

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Денисова Эльвира Николаевна

**Транспорт радиоактивных частиц в желудочно-кишечном тракте животных и
дозовые нагрузки на внутренние органы**

1.5.1. Радиобиология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт – ВНИИРАЭ»).

Научный руководитель – **Кураченко Юрий Александрович**, доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты – **Желтоножская Марина Викторовна**, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», старший научный сотрудник кафедры физики ускорителей и радиационной медицины, отделение ядерной физики.

Мамихин Сергей Витальевич, доктор биологических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», ведущий научный сотрудник кафедры радиоэкологии и экотоксикологии, факультет почвоведения.

Крышев Иван Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, институт экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун», главный научный сотрудник.

Защита диссертации состоится «14» декабря 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета МГУ.014.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 10, ауд. 308.

E-mail: severin@radio.chem.msu.ru (А.В. Северин, ученый секретарь диссертационного совета МГУ.014.6); ellaizaden@mail.ru (Э.Н. Денисова, соискатель).

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/014.6/2690>

Автореферат разослан «__» ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук



А.В. Северин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В настоящее время интенсивно развиваются отрасли промышленности, в которых применяются ядерные материалы и радиоактивные вещества (ЯМ и РВ). Несмотря на совершенствование мер безопасности по ограничению их распространения существует риск поступления ЯМ и РВ в окружающую среду вследствие радиационных аварий, военных конфликтов и террористических атак. При этом один из наиболее опасных факторов радиационного воздействия на живые организмы являются выбросы радиоактивных изотопов в составе «горячих» частиц, а также радионуклиды йода. В условиях формирующегося радиоактивного загрязнения актуализируются вопросы транспорта «горячих» частиц и оценки доз облучения как человека, так и биоты, среди которых особую роль играют животные. Важная роль в радиобиологических исследованиях радиационного поражения отводится одному из звеньев пищевой цепочки – крупному рогатому скоту (КРС). Поражение щитовидной железы (ЩЖ) КРС в первые недели после радиоактивных выбросов может привести к необратимому разрушению паренхиматозной ткани ЩЖ и гибели животных [1]. Оценка-прогноз накопленной дозы в ЩЖ позволит принять рациональное решение по разработке системы быстрого реагирования и применения противорадиационных мероприятий. Не менее важна оценка транспорта частиц и доз внутреннего облучения слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта лабораторных животных (ЛЖ), в частности, крыс [2]. Это связано с тем, что эти ткани являются первичной мишенью облучения «горячими» частицами, а также со сходным строением слизистых оболочек млекопитающих, что позволит экстраполировать полученные результаты на организм человека. К тому же относительно небольшие размеры (ЛЖ) позволяют применить современные методы воксельного моделирования композиции и состава материалов ЖКТ для прецизионных расчётов доз методом Монте-Карло.

Однако, несмотря на актуальность исследований транспорта «горячих» частиц в ЖКТ ЛЖ и переноса (*transfer*) радиоактивного йода в ЩЖ КРС, следует констатировать недостаточную изученность этой проблемы, с чем связан широкий разброс дозиметрических оценок, что и определяет цели и задачи настоящей диссертационной работы.

Цель и задачи исследования. Разработать теоретические основы и современный программно-методический аппарат вычисления доз внутреннего облучения критических органов лабораторных и сельскохозяйственных животных при пероральном поступлении радиоактивных частиц.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработать и программно реализовать камерную модель для задач транспорта радиоактивных частиц в ЖКТ ЛЖ.
2. Разработать технологии применения метода Монте-Карло к расчётам

транспорта β - и γ - излучений, обусловленных внутренним источником в ЖКТ ЛЖ и в ЩЖ КРС.

3. Выполнить расчёт дозовых нагрузок на внутренние органы ЛЖ и КРС с использованием прецизионных моделей переноса излучений (код MCNP5) и современных библиотек ядерных данных (TENDL).

4. Выявить, опираясь на данные эмпирических исследований, взаимосвязи между дозами внутреннего облучения и радиобиологическими эффектами при пероральном поступлении радиоактивных частиц в ЖКТ ЛЖ и в ЩЖ КРС.

Методология исследования. Полученные результаты основаны на камерном анализе экспериментальных данных. Разработка камерной модели для лабораторных животных был реализован в визуальной среде Lazarus, относящейся к категории свободно распространяемой на основе GNU General Public License. Расчёт дозовых нагрузок на внутренние органы ЛЖ и КРС выполнен с использованием программы MCNP и современных библиотек ядерных данных TENDL. При отображении предметной области (органов и тканей животных) в среде программы MCNP построены и применяются в расчёте современные реалистичные и воксельные модели.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная камерная модель переноса оплавленных радиоактивных частиц (ОРЧ) в ЖКТ лабораторных животных позволяет оценить динамику изменения активности радионуклидов в отделах ЖКТ, а также динамику выведения из организма животных при поступлении ОРЧ.

2. Использование разработанного камерного анализа позволяет проводить расчёт поглощённых доз внутреннего облучения животных частицами радиоактивных выпадений.

3. Величина критической дозы в ЩЖ КРС (~ 330 Гр), приводящая к необратимому разрушению паренхиматозной ткани железы, имеет большое практическое значение для принятия решения (по утилизации животного, переводу на чистые корма и т.п.).

4. Коэффициенты пересчёта активности изотопов йода в ЩЖ в мощность дозы позволяют оперативно сделать прогноз полной дозы и принять необходимые решения.

5. Получена совокупность доз облучения основных внутренних органов лабораторных животных при пероральном поступлении радиоактивных частиц. Эти данные могут быть использованы при расчёте активности в пищевых цепочках для оценки дозовой нагрузки на биоту.

Научная новизна

1. Разработана и программно реализована камерная модель для задач транспорта радиоактивных частиц в ЖКТ ЛЖ.

2. Предложены новые подходы к прецизионным расчётам доз внутреннего

облучения при предельно точном моделировании конфигурации и состава области переноса излучений, а также учёте всей полноты ядерных превращений, вносящих вклад в формирование дозы критических органов животных при радиационных авариях.

3. Разработана и реализована технология применения метода Монте-Карло к расчётам транспорта β - и γ - излучений, обусловленных внутренним источником в ЖКТ ЛЖ и в ЩЖ КРС.

4. Для лабораторных животных выявлена слабая чувствительность доз внутреннего облучения от применяемых моделей радиоактивных частиц (трёхкомпонентной, рениевой и др.), что облегчает оценку дозовых нагрузок.

Теоретическая и практическая значимость

1. Разработан комплекс программ и вычислительная технология для расчёта доз облучения внутренних органов лабораторных животных при радиационных авариях (РА).

2. Применение развитого вычислительного аппарата (библиотеки ядерных данных, учитывающих всю полноту возможных реакций, и прецизионной модели предметной области, в частности, реалистичных и воксельных фантомов органов и тканей) позволяет повысить надёжность прогноза доз при РА и получить новые результаты.

3. Разработанный комплекс программ дает возможность принять рациональное решение по разработке системы быстрого реагирования и применения противорадиационных мероприятий.

Достоверность результатов. Достоверность представленных в работе результатов обеспечивается использованием апробированных подходов и моделей. Результаты Монте-Карло моделирования, полученные при помощи программы MCNP, находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными и проведенными ранее другими авторами расчётными исследованиями. Кроме того, величины полученных доз на органы ЖКТ непосредственно подтверждаются наблюдением за облучёнными животными и косвенно – с общепринятыми результатами терапевтического облучения в радиационной медицине.

Апробация работы. Основные положения диссертации и полученные результаты были представлены и обсуждены на следующих конференциях, съездах и семинарах: II Международная научная конференция «Техногенные системы и экологический риск-2018» (Обнинск, 2018); Международная молодежная конференция «Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии» (Обнинск, 2019); VII Международная молодежная научная конференция, «ФТИ-2020» (Екатеринбург, 2020); Международная научно-практическая конференция «Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве» (Обнинск, 2020); Ежегодная научная конференция

«Ломоносовские чтения» (Москва, 2021); Международная научно-практическая конференция «Радиоэкологические последствия радиационных аварий» к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС (Обнинск, 2021); VIII Международная молодежная научная конференция, «ФТИ-2020» (Екатеринбург, 2021); LXXII Международная конференция «ЯДРО-2022: Фундаментальные вопросы и приложения» (Москва, 2022); Школа-конференция молодых ученых и специалистов «Ильинские чтения» (Москва, 2022).

Исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований («Прецизионное моделирование радиационного воздействия «горячих» радиоактивных частиц на организм лабораторных животных» № 19-316-90014).

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в формулировке идеи исследования, постановке задач, разработке расчётных методов, она самостоятельно проводила анализ и обработку полученных и изложенных в диссертации результатов, а также совместно с соавторами участвовала в написании научных статей, представлении и обсуждении результатов исследования на конференциях и симпозиумах.

Публикации: Основные результаты диссертации отражены в 21 публикации, в том числе 2 публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых международными базами данных Web of Science & Scopus, 1 публикация в журнале, входящем в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, и 2 свидетельствах на программу для ЭВМ.

Структура и объем диссертации состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 82 страницы текста с 17 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 101 наименование.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований по теме диссертации, формулируется цель работы, приводятся основные результаты, обосновывается их научная новизна, практическая значимость и достоверность, описывается личный вклад автора, приводится список публикаций и докладов на конференциях, на которых были представлены результаты выполненных исследований, приводится структура и краткое содержание диссертации.

ГЛАВА I Обзор литературы

В первой главе предложен современный подход к созданию прецизионной вычислительной технологии, опирающейся на представление всех входящих составляющих: источника излучений, именно переноса (*transfer*) активности в желудочно-кишечном тракте (камерная модель), транспорта излучений в воксельной модели животного/его органов посредством численного решения уравнения переноса при учёте всех ядерно-физических процессов и исчерпывающем представлении всей предметной области.

ГЛАВА II Материалы и методы

Во второй главе работы содержится описание объектов исследования, описаны основные методы и средства исследований. Для иллюстрации применения предлагаемого подхода рассмотрена задача внутреннего облучения референтного вида ЛЖ модельными «горячими» частицами и щитовидной железы КРС радиоизотопами йода в первые одну-две недели после радиационной аварии с выбросом радиоактивности.

Исходными данными для выполнения настоящей работы являлись архивные материалы, полученные в ходе экспериментальных исследований по оценке радиационного воздействия частиц локальных выпадений наземных ядерных взрывов на организм лабораторных и сельскохозяйственных животных [3, 4].

В экспериментах на лабораторных животных использовались белые половозрелые крысы линии «Вистар» (Wistar) массой от 200-300 г. Также были использованы модельные ОРЧ с размерами 80-160 мкм «трехкомпонентной» (^{165}Dy 42%, ^{142}Pr 45% и ^{90}Y 13%) и «рениевой» (^{185}Re , 37,40 % и ^{187}Re , 62,60 %) моделей натуральных выпадений ядерного взрыва [5, 6]. Удельная активность частиц в расчётах на время их поступления в организм животных составляла 740 МБк (20 мКи) на 1 кг массы животного. Все частицы в моделях ОРЧ преимущественно β -излучатели. Диссипация энергии происходит в цепочках $\beta \rightarrow \gamma \rightarrow \beta \rightarrow \dots$, программа при расчёте дозы отслеживает все цепочки деградации энергии до 1 кэВ.

В экспериментах на сельскохозяйственных животных были задействованы три

клинически здоровые коровы в возрасте четырех – пяти лет, массой 380-520 кг и удоем 6,5 – 9,5 л в сутки. Каждое животное получило перорально 185 МБк активности ^{131}I , смешанной с травой.

Камерная модель переноса йода была адаптирована для анализа экспериментальных данных [7], полученных на телятах. Оценку диапазона для констант скорости k_{ij} у телят проводили с использованием параметров, полученных в эксперименте на дойных коровах [8] без камеры вымени (рис. 4.1), а также с максимальными параметрами переноса (*transfer*), более свойственными молодому животному. В эксперименте [7] телятам трёхмесячного возраста с массой тела ~ 60 кг скармливали ^{131}I с двумя литрами молока ежедневно в течение шести дней: в первые сутки 185 МБк, активность последующих порций снижалась в соответствии с периодом полураспада радионуклида. На 11-е сутки наблюдений отмечено резкое снижение мощности дозы γ -излучения в области ЩЖ [9], возможно, за счёт лучевой деструкции паренхиматозной ткани ЩЖ и выведения ^{131}I в кровотоки. Не исключена также вероятность радиационно-химического разложения тироксина в ткани ЩЖ.

Морфология ЩЖ, плотность ткани, масса и характерные размеры взяты из [10; 11; 12]. Размеры ЩЖ коровы были взяты из [11]: для коровы с весом ~500 кг усредненные значения составляют 20,0 см³ и 20,6 г. Для телят трёхмесячного возраста с массой тела 60 кг, фигурирующих в эксперименте [7], согласно [10] средний объём и масса ЩЖ составляют 11,6 см³ и 12,0 г соответственно. Состав ткани ЩЖ плотностью 1.03 г/см³, кроме четырёх основных элементов, включает Na, P, S, Cl, K и I [12] (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Элементный состав ЩЖ КРС (масс. %)

H	C	N	O	Na	P	S	Cl	K	I	Total
10,4	11,9	2,4	74,5	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	100

Анализ экспериментальных данных проводили с помощью программы Microsoft Office Excel, а также с применением вычислительной системы PTC Mathcad Prime.

Значения констант скорости транспорта ОРЧ в настоящей работе определяли с использованием критериев адекватности результатов математического моделирования экспериментальным данным путем комбинаторного перебора кинетических параметров камерной модели. Критерием адекватности математического моделирования являлось достижение максимального значения коэффициента детерминации ($R^2 \geq 0,75$) и минимального значения коэффициента несовпадения Тейла во всех камерах математической модели одновременно.

Расчёт поглощённых доз в органах и тканях животных выполнялся с применением программы MCNP5 [13] с соответствующими библиотеками ядерных

данных для электронов и генерируемого γ -излучения. При этом предполагалось, что ОРЧ равномерно распределены в излучающих органах ЖКТ животных, их излучение изотропно. Расчёты проводились для разных энергий электронов от 100 кэВ до 4 МэВ.

Глава III Внутреннее облучение лабораторных животных

Моделирование переноса (*transfer*) ОРЧ в ЖКТ ЛЖ. Для исследования процессов транспорта радиоизотопов в ЖКТ крыс применён камерный подход (рис. 3.1) [14].

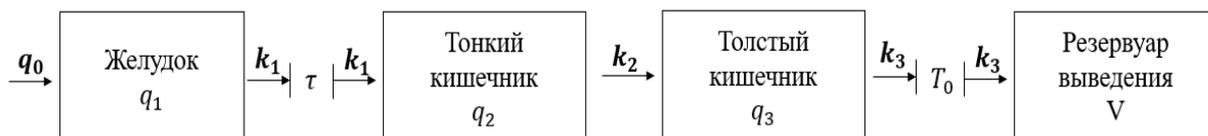


Рисунок 3.1 –Камерная модель транспорта ОРЧ в ЖКТ крыс

Константы k_i (ч^{-1}) связаны с переносом ОРЧ между камерами системы вследствие следующих процессов:

q_0 – количество ОРЧ, однократно поступивших в организм животных (100%);

τ – время задержки выведения ОРЧ из желудка, ч;

T_0 – время задержки радиоактивных частиц в толстом отделе кишечника, ч;

q_1, q_2, q_3 – содержание ОРЧ (% от поступившего количества) в отделах ЖКТ;

V – содержание ОРЧ в резервуаре выведения (%);

k_1, k_2, k_3 – константы скорости выведения ОРЧ для каждого из отделов ЖКТ, ч^{-1} .

В общем виде динамика обмена ОРЧ между отдельными камерами ЖКТ крыс (рис. 3.1) может быть описана системой дифференциальных уравнений I порядка:

$$\frac{dq_i}{dt} = q_i^0 + \sum_{i=1}^n k_i \cdot q_n \quad (3.1)$$

здесь

q_i, q_n – содержание ОРЧ в камерах системы, %;

q_i^0 – поступление ОРЧ извне, %;

k_i – константы скорости выведения ОРЧ для каждого из отделов ЖКТ, ч^{-1} ;

Система дифференциальных уравнений I порядка, описывающая транспорт ОРЧ между отдельными камерами системы (рис. 2.2), имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dq_1(t)}{dt} = -k_1 \cdot q_1(t) \\ \frac{dq_2(t)}{dt} = k_1 \cdot q_1(t) - k_2 \cdot q_2(t) \\ \frac{dq_3(t)}{dt} = k_2 \cdot q_2(t) - k_3 \cdot q_3(t) \\ \frac{dV(t)}{dt} = k_3 \cdot q_3(t) \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} q_1(0) &= q_0 \\ q_2(0) &= q_3(0) = V(0) = 0 \end{aligned}$$

Первое уравнение описывает поступление ОРЧ в желудок крысы. Второе и третье уравнения характеризуют изменения содержания ОРЧ в толстом и тонком кишечнике, соответственно. Четвертое уравнение описывает процесс выведения ОРЧ из организма крыс. Отрицательные члены уравнения определяют собой интенсивность исходящего потока из данной камеры.

Ниже представлены решения дифференциальных уравнений, характеризующие зависимость содержания ОРЧ в отделах пищеварительного тракта и резервуаре выведения рассматриваемых ЛЖ от времени после однократного перорального поступления:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1(t) = q_0 \cdot e^{-k_1(t-\tau)} \\ q_2(t) = \frac{k_1 q_0 e^{-k_2(t-\tau)}}{k_1 - k_2} [1 - e^{-(k_1 - k_2)(t-\tau)}] \\ q_3(t) = k_1 k_2 q_0 \left[\frac{e^{-k_3(t-\tau)}}{(k_2 - k_3)(k_1 - k_3)} + \frac{1}{k_1 - k_2} \cdot \left(\frac{e^{-k_1(t-\tau)}}{k_1 - k_3} - \frac{e^{-k_2(t-\tau)}}{k_2 - k_3} \right) \right] \\ V(t) = q_0 - \frac{k_2 k_3 q_0 e^{-k_1(t-\tau)}}{(k_1 - k_2)(k_1 - k_3)} + \frac{k_1 k_3 q_0 e^{-k_2(t-\tau)}}{(k_1 - k_2)(k_2 - k_3)} - \frac{k_1 k_2 q_0 e^{-k_3(t-\tau)}}{(k_2 - k_3)(k_1 - k_3)} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Результаты и их обсуждение. На рисунке 3.2 представлены результаты экспериментальных исследований динамики изменения содержания ОРЧ в отделах ЖКТ и выведения ОРЧ из организма животных после однократного орального поступления. Там же приведены результаты математического моделирования на основе камерного анализа экспериментальных данных.

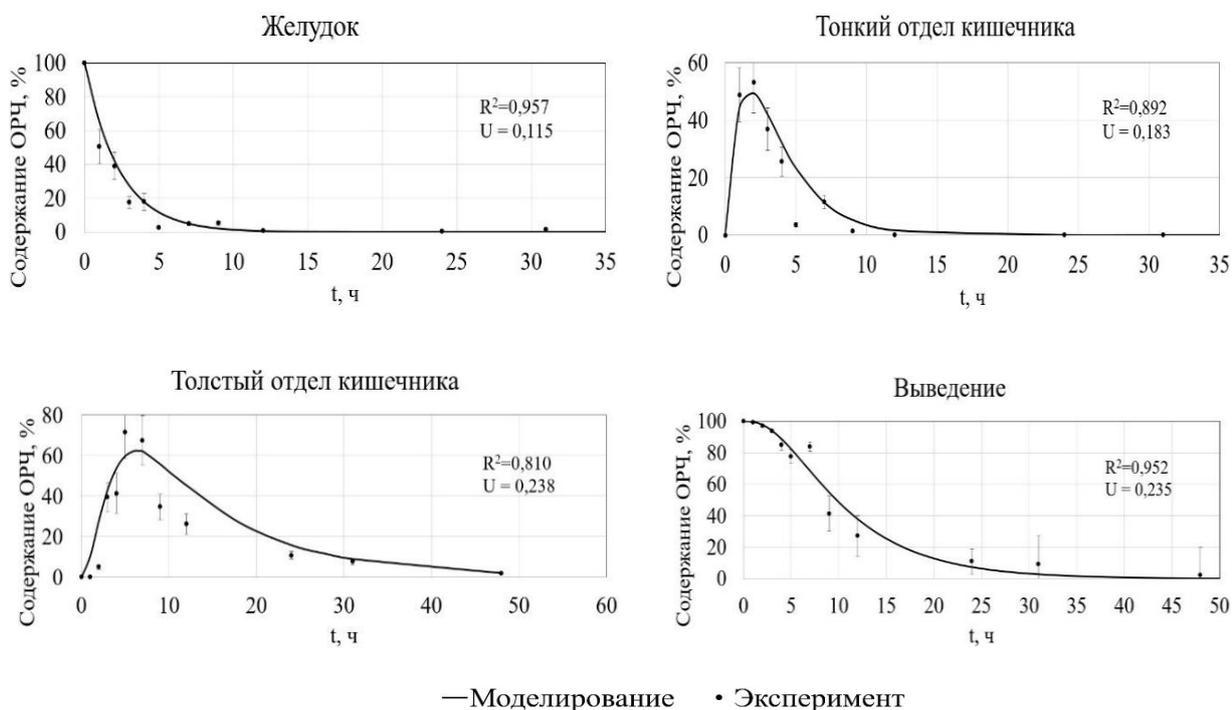


Рис. 3.2 – Динамика содержания ОРЧ в ЖКТ крыс

Из рисунка 3.2. видно удовлетворительное согласие экспериментальных и расчётных данных, о чём свидетельствуют полученные коэффициенты детерминации (R^2) и параметры критерия несовпадения Тейла (U). Данное обстоятельство позволяет использовать предложенные камерные модели для расчёта средних поглощённых доз облучения слизистой оболочки отделов ЖКТ при условии гомогенного распределения ОРЧ в содержимом пищеварительного тракта.

Оптимальные значения констант скорости транспорта представлены в табл. 3.1. Там же приведены минимальные значения коэффициента детерминации (R^2) в каком-либо отделе ЖКТ (камере), полученные при камерном моделировании транспорта ОРЧ в ЖКТ животных и значения среднего времени пребывания (MRT) частиц в их организме.

Таблица 3.1 – Биокинетические параметры камерной модели ЖКТ крыс и среднее время пребывания ОРЧ в организме животных

Вид животного	Биокинетические параметры модели, $ч^{-1}$			Коэффициент детерминации (R^2)			Среднее время пребывания ОРЧ в организме MRT, ч
	k_1	k_2	k_3	Желудок	Тонкий кишечник	Толстый кишечник	
Крысы	0,430	0,420	0,108	0,957	0,892	0,810	8,4

Для расчётов дозы использовалась excel-матрица *SAF* (*Specific Absorbed Fractions*) для источника – содержимого желудка и мишеней – внутренних органов

крысы (рис. 3.3) [15]:

Энергия, МэВ	0.01	0.015	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.5	1	1.5	2	4
Stomach Conte Brain	0.00E+00											
Stomach Conte Heart Wall	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.87E-07	2.47E-07	7.11E-07	4.72E-06	1.29E-04	4.11E-04	1.24E-03
Stomach Conte Stomach	1.06E+00	1.06E+00	1.06E+00	1.05E+00	1.04E+00	9.73E-01	8.05E-01	4.30E-01	2.36E-01	1.69E-01	1.33E-01	7.03E-02
Stomach Conte Small Intestine	3.38E-06	7.87E-06	1.15E-05	2.12E-05	5.37E-05	1.78E-04	5.14E-04	1.45E-03	2.37E-03	2.60E-03	2.58E-03	2.03E-03
Stomach Conte LLI Wall	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.11E-08	1.31E-06	7.91E-05	1.51E-04	2.08E-04	3.06E-04
Stomach Conte Kidneys	5.60E-07	5.22E-07	7.16E-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	4.03E-03
Stomach Conte Liver	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 Lungs	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 Pancreas	1.27E-04	2.98E-04	4.60E-04	1.10E-03	2.51E-03	7.83E-03	2.28E-02	5.06E-02	4.29E-02	3.60E-02	3.32E-02	2.14E-02
Stomach Conte Total Body	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

Рис. 3.3 Матрица SAF для желудка (содержимое) и внутренних органов: мозг – строка 1, расчёт не проводился; строка 2 – стенки сердца; 3 – стенки желудка; 4 – тонкий кишечник; 5 – толстый кишечник; 6 – почки; 7 – печень; 8 – лёгкие; 9 – поджелудочная железа; 10 – всё тело.

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

В среде MathCad вычисляем сплайны M_i по аргументу $E_{k,i}$ – энергия, для которой представлены SAF, и собственно функция $SAF_{k,i,j}$ (здесь k – индекс точек 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:

$$D_{j,i} = \frac{1,602 \cdot 10^{-10}}{m_i} \cdot SM_{j,i} \cdot \int_{t_0}^{t_{max}} A_j(t) \quad (3.4)$$

$$SM_{j,i} = \int_{0.001}^{E^{UP}} ES_j(E) \cdot M_i(E) dE \quad (3.5)$$

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 – спад активности « j »-го радионуклида в источнике; рассчитывается с помощью данных по спаду полной активности (рис. 3.1) и изменения доли каждого

радионуклида в источнике;

S_j – сплайн-функция спектра « j »-го радионуклида;

m_i – масса органа.

Произведение ES «делает» из спектра переносимую энергию, доля которой в соответствии с матрицей SAF остаётся в органе.

Коэффициент $1,602 \cdot 10^{-10}$ переводит ($MэВ/г$) 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 переноса (*transfer*) (рис. 3.1) и применялся наряду с экспериментальными данными. Данные по дозам ниже приводятся для расчётного спада активности: экспериментальный спад содержит артефакты (немонотонен по времени). В таблице 3.2 представлены полученные значения поглощённой дозы в органах крысы массой 200 г для обеих моделей источника.

Таблица 3.2 – Поглощённая доза в органах модели крысы Вистар с источником в желудке

Наименование органа, ткани	Масса, г	Поглощённая доза, Гр	
		Рениевая модель	Трёхкомпонентная 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	$0,62 \cdot 10^{-2}$	$0,92 \cdot 10^{-2}$
Толстый кишечник	7,86	$3,03 \cdot 10^{-4}$	$5,83 \cdot 10^{-4}$
Почки	2,06	0,04	0,06
Печень	7,55	0,05	0,07
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	$0,51 \cdot 10^{-2}$	$0,77 \cdot 10^{-2}$
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	$6,21 \cdot 10^{-4}$	$8,13 \cdot 10^{-4}$

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.

Глава IV Самооблучение щитовидной железы крупного рогатого скота

Моделирование переноса (*transfer*) радиоактивного йода. Для расчёта активности ^{131}I в органах и тканях животных применялась камерная модель – общепринятый методологический подход для оценки закономерностей переноса (*transfer*) радионуклидов у животных [16]. На рисунке 4.1 представлена принятая камерная модель переноса ^{131}I для коров (в данном расчёте для телят камера «вымя» была исключена).

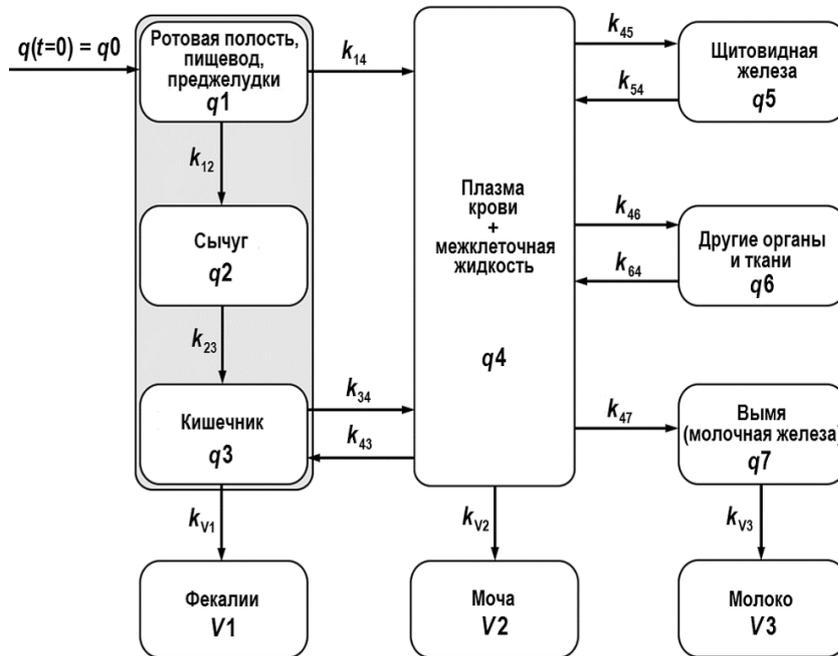


Рис. 4.1 – Камерная модель переноса (*transfer*) ^{131}I в организме коров [17]

В общем виде динамика йодной активности, полученной перорально, в произвольной камере q_i ($i = 1, \dots, n$) в предположении одинаковой химической формы ^{131}I во всех камерах в течение всего времени наблюдения формулируется следующим образом:

$$\frac{dq_i}{dt} = -\lambda q_i + \sum_j K_{ji} q_j - \sum_i K_{ji} q_i + f(t) \cdot \theta_i \quad (4.1)$$

где,

q_i – активность ^{131}I в i -й камере, МБк;

λ – постоянная радиоактивного распада ^{131}I , сут $^{-1}$;

k_{ij} (k_{ji}) – константы скорости переноса (транспорт для излучения) ^{131}I для камерной модели, сут $^{-1}$;

$f(t)$ – нормирующая функция поступления ^{131}I из внешней среды в барьерный орган (желудочно-кишечный тракт);

$$\theta_i = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ 0, & i > 1 \end{cases}$$

При однократном пероральном потреблении корма, содержащего ^{131}I , его поступление в барьерный орган устанавливается начальным условием:

$$q_1(t=0) = q_0 \quad (4.2)$$

Результаты и их обсуждение. В таблице 4.2 представлены константы скорости транспорта для камерной модели переноса (*transfer*) ^{131}I в организме коров (см. рис. 3.2), полученные с использованием экспериментальных данных [8].

Таблица 4.2 – Биокинетические параметры транспорта ^{131}I в организме коров, сут^{-1}

k_{12}	k_{14}	k_{23}	k_{34}	k_{43}	k_{45}	k_{54}
1	0,5	24	4	0,1	0,9	0,4
k_{46}	k_{64}	k_{47}	k_{v1}	k_{v2}	k_{v3}	–
1	0,1	0,5	2,5	1,5	2	–

Биокинетические параметры позволили описывать динамику изменения активности ^{131}I в ЩЖ (рис. 4.2).

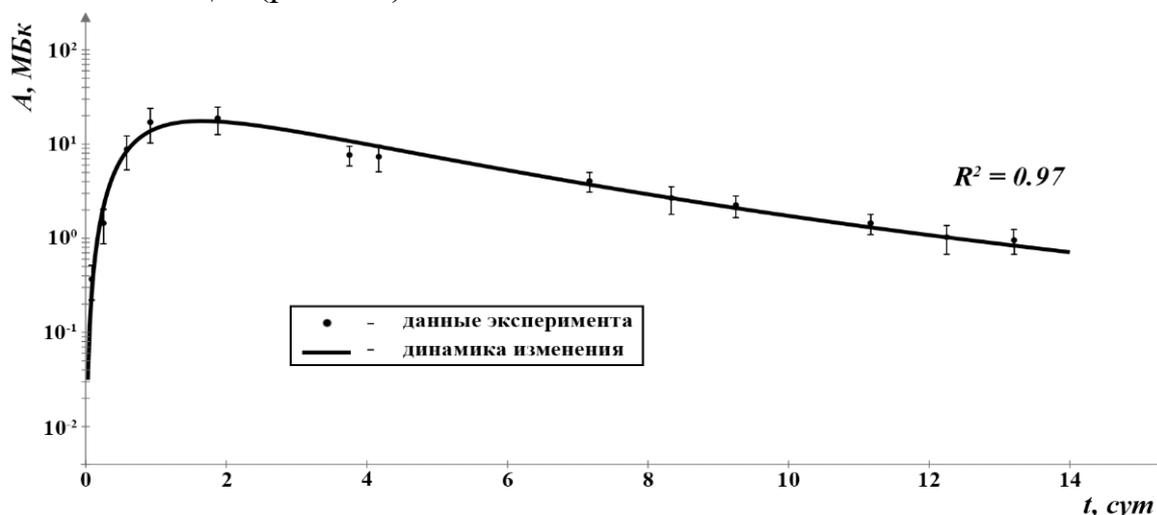


Рис. 4.2 – Динамика активности ^{131}I в ЩЖ коров после однократного поступления радионуклида с кормом

Согласно графику фактор времени оказывает большое влияние на динамику активности, и коэффициент детерминации нам на это указывает (0,97), со временем активность уменьшается, что и нужно собственно. Полученная динамика изменения активности ^{131}I в ЩЖ коров после однократного поступления радионуклида (185 МБк) с кормом была использована для расчёта накопления поглощённой дозы в ЩЖ.

ЩЖ КРС моделировалась двумерным осесимметричным телом, состоящим из девяти сегментов («вокселей»), которые получают осевыми и радиальными сечениями цилиндров. Эти сегменты симметрично расположены на трахее и имеют разный наружный диаметр и высоту. Симметричные сегменты соединяются попарно,

образуя четыре излучающих тела. Пятый элемент предметной области имитирует перешеек. Расчёт транспорта излучений в ЩЖ выполнялся последовательно для всех четырёх из пяти излучающих тел, результат получался суммированием вклада от пяти источников с учетом массы излучателя.

На рисунке 4.3 представлены участки ЩЖ, которые покрывают трахею и состоят из цилиндрических слоев, моделирующих форму тела ЩЖ для коровы и теленка. Размеры цилиндрических слоёв ЩЖ КРС представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Размеры цилиндрических слоёв «реалистичной» модели ЩЖ КРС (радиус ЩЖ для коровы $R=2,4$ см, для телят $R=1,4$ см)

№	Размеры ЩЖ			
	Внешний радиус, см		Высота, см	
	Коровы	Телята	Коровы	Телята
1	3,15	2,15	1,50	1,50
2	3,40	2,30	2,00	2,00
3	3,55	2,40	2,20	2,20
4	3,20	2,15	1,50	1,50
5	2,70	1,65	1,00	0,50

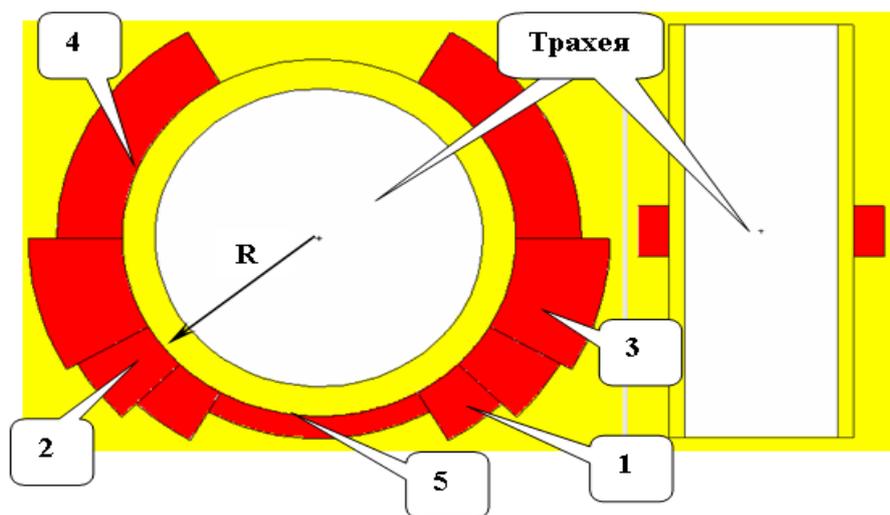


Рисунок 4.3 – Радиальное (слева) и осевое сечение расчётной модели ЩЖ (получено визуализацией входного файла программы MCNP5)

Для расчёта полной дозы в ЩЖ задачи с β - и γ -источником в каждом из пяти тел (рис. 4.3) решались последовательно. На основании аддитивности функционалов поля излучения дозы, полученные от двух типов источников, суммировались с учётом массы/объёма сегментов. Два компонента, нормированных на 1 Бк источника: 1) мощность дозы от источника β -излучения и 2) мощность дозы от источника γ -излучения были суммированы для того, чтобы вычислить полную мощность дозы,

которая должна быть умножена на текущую активность ^{131}I в ЩЖ.

В результате была получена зависимость суммарной мощности дозы от времени. Интеграл этой зависимости по временному интервалу от начала эксперимента позволил рассчитать накопленную к конкретному моменту дозу в ЩЖ. Прецизионные расчёты проведены для:

1) переноса β -излучения ^{131}I в ЩЖ, сопровождающегося вторичным излучением и его дальнейшим переносом с учётом всех процессов, включая генерацию и перенос тормозного излучения, Оже-электронов и др.

2) переноса собственного γ -излучения ^{131}I с учетом генерации и переноса рентгеновского и флуоресцентного излучения и т.д. Диссипация энергии контролировалась до 1 кэВ, расчёты продолжались до достижения интегральной (по энергии) дисперсии дозы $< 0,1 \%$.

Особое внимание уделялось оценке критических значений поглощённых доз, вызывающих необратимую дисфункцию ЩЖ КРС, наблюдаемую в экспериментальных исследованиях [13; 21; 22].

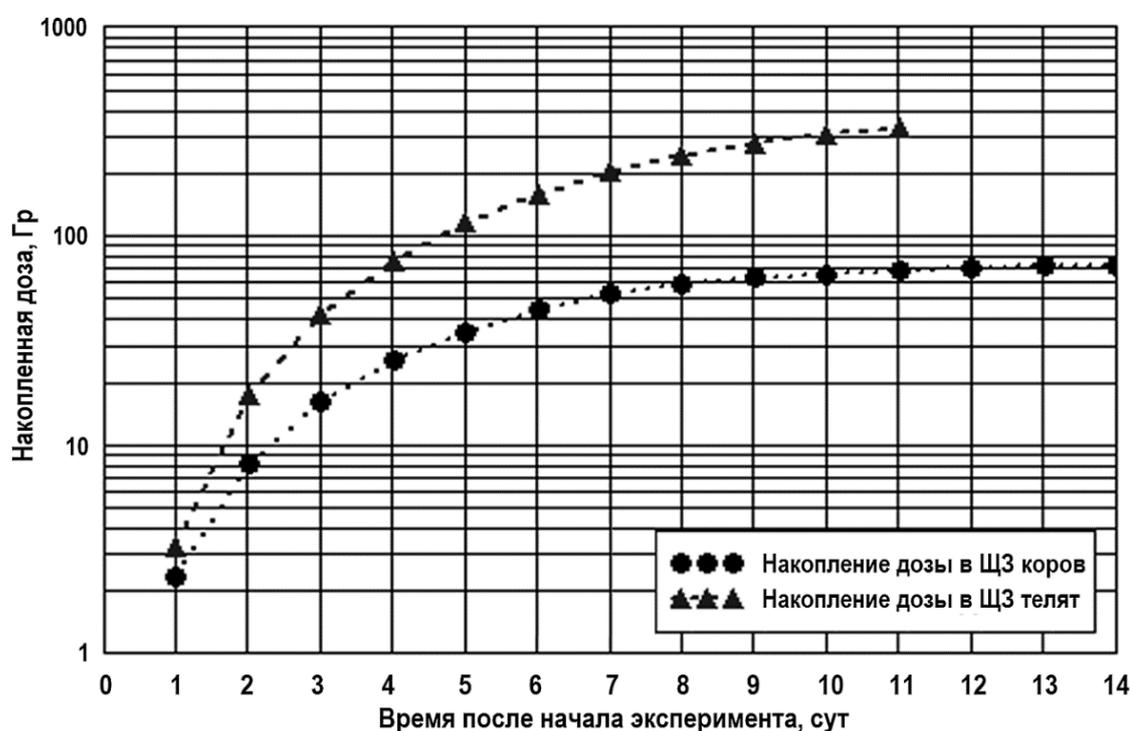


Рис. 4.4 – Рассчитанное для эксперимента [8] накопление дозы в ЩЖ коров после однократного приема радионуклида $A=185$ МБк (через 14 дней накопленная доза ~ 71 Гр) и накопление дозы в ЩЖ телят для эксперимента [7] (через 11 дней накопленная доза ~ 330 Гр)

Расчётным путём показано, что в этих условиях вклад собственного γ -излучения ^{131}I (со всеми вторичными излучениями) в общую поглощённую дозу составляет $\sim 20 - 25 \%$. Основным практическим результатом расчётов является «коэффициент конверсии» активности ^{131}I (равномерно распределённой в ЩЖ) в

среднюю мощность полной дозы в ЩЖ (для этих условий облучения): $\sim 4,05 \cdot 10^{-12}$ Гр/с на 1 Бк для телят и $\sim 2,34 \cdot 10^{-12}$ Гр/с на 1 Бк для коров.

Накопленная в ЩЖ доза у телят, после которой наблюдалась деструкция ЩЖ, определялась с использованием изменения активности ^{131}I в ЩЖ. Решение системы дифференциальных уравнений, описывающих перенос (*transfer*) йода согласно принятой камерной модели (рис. 4.1), позволило получить изменение активности ^{131}I в ЩЖ после 6-ти ежедневных одноразовых поступлений ^{131}I в ЖКТ телят. В результате была рассчитана динамика накопления поглощённой дозы в ЩЖ телят (рис. 4.4). Величина поглощённой дозы, накопленной в ЩЖ за период времени, после которого наблюдалось разрушение паренхиматозной ткани, составила 330 Гр.

Авторы экспериментальной работы [7] оценили дозу разрушения ЩЖ на 11 день эксперимента в 850 Гр (напомним, наш расчёт для этого эксперимента в настоящей работе даёт 330 Гр). По-видимому, оценка [7] является завышенной, равно как и «незначительная гиперплазия фолликулов» при 700 Гр [8] маловероятна. В качестве основания данного утверждения напомним, что «выжигание», т. е. разрушение структуры остатков удалённой ЩЖ радиойодом при терапии рака ЩЖ происходит при подведении ~ 300 Гр: «Абляция остаточной тиреоидной ткани у человека достигается при поглощённой дозе около 300 Гр» ([20], с. 44). Ту же величину 300 Гр находим в зарубежных источниках [21].

Таким образом, нижней границе дозы, вызывающей очень быстрое (в течение суток) разрушение паренхиматозной ткани ЩЖ телят, соответствует полученное в настоящей работе значение поглощённой дозы ~ 330 Гр.

В заключении подведены итоги проделанной работы. Приведены основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Разработана камерная модель транспорта радиоактивных частиц в пищеварительном тракте крыс и получены биокинетические параметры, которые указывают на удовлетворительное согласие расчётных и экспериментальных данных, о чём свидетельствуют полученные коэффициенты детерминации (R^2) и параметры критерия несовпадения Тейла (U).

2. При пероральном поступлении «трехкомпонентных» и «рениевых» модельных частиц с одинаковыми активностями, полученные поглощённые дозы удовлетворительно согласуются между собой.

3. Установлено значение минимальной дозы, при которой возникает необратимое разрушение паренхиматозной ткани ЩЖ КРС (330 Гр). В литературе фигурирует значение от сотен Гр до 2800 Гр. Полученное нами значение согласуется с общепринятой отечественной и зарубежной практикой постоперационного «выжигания» остатков ЩЖ у человека. Оцененное и/или измеренное значение дозы в ЩЖ при радиационной аварии и последующий прецизионный расчёт дают основания для принятия практических решений (утилизация КРС, ограничение

использования молока, перевод на «чистые» корма и т.д.).

4. Показано, что доза в ЩЖ КРС, обусловленная I^{131} , формируется не только β -излучением изотопа, но и сопутствующим γ -излучением (вклад 20-25% для взрослых КРС), пренебрежение этим вкладом приводит к увеличению погрешности.

5. Основным результатом расчётов также является «корреляционный» коэффициент преобразования активности радиойода (^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I), равномерно распределенной в ЩЖ в среднюю мощность полной дозы в ЩЖ (для заданных условий облучения): $\sim 4,05 \cdot 10^{-12}$ Гр/с на 1 Бк (для телят) и $\sim 2,34 \cdot 10^{-12}$ Гр/с на 1 Бк (для коров). «Корреляционные» коэффициенты преобразования «активность→доза» позволяют, в частности, выполнить экспресс-сортировку облученных животных и уточнить полную дозу на ЩЖ на длительном промежутке времени после облучения.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science и РИНЦ:

1. Денисова, Э.Н. Численное моделирование в дозиметрических задачах ядерной медицины и радиобиологии / Э.Н. Денисова, А.С. Снегирев, Ю.А. Кураченко, Г.В. Козьмин, В.А. Бударков, Н.И. Санжарова, Е.С. Матусевич // Известия вузов. Ядерная Энергетика. – 2018. – №4. – С. 138-151. (E.N. Denisova, A.S. Snegirev, Yu.A. Kurachenko, G.V. Kozmin, V.A. Budarkov, N.I. Sanzharova, E.S. Matusевич // Numerical simulation in dosimetry problems of nuclear medicine and radiobiology // Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika. – 2018. – no. 4. – pp. 138-151) (Импакт-фактор: SJR=0,372. Scopus, WoS; 1,6 п.л. / 90 %).

2. Kurachenko, Yu.A. Cattle's Thyroid Dose Estimation with Compartmental Model of Iodine Metabolism and Monte Carlo Transport Technique / Yu. A. Kurachenko, N.I. Sanzharova, G. V. Kozmin, V. A. Budarkov, E. N. Denisova, A. S. Snegirev // Medical radiology and radiation safety. – 2018. – № 5. – P. 48-54 (Импакт-фактор: SJR=0,23. Scopus; 0,6 п.л. / 50 %).

3. Денисова, Э.Н. Внутреннее облучение моногастричных животных «горячими» радиоактивными частицами / Э.Н. Денисова, Ю.А. Кураченко // Медицинская физика. – 2021. – V. 90. – №2. – С. 66-72 (Импакт-фактор: РИНЦ=0,219; 0,8 п.л. / 90 %).

Свидетельство на программу для электронных вычислительных машин:

4. Денисова, Э.Н. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021614284. Программа для ЭВМ «Динамика дозы облучения желудочно-кишечного тракта крыс при пероральном поступлении радиоактивных

частиц». Заявка № 2021611349 / Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В., **Денисова Э.Н.** // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 марта 2021 г. (0,1 п.л. /50%)

5. **Денисова, Э.Н.** Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 202164285. Программа для ЭВМ «Динамика активности радиоактивных частиц в желудочно-кишечном тракте крыс при пероральном поступлении» / Переволоцкая Т.В., Переволоцкий А.Н., **Денисова Э.Н.** // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 марта 2021 г. (0,1 п.л. / 50%)

Прочие публикации:

6. **Denisova, E.N.** Model of the thyroid gland irradiation in the radiobiological experiment analysis / **E. N. Denisova**, A. S. Snegirev, V. A. Budarkov, Yu. A. Kurachenko, G. V. Kozmin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 487. – P. 012028 (0,8 п.л. / 90 %).

7. **Denisova, E.N.** Algorithm for Calculating Doses in the Internal Organs of a Realistic Rat Model / **E N Denisova**, Yu A Kurachenko // AIP Conference Proceedings – 2022. – V. 2466. – P. 090008 (0,8 п.л. / 90 %).

8. Shapovalov, S. Radioactive particles: biokinetic transfer parameters in GIT of monogastric animals / S. Shapovalov, G. Kozmin A. Zenkin, **E. Denisova**, Yu. Kurachenko, S. Fesenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1701. – P. 012025 (0,8 п.л. / 45 %).

9. Shapovalov, S. Damage to the digestive tract of monogastric animals by “hot” radioactive particles / S.G. Shapovalov, G.V. Kozmin, **E.N. Denisova**, Yu. A. Kurachenko S. Fesenko, V.A. Budarkov, A. Zenkin A. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1701. – P. 012026 (0,9 п.л. / 45 %).

10. Shapovalov, S. Radioactive Particles Transport and Absorbed Doses Distribution in the Rats’ Gastrointestinal Tract / S. Shapovalov, **E. Denisova**, A. Snegirev, I. Medzhidov, Yu. Kurachenko, A. Zenkin, V. Budarkov, G. Kozmin // AIP Conference Proceedings – 2020. – V. 2313 – P. 080028 (0,8 п.л. / 70 %).

11. **Денисова, Э.Н.** Алгоритм расчёта доз во внутренних органах воксельной модели крысы / **Э.Н. Денисова**, И.М. Меджидов, М.А. Басова, А.С. Снегирев // Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции – Обнинск: ВНИИРАЭ, 2021. – С. 254-258 (0,4 п.л. 90 %).

12. **Денисова, Э.Н.** Внутреннее облучение пищеварительного тракта грызунов «горячими» радиоактивными частицами при ядерных авариях / **Э.Н. Денисова**, Ю.А. Кураченко, Г.В. Козьмин // Медицинская физика (ТКМФ-7). Сборник тезисов VII Троицкой конференции с международным участием. Москва, 2020. – С. 126-127 (0,1 п.л. 90 %).

13. **Denisova, E.N.** Precision modeling of thyroid lesions in radiation accidents / **E.N Denisova, A.S. Snegiryov, G.V. Kozmin, Yu.A. Kurachenko** // Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine. The 3rd International Symposium. Book of Abstracts. 2018. – P. 98-99 (0,1 п.л. / 80 %).

14. **Denisova, E.N.** Model of the thyroid gland irradiation in the radiobiological experiment analysis / **E.N. Denisova, A.S. Snegiryov, Yu. A. Kurachenko, G.V. Kozmin, V.A. Budarkov** // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2Nd International (15 th Regional) Scientific Conference on Technologic Systems and Environmental Risk 2018, TSER 2018. 2019. – P. 012028 (0,1 п.л. / 80 %).

15. **Денисова, Э.Н.** Анализ последствий облучения щитовидной железы крупного рогатого скота / **Э.Н. Денисова, А.С. Снегирев, С.Г. Шаповалов, Г.В. Козьмин** и др. // В сборнике: Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии. Сборник докладов международной молодежной конференции. Обнинск, 2019. – С. 312-315 (0,3 п.л. / 70 %).

16. **Denisova, E.N.** Internal irradiation of rat phantom with «hot» particles / **E.N. Denisova, A.S. Snegiryov, G.V. Kozmin** // Future of Nuclear Power – Atomfuture 2019. Тезисы докладов XV Международной научно-практической конференции. 2020. – P. 80-82 (0,2 п.л. / 90 %).

17. **Денисова, Э.Н.** Определение критической дозы при внутреннем облучении крупного рогатого скота / **Э.Н. Денисова, М.А. Басова, И.М. Меджидов, А.С. Снегирев** и др // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2019. Сборник статей Всероссийской школы-семинара, посвященной 110-летию Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского. Под редакцией А.В. Скрипаля. 2019. – С. 115-117 (0,3 п.л. / 80 %).

18. **Денисова, Э.Н.** Последствия облучения щитовидной железы крупного рогатого скота / **Э.Н. Денисова, Ю.А. Кураченко, В.А. Бударков, А.С. Снегирев** и др. // В сборнике: Актуальные вопросы сельскохозяйственной радиобиологии. Труды Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» (ФГБНУ ВНИИРАЭ). Под редакцией С.А. Гераськина. Обнинск, 2019. – С. 91-100 (0,1 п.л. / 80 %).

19. **Денисова, Э.Н.** Моделирование метаболизма ^{131}I у крупного рогатого скота при загрязнении пастбищных угодий продуктами ядерного деления в виде радиоактивных частиц / **Э.Н. Денисова, А.С. Снегирев, С.Г. Шаповалов, М.А. Басова, Г.В. Козьмин, Ю.А. Кураченко** // Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции – Обнинск: ВНИИРАЭ, 2021. – С. 309-312 (0,3 п.л. / 90 %).

20. **Denisova, E.N.** Assessment of irradiation doses to the gastrointestinal tract of rats from «hot» particles / **E.N. Denisova, G.V. Kozmin, Yu.A. Kurachenko** // Техногенные системы и экологический риск. Тезисы докладов III Международной (XVI Региональной) научной конференции. Обнинск, 2020. – Р. 281 (0,1 п.л. / 90 %).

21. **Денисова, Э.Н.** Внутреннее облучение желудочно-кишечного тракта крыс радиоактивными частицами / **Э.Н. Денисова, В.А. Бударков, А.С. Снегирев, Ю.А. Кураченко** // Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве. (к 50-летию со дня образования ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии): сборник докладов международной научно-практической конференции. Обнинск, 2020. – С. 57-60 (0,3 п.л. / 90 %).

Список цитированной литературы:

1. Smith, J.T. The influence of hot particle contamination on ^{90}Sr and ^{137}Cs transfers to milk and on time-integrated ingestion doses / J.T. Smith // J. Environ. Radioactivity. – 2009.

2. Бударков, В.А. Особенности биологического действия искусственных радиоактивных частиц / В.А. Бударков, А.С. Зенкин, Г.В. Козьмин // В сб. мат. межд. конф. «Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы». – Обнинск, 2018. – С. 61-64.

3. Бударков, В.А. Ветеринарная радиобиология / Бударков В.А. // Под общ. ред. В.А. Бударкова. Псков: ВНИИВВиМ – 1983.

4. Пантелеев, Л.И. Теоретические и экспериментальные разработки дозиметрических моделей сельскохозяйственных объектов при радиоактивном загрязнении территорий / Л.И. Пантелеев, Б.Н. Анненков, И.А. Сарапульцев, Г.В. Козьмин // Обнинск: ВНИИРАЭ, 1981. – Том.2. – с. 180.

5. Козьмин, Г.В. Транспорт радиоактивных частиц в желудочно-кишечном тракте овец / Г.В. Козьмин, В.Г. Епимахов, А.С. Снегирев, Н.И. Санжарова, В.А. Бударков // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2018. – Т. 58. № 3. – с. 305–316.

6. Целищев, С.П. Искусственные радиоактивные частицы для изучения радиационного поражения животных на следе наземного ядерного взрыва в модельных экспериментах / С.П. Целищев // В сб. Проблемы животноводства в зоне следа наземного ядерного взрыва / Под ред Б.Н. Анненкова. М.: ВНИИСХР. – 1978. – с. 29-49.

7. Спирин, Е.В. Формирование дозы облучения щитовидной железы телят при поступлении ^{131}I с кормом / Е.В. Спирин, Н.М. Лазарев, И.А. Сарапульцев // Докл. РАСХН, 2004. – №4. – с. 54–55.

8. Сироткин, А.Н. Сравнительное поведение ^{131}I у коров при различных источниках поступления его в организм / А.Н. Сироткин, И.Я. Панченко, Л.Н.

Тюменев, Л.И. Пантелеев и др. // В сб. Биологическое действие внешних и внутренних источников радиации. – М: Медицина, 1972. – с. 72–77.

9. Koning, A.J. Modern Nuclear Data Evaluation With The TALYS Code System / A.J. Koning, D. Rochman // Nuclear Data Sheets. – V. 113. – 2012. – P. 2841

10. Suuroja, T. Age-related morphological changes of thyroid gland in calves / T. Suuroja, T. Järveots, E. Lepp // Veterinaria ir zootechnika, 2003 – Vol.23 (45) – p. 55–59.

11. Peksa, Z. Morphological and histometric parameters of the thyroid gland in slaughter cattle / Z. Peksa, J. Trávníček, H. Dušová et al. // J Agrobiology, 2011 – №28(1). – p. 79–84.

12. ICRP Publication 89. 2002 Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. Published by Elsevier Science Ltd. Ann. ICRP 32. 2003 – p. 277.

13. Authors: 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. – p. 484.

14. Алексахин, Р.М. Сельскохозяйственная радиоэкология / Р.М. Алексахин // Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. – М.:Экология, 1992. – с. 400.

15. Денисова, Э.Н. Внутреннее облучение моногастричных животных «горячими» радиоактивными частицами / Э.Н. Денисова, Ю.А. Кураченко // Медицинская физика. – 2021. – V. 90. – №2. – С. 66-72

16. France, J. Mathematical Modelling in Animal Nutrition. Centre for Nutrition Modelling University of Guelph, Canada. / J. France, E. Kebreab // Wallingford: Biddles Ltd, King's Lynn, 2008 – p. 588.

17. Kurachenko, Yu. A. Cattle's Thyroid Dose Estimation with Compartmental Model of Iodine Metabolism and Monte Carlo Transport Technique / Yu. A. Kurachenko, N.I. Sanzharova, G.V. Kozmin, V.A. Budarkov, E.N. Denisova, A.S. Snegirev // Medical radiology and radiation safety, 2018. – № 5. – p. 48-54.

18. Бударков, В.А. Влияние йода-131 на овец в зависимости от содержания стабильного йода в рационе / В.А. Бударков, А.С. Зенкин, Н.И. Архипов и др. // Радиобиология, 1992 – Т. 32. – №3. – с. 451 – 458.

19. Бударков, В.А. Влияние продуктов аварийного выброса Чернобыльской АЭС на щитовидную железу животных / В.А. Бударков, Н.Н. Архипов, А.С. Зенкин и др. // Ветеринария, 1990 – №7. – с. 60–63

20. Гарбузов, П.И. Радиойодтерапия рака щитовидной железы / П.И. Гарбузов, Б.Я. Дроздовский, А.А. Родичев и др. // Практическая онкология, 2007. – Т. 8. – № 1.

21. A Toxicological Profile for Iodine. Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology. USA. Atlanta, Georgia. 2004.

ДЕНИСОВА Эльвира Николаевна
ТРАНСПОРТ РАДИОАКТИВНЫХ ЧАСТИЦ В
ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОМ ТРАКТЕ ЖИВОТНЫХ И ДОЗОВЫЕ
НАГРУЗКИ НА ВНУТРЕННИЕ ОРГАНЫ
Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук.
Типография «_____»