9].

За последние 20 лет появилось большое количество публикаций по численному моделированию внутреннего облучения лабораторных животных радионуклидами [10, 11]. Основное внимание в этих публикациях сосредоточено на создании фантомов животных, широко используемых в дозиметрических задачах. Эта деятельность получила значительное развитие с внедрением микроКТ-сканеров, позволившим изготавливать реалистичные (воксельные или комбинированные) фантомы мелких животных с высоким разрешением [12]. Набор сканов может быть передан на вход программы расчета транспорта излучений для оценки поглощенных доз, формируемых источником, например, в ЖКТ, во внутренних органах, что представляет значительный интерес для нашей работы [13].

Целью данной работы является исследование транспорта ОРЧ в ЖКТ крыс линии Вистар, их распределение по органам ЖКТ и формирование доз внутреннего облучения органов лабораторной крысы при двух моделях ОРЧ (трёхкомпонентной и рениевой).

## Материал и методы

Объектами исследований являлись крысы породы Вистар массой 200–300 г. В экспериментах использовались модельные ОРЧ с размерами 80–160 мкм “трехкомпонентной” ( $^{165}\text{Dy}$ , 42 %;  $^{142}\text{Pr}$ , 45 % и  $^{90}\text{Y}$ , 13 %) и “рениевой” ( $^{185}\text{Re}$ , 37,40 % и  $^{187}\text{Re}$ , 62,60 %) моделей натуральных выпадения ядерного взрыва возраста 10 ч [14, 15]. Все частицы в моделях ОРЧ преимуще-

ственно  $\beta$ -излучатели. Поэтому в работе рассчитывалась доза  $\beta$ -излучения радионуклидов модели и доза, производимая при транспорте  $\beta$ -частиц возникающим вторичным излучением, все процессы прослеживались до полной диссипации энергии.

Удельная активность частиц в расчётах на время их поступления в организм животных составляла 740 МБк (20 мКи) на 1 кг массы животного.

Оценку биокинетических параметров транспорта ОРЧ в ЖКТ животных проводили с помощью камерного анализа динамики содержания ОРЧ в отделах пищеварительного тракта после однократного поступления активности. Критерием адекватности математического моделирования являлось достижение максимального значения коэффициента детерминации ( $R^2 \geq 0,70$ ) и минимального значения коэффициента несовпадения Тейла (U) во всех камерах математической модели одновременно.

Расчеты выполняли путем решения системы дифференциальных уравнений в аналитическом виде, а также с применением численных методов расчета многофункциональной интерактивной вычислительной системы PTC Mathcad Prime 4.0.

Для расчетов поглощенных доз  $\beta$ -облучения органов была использована программа Монте-Карло (MCNP5) с соответствующими библиотеками ядерных данных для электронов и генерируемого  $\gamma$ -излучения [16]. При этом предполагалось, что ОРЧ равномерно распределены в излучающих органах ЖКТ, их излучение изотропно.

## Результаты и обсуждение

Активация нуклидов для двух моделей выполнялась посредством облучения образцов тепловыми нейтронами реактора при средней плотности потока  $1,20 \cdot 10^{10}$  нейтрон/см<sup>2</sup>с. Время облучения образцов 10 ч, а длительность выдержки после облучения составляла 10 ч. Для примера рассмотрим активацию Re:

$$d\rho^d/dt = \sigma\Phi_0\rho^p - \lambda\rho^d, \quad (1)$$

где  $\rho^d$ ,  $\rho^p$  – ядерная плотность ( $10^{24}$  см<sup>-3</sup>) нарабатываемого ( $^{186}\text{Re}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ) и материнского изотопа ( $^{185}\text{Re}$ ,  $^{187}\text{Re}$ );  $\sigma\Phi_0\rho^p$  – скорость (n,  $\gamma$ ) реакций (см<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup>);  $\sigma_{th}$ ,  $\Phi_0$  – групповые вектора сечения (n,

$\gamma$ ) реакции (б) и плотности потока фотонов (см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>);  $\lambda$  – постоянная распада (с<sup>-1</sup>).

Интегрирование (1) в интервале  $[0-t_{irr}]$  времени облучения с учетом начального условия  $\rho^d(t=0)=0$  дает плотность наработанных ядер [см<sup>-3</sup>]:

$$\rho^p = \sigma\Phi_0\rho^p(1 - \exp(-\lambda t_{irr}))/\lambda. \quad (2)$$

Удельная активность [Бк см<sup>-3</sup>] наработанного изотопа  $A = \lambda\rho^d$  при этом:

$$A = \sigma\Phi_0\rho^p(1 - \exp(-\lambda t_{irr})). \quad (3)$$

По истечении времени выдержки  $t_{cool}$  удельная активность будет:

$$A = \sigma\Phi_0\rho^p(1 - \exp(-\lambda t_{irr})) \times \exp(-\lambda t_{cool}). \quad (4)$$

В расчетах генерации радиоизотопов использовалась библиотека ядерных данных TENDL-2017, основанная на программе ядерных реакций TALES-1.9 [17].

Важной действующей характеристикой  $\beta$ -облучения является средняя энергия. Для каждого  $\beta$ -излучателя она рассчитывается следующим образом:

$$E_{av}^j = \frac{\int_{E_{low}}^{E_{max}^j} S^j(E) \times E dE}{\int_{E_{low}}^{E_{max}^j} S^j(E) dE}, \quad (5)$$

где  $E_{av}^j$  – средняя энергия  $j$ -го  $\beta$ -излучателя;  $S^j$  – спектр, сглаженный сплайном;  $E_{low}$  – энергия нижнего уровня спектра для  $j$ -го  $\beta$ -излучателя (в данном случае это минимальная энергия в библиотеке данных);  $E_{max}^j$  – максимальная энергия  $\beta$ -частиц в спектре  $j$ -го излучателя.

Соответствующие расчёты были выполнены в [4], и на рис. 2 представлена эволюция средней энергии для обеих моделей. При таком расхождении в значениях средней энергии излучения для двух моделей (пожалуй, основной характеристики излучения ОРЧ) обе эти модели применялись на практике. Целесообразно выяснить, насколько различие в средней энергии существенно для доз внутреннего облучения.

В работе [18] приведены результаты экспериментальных исследований динамики изменения содержания ОРЧ в отделах ЖКТ и выведения ОРЧ из организма животных после однократного перорального поступления. Там же приведены результаты математического моделирования на основе камерного анализа экспериментальных данных.

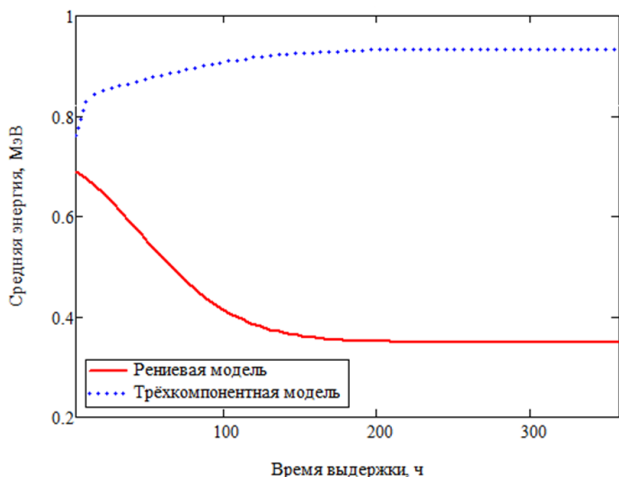


Рис. 2. Эволюция средней энергии для обеих моделей

Энергия, МэВ

0.01	0.015	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.5	1	1.5	2	4
(0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00)	Stomach Conte Brain										
(0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 1.37E-07 2.47E-07 7.11E-07 4.72E-06 1.29E-04 4.11E-04 1.24E-03)	Stomach Conte Heart Wall										
(1.00E+00 1.00E+00 1.00E+00 1.00E+00 1.00E+00 9.75E-01 8.05E-01 4.26E-01 2.36E-01 1.09E-01 5.13E-01 7.01E-02)	Stomach Conte Stomach										
(3.35E-06 7.87E-06 1.15E-05 2.12E-05 5.37E-05 1.78E-04 5.14E-04 1.44E-03 2.37E-03 2.60E-03 2.58E-03 2.01E-03)	Stomach Conte Small Intestine										
(0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 1.11E-06 1.31E-06 7.91E-05 1.51E-04 2.08E-04 3.06E-04)	Stomach Conte L.U. Wall										
(5.60E-07 5.22E-07 7.10E-07 9.10E-07 8.15E-07 1.62E-06 4.77E-06 6.42E-04 3.34E-03 4.27E-03 4.66E-03 4.01E-03)	Stomach Conte Kidneys										
(2.25E-05 4.22E-05 7.45E-05 1.54E-04 3.79E-04 1.23E-03 3.60E-03 9.47E-03 1.22E-02 1.30E-02 1.29E-02 1.07E-02)	Stomach Conte Liver										
(0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 1.34E-08 3.36E-07 3.61E-07 1.75E-05 1.20E-04 2.69E-04 8.41E-04)	Stomach Conte Lungs										
(1.27E-04 2.98E-04 4.60E-04 1.10E-03 2.51E-03 7.63E-03 2.28E-02 5.06E-02 4.29E-02 3.60E-02 3.32E-02 2.14E-02)	Stomach Conte Pancreas										
(3.25E-06 7.69E-06 9.58E-06 1.92E-05 5.11E-05 1.50E-04 4.78E-04 1.99E-03 2.78E-03 3.12E-03 3.44E-03 2.67E-03)	Stomach Conte Bone Surfaces										
(2.01E-05 9.32E-05 1.13E-04 2.42E-04 6.65E-04 2.19E-03 6.21E-03 1.72E-02 2.85E-02 3.31E-02 3.21E-02 2.11E-02)	Stomach Conte Spleen										
(0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 1.44E-06 4.02E-06 4.59E-05)	Stomach Conte Testes										
(0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00)	Stomach Conte Thyroid										
(0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00)	Stomach Conte Urinary Bladder Wall										
(4.55E-03 4.55E-03 4.55E-03 4.55E-03 4.55E-03 4.54E-03 4.54E-03 4.54E-03 4.48E-03 4.31E-03 4.05E-03 2.88E-03)	Stomach Conte Total Body										

Рис. 3. Матрица SAF для желудка (содержимое) и внутренних органов: головной мозг – строка 1, расчёт не проводился; строка 2 – стенки сердца; 3 – стенки желудка; 4 – тонкая кишка; 5 – толстая кишка; 6 – почки; 7 – печень; 8 – лёгкие; 9 – поджелудочная железа; 10 – скелет; 11 – селезёнка; 12 – яички; 13 – щитовидная железа; 14 – мочевого пузыря; 15 – всё тело

В табл. 1 представлены оптимальные значения констант скорости транспорта, минимальные значения коэффициента детерминации (R2) в каком-либо отделе ЖКТ (камере), полученные при камерном моделировании транспорта ОРЧ в ЖКТ животных и значения среднего времени пребывания (mean residual time – MRT) частиц в их организме.

Для расчётов дозы использовалась Excel-матрица SAF для источника – содержимого желудка и мишеней – внутренних органов крысы (рис. 3).

В головном мозге, яичках, щитовидной железе и мочевом пузыре данные SAF отсутствуют (удалённость мишени от источника и неинформативность недифференцированного результата).

В среде MathCad (MathCad – система компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования, ориентированная на подготовку интерактивных документов с вычислениями и визуальным сопровождением) вычисляем сплайны  $M_i$  по аргументу  $E_{k,i}$  – энергия, для которой представлены SAF, и собственно функция  $SAF_{k,i,j}$  (здесь  $k$  – индекс то-

чек по энергии в представлении SAF). Аналогично получаем непрерывную функцию для спектра конкретного нуклида. Свёртка этих непрерывных функций по области существования источника определяет мощность поглощённой энергии (т.е. мощность дозы), интегрирование по времени позволит оценить дозу:

$$D_{j,i} = \frac{1,602 \cdot 10^{-10}}{m_i} \times SM_{j,i} \times \int_{t_0}^{t_{max}} A_j(t) dt, \quad (6)$$

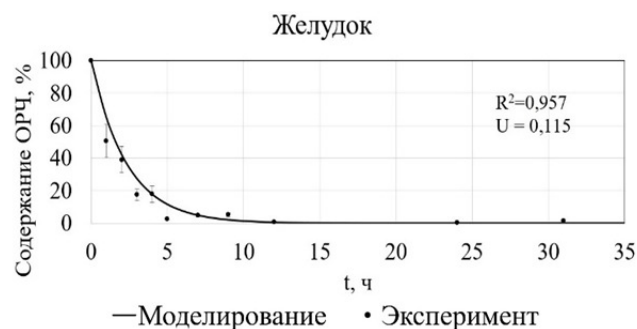
$$SM_{j,i} = \int_{0,001}^{E^{UP}} ES_j(E) \times M_i(E) dE, \quad (7)$$

где  $j, i$  – индексы излучающего радионуклида ( $^{186}Re, \dots$ ) и органа-мишени соответственно;  $M_i$  – сплайн-функция, построенная на строке матрицы для  $i$ -го органа;  $A_j$  – изменение активности  $j$ -го радионуклида в источнике; рассчитывается с помощью данных по спаду полной активности (рис. 4) и изменения доли каждого радионуклида в источнике;  $S_j$  – сплайн-функ-

Таблица 1

**Биокинетические параметры камерной модели ЖКТ крыс и среднее время пребывания ОРЧ в организме животных**

Вид животного	Биокинетические параметры модели, ч <sup>-1</sup>			Коэффициент детерминации (R <sup>2</sup> )			Среднее время пребывания ОРЧ в организме (MRT), ч
	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	Желудок	Тонкая кишка	Толстая кишка	
Крысы	0,430	0,420	0,108	0,957	0,892	0,810	8,4



**Рис. 4.** Зависимость полной активности в желудке от времени

ция спектра  $j$ -го радионуклида;  $m_j$  – масса органа.

Произведение  $ES$  выделяет из спектра переносимую энергию, доля которой в соответствии с матрицей  $SAF$  остаётся в органе.

Коэффициент  $1,602 \cdot 10^{-10}$  переводит (МэВ/г) в Гр.

Сплайн переводит дискретную (табличную) зависимость в непрерывную функциональную, которую можно интегрировать и т.д.

Спад активности в источнике (в желудке крысы) был получен в данной работе использованием камерной модели метаболизма (рис. 4) и применялся наряду с экспериментальными

данными. Данные по дозам ниже приводятся для расчётного спада активности: экспериментальный спад содержит артефакты (немонотонен по времени).

Полученные значения поглощенной дозы в органах крысы массой 200 г для обеих моделей источника представлены в табл. 2.

Доза на стенках желудка была довольно значительной при такой вводимой активности, в результате чего паренхиматозные органы, ближайшие к источнику (поджелудочная железа, селезенка), также получали значительные дозы облучения.

По абсолютной величине поглощённые дозы  $\beta$ -облучения слизистой оболочки ЖКТ, потенциально способные вызвать летальные исходы ( $\sim LD_{50}$ ), соответствуют значениям в диапазоне от 13 до 23 Гр. Интересно отметить, что эти дозы сопоставимы с уровнями тотального  $\gamma$ -облучения грызунов, вызывающими желудочно-кишечный радиационный синдром при острой лучевой болезни (от  $\sim 10$  до 20 Гр) [19]. Наблюдаемые эффекты характеризовались гастроэнтероколитами, язвенными поражениями железистой части желудка и толстого отдела кишечника, дистрофическими изменениями печени, почек, селезенки, снижением массы тела [20].

**Таблица 2**

**Поглощенная доза в органах модели крысы Вистар с источником в желудке**

Наименование органа, ткани	Масса, г	Поглощенная доза, Гр	
		Рениевая модель	Трехкомпонентная модель
Сердце	1,80	$9,00 \cdot 10^{-4}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$
Желудок	0,941	10,1	10,6
Тонкий кишечник	10,6	0,00619	0,00917
Толстый кишечник	7,86	$3,03 \cdot 10^{-4}$	$5,83 \cdot 10^{-4}$
Почки	2,06	0,0411	0,0692
Печень	7,55	0,0468	0,0670
Легкие	0,594	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$5,95 \cdot 10^{-3}$
Поджелудочная железа	0,368	3,60	4,56
Кость (или скелет)	15,3	0,00508	0,00778
Селезенка	0,607	1,68	1,98
Семенники	0,174	0	0
Щитовидная железа	0,191	0	0
Мочевой пузырь	0,475	0	0
Все тело	226	$6,21 \cdot 10^{-4}$	$8,13 \cdot 10^{-4}$

## Заключение

В результате выполнения работы создан и апробирован алгоритм использования данных прецизионного расчёта дозы облучения для внутренних органов воксельной модели лабораторной крысы с радиоактивными частицами в желудочно-кишечном тракте. Расчёты выполнены для двух применяемых на практике моделей радиоактивных частиц, полученные результаты взаимосогласованы для применяемых моделей и соответствуют общепризнанным.

## Список литературы

- Hindorf C, Ljungberg M, Strand S-E. Evaluation of parameters influencing S values in mouse dosimetry. *J Nucl Med.* 2004;45:1960-5.
- Segars WP, Lalush DS, Tsui BMW. Development of an interactive software application to model patient populations in the spline-based MCACT phantom. *IEEE Nucl Sci Symp Conf Rec.* 2000;3:20/51-20/55.
- Segars WP, Tsui B. 4D MOBY and NCAT phantoms for medical imaging simulation of mice and men [abstract]. *J Nucl Med.* 2007; 48(suppl 2): 203.
- X-5 Monte Carlo Team. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I: Overview and Theory // LA-UR-03-1987. 2003. 484 p.
- Keenan MA, Stabin MG, et al. RADAR Realistic Animal Model Series for Dose Assessment. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/eutils/elink.fcgi?dbfrom=pubmed&retmode=ref&cmd=prlinks&id=20197451>.
- RADAR - Available Phantoms. <https://www.doseinfo-radar.com/RADARphan.html>.
- Radioactive Particles in the Environment: Sources, Particle Characterization and Analytical Techniques. IAEA-TECDOC-1663. IAEA. Vienna. 2011; 77.
- Salbu B, Krekling T, Hove K, et al. Biological relevance of hot particles ingested by domestic sheep. *International Symposium on Environmental Impact of Radioactive Releases.* Vienna: IAEA. 1995: 312-3.
- CRP: Environmental behaviour and potential biological impact of radioactive particles (2.4.4.1). IAEA Coordinated Research Project. 2013-7.
- Stabin MG, et al. Voxel-Based Mouse and Rat Models for Internal Dose Calculations. *J Nucl Med.* 2006; 47(4): 655-9.
- Qualls G, et. al. A Rat Body Phantom for Radiation Analysis. NASA/TP-2010-216212.
- Larsson E, et. al. Monte Carlo calculations of absorbed doses in tumours using a modified MOBY mouse phantom for pre-clinical dosimetry studies. *Acta Oncologica.* 2011; DOI: 10.3109/0284186X.2011.582517UDC539.1.047; 519.245.
- Kurachenko Yu, Sanzharova N, Kozmin G, et al. Cattle's Thyroid Dose Estimation with Compartmental Model of Iodine Metabolism and Monte Carlo Transport Technique. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2018; 63(5): 48-54.
- Козьмин ГВ, Куринный ВД, Спирин ЕВ, Потетня ВИ. Принципы моделирования радиоактивных частиц локального следа наземного ядерного взрыва. В сб. Доклады конф. ВНИИВВиМ. Покров: ВНИИВВиМ, 1976. С. 9-14.
- Целищев СП. Искусственные радиоактивные частицы для изучения радиационного поражения животных на следе наземного ядерного взрыва в модельных экспериментах. В сб. Проблемы животноводства в зоне следа наземного ядерного взрыва. Под ред Б.Н. Анненкова. М.: ВНИИСХР, 1978. С. 29-49.
- Radiological Toolbox User's Guide <https://www.nrc.gov/reading-rm.html>.
- Koning A, Hilaire S, Goriely S, TALYS-1.9. A nuclear reaction program. <ftp://ftp.nrg.eu/pub/www/talys/talys1.9.pdf>. 2017:554.
- Денисова ЭН, Меджидов ИМ, Басова МА, и др. Алгоритм расчета доз во внутренних органах воксельной модели крысы. В сб.: Международная научно-практическая конференция "Радиоэкологические последствия радиационных аварий (к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС)". Обнинск. 22-23 апреля, 2021.
- Бутомо НВ, Гребенюк АН, Легеза ВИ и др. Основы медицинской радиобиологии. – Санкт-Петербург: Фолиант, 2004:380. [Butomo NV, Grebenyuk AN, Legeza VI. i dr. Osnovi medicinskoj radiobiologii. Sankt-Peterburg: Foliant; 2004:380. (in Russ.)].
- Ветеринарная радиобиология. Под общ. ред. В.А. Бударкова. Покров: ВНИИВВиМ 1983: 126.

**LABORATORY ANIMALS INTERNAL IRRADIATION BY HOT RADIOACTIVE PARTICLES***E.N. Denisova, Yu.A. Kurachenko**Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia*

**Purpose:** Research investigation the fused radioactive particles (FRP) transport in the gastrointestinal tract (GIT) of Wistar rats, their distribution over the GIT organs and the internal radiation dose accumulation in laboratory rat organs with two models of FRP (three-component and rhenium).

**Material and methods:** The objects of research were Wistar rats weighing 200-300 g. The simulating fused radioactive particles (FRP) sized 80-160 microns of three-component ( $^{165}\text{Dy}$ , 42 %;  $^{142}\text{Pr}$ , 45 % and  $^{90}\text{Y}$ , 13 %; start content in stomach) and rhenium ( $^{185}\text{Re}$ , 37.07 % and  $^{187}\text{Re}$ , 62.93 %; content before reactor irradiation) particle models of a nuclear explosion full-scale fallout with 10 h age were used in experiments.

The nuclides were activated by irradiating the samples with thermal reactor neutrons at an average flux density of  $1.20 \cdot 10^{10}$  neutrons/cm<sup>2</sup>c. The irradiation time of the samples was 10 hours, and the cooling time after irradiation was 10 hours.

**Results:** Algorithms for using voxel models of laboratory animals to calculate internal radiation doses caused by FRP in the gastrointestinal tract (GIT) have been developed. Precision calculations are performed using the data obtained by the Monte Carlo technique for the voxel model of internal rodent irradiation. The source in the radiation transport problem was obtained by a compartmental model of metabolism based on experimental data. Dose calculations were performed for the GIT and main internal organs using both three-component and rhenium models of radioactive particles.

**Conclusion:** The values of internal radiation doses obtained with the two models are in satisfactory agreement both with each other and with conventional empirical data; the discrepancy between the models' data is logical and can be explained by the difference in the characteristics of the particle radiation for the two models.

**Key words:** *hot radioactive particles, internal exposure, digestive tract, rats, voxel phantom, numerical techniques, absorbed dose*

E-mail: [ellaizaden@mail.ru](mailto:ellaizaden@mail.ru)