

## 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\*\*\*

\* ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии  
249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км

\*\* ФГБНУ Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии  
601125, Владимирская обл., пос. Вольгинский, ул. Академика Бакулова, стр. 1

\*\*\* Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ  
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1



Современные транспортные коды, позволяющие решать задачи переноса излучений, обычно обладают возможностью задания периодических структур, например, ячеек реактора. Эта возможность открывает путь к прецизионному (воксельному) моделированию предметной области в задачах ядерной медицины и радиобиологии. Рассмотрена задача расчета поглощенной дозы в щитовидной железе крупного рогатого скота при радиационных авариях. Цель исследования – определение согласованных значений критической дозы  $^{131}\text{I}$  в щитовидной железе животных, приводящей к серьезной дисфункции железы и ее последующему разрушению. Для этого выполнены комплексные исследования по уточнению параметров камерной модели, опирающиеся на достоверные экспериментальные и теоретические данные. При моделировании щитовидной железы и ее окружения использованы современные технологии. Для решения уравнения переноса излучений  $^{131}\text{I}$  применена программа метода Монте-Карло, учитывающая при расчете дозы вклад как  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучений источника, так и всей цепочки вторичных излучений вплоть до полной диссипации энергии. Главный теоретический результат – полученный коэффициент конверсии активности  $^{131}\text{I}$ , распределенной равномерно по объему щитовидной железы, в среднюю мощность дозы в железе. Коэффициент рассчитан для животных при выбранной конфигурации предметной области и морфологии щитовидной железы. Основной практический результат – оценка нижней границы поглощенной дозы в щитовидной железе, разрушающей ее в короткие сроки при внутреннем облучении  $^{131}\text{I}$ .

**Ключевые слова:** моделирование предметной области, моделирование транспорта излучений, вокселизация предметной области, базы данных, on-line-вычисления, радиационная авария, сельскохозяйственные животные, радиоактивный йод, щитовидная железа, камерная модель, поглощенная доза.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

В отличие от «традиционных» задач переноса излучений (ядерно-технические установки, защита от излучений, атмосферная оптика и т. п.) для задач переноса в биологи-

© Э.Н. Денисова, А.С. Снегирев, Ю.А. Кураченко, Г.В. Козьмин, В.А. Бударков,  
Н.И. Санжарова, Е.С. Матусевич, 2018

ческих системах характерны относительно небольшие оптические размеры предметной области – это не десятки и сотни длин свободного пробега, как в случае защиты ядерно-технических установок, а всего лишь 5 – 10. Для небольших оптических размеров весьма эффективными оказались прецизионные транспортные методики, прежде всего метод Монте-Карло. Его реализации (например, код MCNP5 [1]) обычно имеют развитые средства конструирования и визуализации предметной области. В настоящее время коды на основе метода Монте-Карло находятся вне конкуренции в задачах переноса излучений в биологических системах.

Такому положению весьма способствовало прежде всего наличие в развитых кодах возможности «автоматической» генерации регулярных структур, например, наборов однотипных ячеек (тел), имеющих одинаковые габариты, но различный материальный состав. Эти ячейки получили наименование «воксел» по аналогии с «пиксел» (англ. pixel – picture cell element). Пиксел представляет собой неделимый 2D-объект прямоугольной, обычно квадратной или круглой формы. Воксел – 3D-объект (voxel – volume cell element), в просторечии «воксель», обычно прямоугольный параллелепипед. Для воксельного моделирования вся предметная область или ее часть покрывается прямоугольной (обычно квадратной  $x, y$ ) сеткой, а высота вокселя  $z$  может быть произвольной (рис. 1). Эта высота, например, в задачах лучевой терапии параллельна вертикальной оси. В целом размеры вокселей соответствуют разрешению конкретного средства визуализации ( $\sim 0.1$  см).

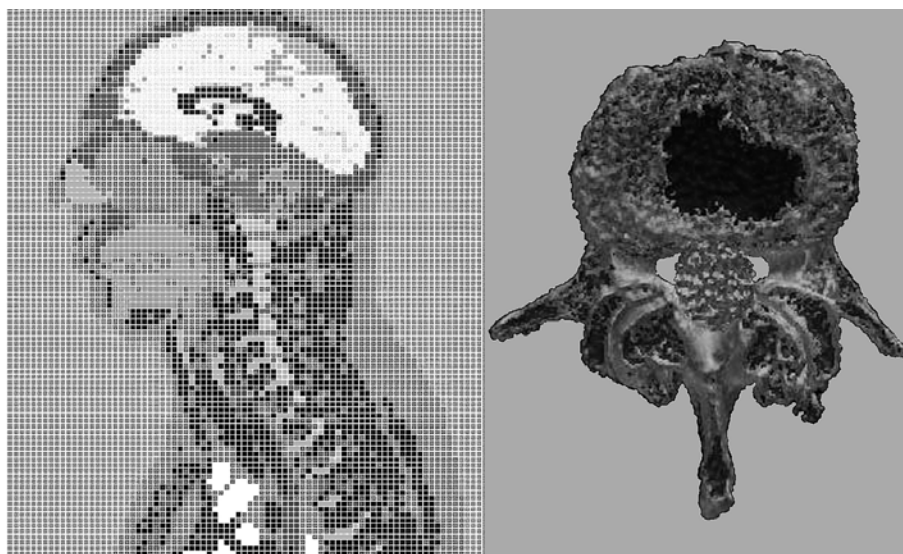


Рис. 1. Сагиттальное сечение головы антропоморфного воксельного фантома ([2], слева) и меридианальное сечение фантома позвонка с заполненной костным цементом метастатической полостью [3]. Получено визуализацией входных файлов программы MCNP5

Воксел как элемент предметной области должен быть заполнен соответствующим материалом (конкретной биотканью, воздухом и т.п.). Для этого могут использоваться любые средства послойной визуализации (КТ, МРТ, УЗИ и др.). Соответствующие файлы, генерируемые программным обеспечением этих средств, содержат трехмерные массивы чисел с номерами материалов заполнения, восстановленными из послойных (по оси  $z$ ) томограмм. Шаг по оси  $z$  при послойной визуализации определяет разрешение томограммы. Рентгеновский томограф получает числовое «изображение» в оттенках серого, для улучшения восприятия это изображение с помощью служебных программ окрашивается в «натуральные» цвета с варьируемой яркостью. Чтобы передать эту информацию во входной файл программы, например, MCNP5,

необходимо прочесть и дешифровать выходной файл средства визуализации [4].

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ИЗЛУЧЕНИЙ

Прецизионное моделирование транспорта излучений предполагает решение уравнения переноса (кинетического уравнения Больцмана) в «явном» или «неявном» виде (рис. 2). Стационарное кинетическое уравнение для плотности потока нейтронов (фотонов)  $\phi$  в дивергентной форме и групповом энергетическом приближении выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \Omega \cdot \nabla \phi^j(\mathbf{r}, \Omega) + \Sigma^j(\mathbf{r}, \Omega) \cdot \phi^j(\mathbf{r}, \Omega) = \\ = \sum_{i=1}^j \int \Sigma_s^{i \rightarrow j}(\mathbf{r}, \Omega' \rightarrow \Omega) \cdot \phi^i(\mathbf{r}, \Omega') d\Omega' + q(\mathbf{r}, \Omega), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $j, i$  – индексы интервалов группового разбиения по энергии; слагаемые уравнения обеспечивают баланс частиц в единичной ячейке фазового пространства (слева направо: утечка, плотность столкновений (увод), интеграл рассеяний, независимый источник). «Явный» подход к решению уравнения состоит в а) покрытии предметной области расчетной сеткой и на этой сетке б) замене производных уравнения (1) на конечные разности, а интегралов на конечные суммы; в) переходе от интегро-дифференциальных групповых уравнений к системам сеточных алгебраических уравнений, которые решаются специальными методами [5]. Назовем для краткости этот подход КР – «конечные разности» (см. рис. 2).

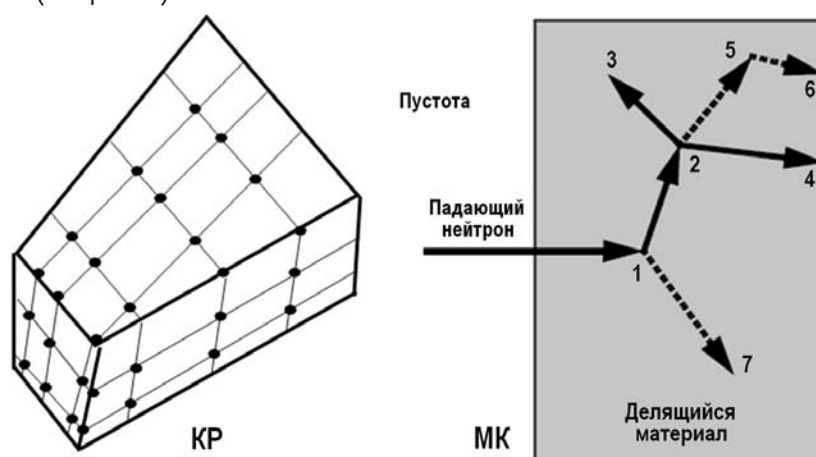


Рис. 2. Пояснение двух подходов к решению уравнения переноса: предметная область с расчетной сеткой (КР, слева); условная схема «жизни» нейтрона в делящемся материале (МК): 1 – рассеяние нейтрона, рождение фотона; 2 – деление, рождение фотона; 3 – захват нейтрона; 4 – утечка нейтрона; 5 – рассеяние фотона; 6 – утечка фотона; 7 – захват фотона

«Неявный» подход состоит в прямом моделировании поведения частицы в среде (ее «жизни»). Суть подхода поясним на примере стохастического метода Монте-Карло (см. рис. 2). Частица «рождается» в предметной области со случайно выбранными характеристиками (координатой  $\mathbf{r}$ , энергией  $E_j$  и направлением движения  $\Omega$ ) и движется в пространстве, изменяя характеристики «случайным» образом, но с соблюдением закономерностей (законов сохранения, согласованности характеристик и т.п.). Для обеспечения «случайного» выбора применяется генератор псевдослучайных чисел. «Жизнь» частицы обязательно должна закончиться или ее исчезновением (поглощением либо выходом из исследуемого объема), или ее попаданием в детектор. В последнем случае она регистрируется и вносит вклад в какой-либо функционал (например, дозу). Затем происходит рождение и жизненный путь следующей частицы и т.д. Это грубая схема метода Монте-Карло для решения уравнения переноса «неявным» образом, реализованно-

го, в частности, в коде MCNP5. Далее будем обозначать этот метод и соответствующий код МК («Монте-Карло»).

Программы семейства MCNP позволяют моделировать транспорт любых излучений в предельно широком энергетическом диапазоне начиная с  $E = 0$ . Но поскольку речь идет о прецизионном моделировании для конкретных приложений, диапазон сужается наличием прецизионных же библиотек ядерных данных ( $\sim 1$  кэВ – 250 МэВ). Вне этого диапазона расчет возможен, но выполняется не с использованием «точных» таблиц из библиотек, а с помощью простых аналитических моделей. Нижнее значение диапазона определяется задачами дозиметрии, верхнее – задачами, например, адронной терапии [6]. В этом диапазоне энергии существующие библиотеки данных обеспечивают исчерпывающее описание транспорта излучений с генерацией и транспортом вторичного излучения вплоть до полной диссипации энергии.

В моделировании транспорта излучений в выбранных приложениях может быть достигнута полнота использования наших знаний аналогично моделированию предметной области. Исключениями для выбранных приложений являются

- задачи глубокого проникновения излучений, возникающие в проблеме адронной лучевой терапии [6];
- задачи транспорта в полубесконечной разреженной среде;
- технические проблемы в изготовлении прецизионного ПО для работы в интерактивном on-line-режиме.

#### Задачи глубокого проникновения

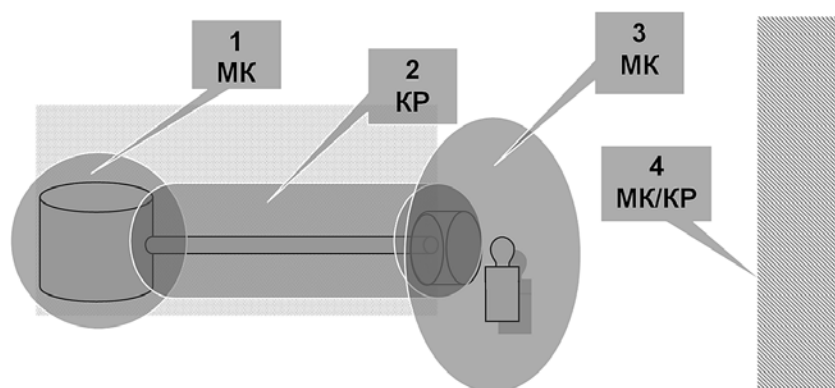


Рис. 3. Условная схема решения задачи вывода терапевтического реакторного пучка нейтронов

Типичная задача такого рода проиллюстрирована на рис. 3. Возможная расчетная технология такова: предметная область для задачи вывода пучка нейтронов в медицинский бокс разбита плоскостями на четыре подобласти, в каждой из них применяются свои методики и программный код. Это код или стохастического метода МК, или численного решения уравнения переноса излучений методом КР. На поверхностях раздела выполняется пересчет решения, полученного для «левой» подобласти, в источник – для «правой». Расчет идет от первичного источника – активной зоны реактора в подобласти 1. Для подобласти 2 (цилиндрический канал вывода пучка длиной до 5 м и его окружение) характерен направленный перенос, МК плохо работает, применяется КР для цилиндрической геометрии. Для подобласти 3 (выход пучка, облучаемый фантом, сложная геометрия) следует применять МК. Подобласть 4 (медицинский бокс, смежные помещения) может быть рассчитана как МК, так и КР.

#### Транспорт излучений в разреженной среде

Проблемы возникают при применении МК для решения дозиметрических задач в протяженных разреженных средах, загрязненных радионуклидами, например, в лесных

массивах или аграрных экосистемах. С необходимостью растительность в воздухе приходится гомогенизировать, в результате моделируется перенос в гомогенной пространственно «полубесконечной» среде. Утечка «в пустоту» – вверх и в почву – вниз моделируется адекватно, но при расчете транспорта в гомогенизированном слое растительности с плотностью всего в два – три раза большей плотности воздуха для малых энергий (и  $\beta$ -, и  $\gamma$ -излучений) наблюдается медленная и, что важнее, немонотонная сходимость результата. Традиционные подходы, основанные на полуэмпирических поправках лучевого анализа, дают результаты, иногда противоречащие результатам численных МК-методов. Это обстоятельство необходимо сделать предметом дальнейших исследований.

### **Программное обеспечение для работы в on-line-режиме**

Здесь для ПО может и должна быть поставлена амбициозная цель – посредством использования развитых баз данных, приготовленных заранее с помощью прецизионных МК- и КР-вычислительных технологий, создать проблемно-ориентированные алгоритмы и программы, позволяющие получать функционалы поля излучения (например, дозу) без времязатяжного численного решения уравнения переноса, но с точностью, приближающейся к результатам применения прецизионных МК- и КР-технологий. Вместо КР-решения систем сеточных уравнений высокого порядка ( $> 10^{10-14}$  и более) или стохастического моделирования транспорта (МК) в этих системах выполняется «мгновенная» интерполяция по базе данных. Положительный опыт уже получен для некоторых задач [4].

Описанный подход (равноточное моделирование предметной области и переноса излучений) был применен к широкому кругу задач радиационной и ядерной медицины. В их числе дозиметрическая поддержка лучевой терапии (дистанционной адронной и нейтронозахватной), брахитерапии простаты и печени, оптимизация сценариев облучения, пред- и постоперационное обеспечение процедур радионуклидной вертебропластики, адаптация реакторных каналов для задач нейтронной терапии, оптимизация источника фотонейтронов для нейтронозахватной терапии и производства радиоизотопов, расчетный анализ реакторных и защитных бенчмарк-экспериментов и др. ([2 – 4, 6]).

### **ЗАДАЧИ РАДИАЦИОННОЙ ЭКОЛОГИИ И РАДИОБИОЛОГИИ ЖИВОТНЫХ**

Наряду с целями радиационной безопасности человека современные нормативные документы предполагают экоцентрический подход к радиационной защите [7]. Стандарты качества окружающей среды в подавляющем большинстве радиологических ситуаций соблюдаются при обеспечении радиационной безопасности человека. В то же время биологические организмы, растения и животные при загрязнении окружающей среды радионуклидами чаще всего подвергаются воздействию больших доз (по сравнению с дозами населения), знание которых дает дополнительную информацию для оценки качества окружающей среды и принятия решений по сохранению природных экологических систем, генофонда растений и животных.

Из-за большого биологического разнообразия живых организмов невозможно оценить дозы для каждого типа биоты, поэтому принято оценивать дозы для ограниченного набора репрезентативных организмов – референтных видов. Эти виды рассматриваются как биологические объекты с определенными базовыми экологическими и биологическими характеристиками. Референтными представителями биоты по радиоактивному загрязнению сельскохозяйственных экологических систем могут быть и сельскохозяйственные животные. Основанием для отбора сельскохозяйственных животных в качестве референтных видов является наличие данных постоянного ветеринарного контроля показателей здоровья животных и особенностей изменения показателей вследствие радиационного облучения [8].



К настоящему времени изучены основные радиационные синдромы, проявление которых у животных можно ожидать при различных сценариях радиоактивного загрязнения. Изучены закономерности лучевой патологии щитовидной железы (ЩЗ) при поступлении радиоактивных изотопов йода, получены данные о состоянии здоровья животных в зонах влияния радиационных аварий. В то же время вычислительная база и современное программное обеспечение для количественного анализа динамики формирования радиобиологических эффектов недостаточно развиты.

В работе выполнена оценка критического радиационного воздействия, приводящего к радиационной деструкции ткани ЩЗ крупного рогатого скота (КРС), на основе камерной модели метаболизма  $^{131}\text{I}$ , прецизионной модели морфологии и состава ЩЗ и транспорта излучения в ней.

### Моделирование метаболизма радиоактивного йода и транспорта излучений

Исследование поступления  $^{131}\text{I}$  в органы и ткани животных проводилось с помощью камерного анализа – общепринятого методологического подхода для оценки закономерностей метаболизма радионуклидов у животных [9]. Принятая камерная модель метаболизма  $^{131}\text{I}$  для коров представлена на рис. 4.

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

$$\frac{dq_i}{dt} = -\lambda q_i + \sum_j k_{ji} q_j - \sum_j k_{ij} q_i + f(t) \cdot \theta_i, \quad (2)$$

где  $q_i$  – активность  $^{131}\text{I}$  в  $i$ -й камере, МБк;  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада  $^{131}\text{I}$ , сут $^{-1}$ ;  $k_{ij}$  ( $k_{ji}$ ) – константы скорости транспорта  $^{131}\text{I}$  для камерной модели, сут $^{-1}$ ;  $f(t)$  – нормирующая функция поступления  $^{131}\text{I}$  из внешней среды в барьерный орган (желудочно-кишечный тракт);  $\theta_i = 1$  при  $i=1$  либо  $\theta_i = 0$  при  $i > 1$ . При однократном пероральном потреблении корма, содержащего  $^{131}\text{I}$ , его поступление в барьерный орган устанавливают начальным условием  $q_1(t=0) = q_0$ .

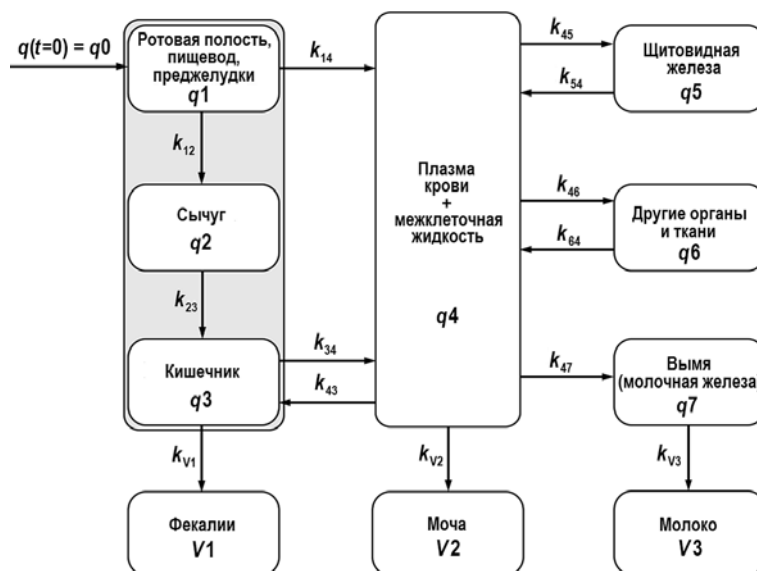


Рис. 4. Камерная модель метаболизма  $^{131}\text{I}$  в организме коров

Для оценки биокинетических параметров  $^{131}\text{I}$  были использованы результаты эксперимента [10], выбранного в качестве бенчмарка на основании полноты и точно-

сти описания условий исследования. Экспериментальные данные [10] получены на трех клинически здоровых коровах в возрасте четырех – пяти лет массой 380 – 520 кг и удоем 6.5 – 9.5 л в сутки. Рацион коров состоял из различных кормов (грубых, сочных и концентрированных) и по общей пищевой ценности и количеству перевариваемого белка соответствовал зоотехническим нормам. Каждая корова получила перорально 185 МБк активности  $^{131}\text{I}$ , смешанного с травой. Для этого 21 кг свежескошенной травы разделяли на три равные части, поверхность травы загрязняли водным раствором  $\text{Na}^{131}\text{I}$  ( $\text{pH} = 7.2$ ) с помощью разбрызгивателя, а затем скармливали животным в течение 30 – 40 минут. После приема  $^{131}\text{I}$  через 2 и 6 ч в первые сутки, и через 11 – 14 ч в последующие шесть суток, а затем через 24 – 25 ч в течение восьми суток одновременно у коров отбирали пробы крови, молока, мочи и кала для проведения радиометрического анализа. При этом активность  $^{131}\text{I}$  в ЩЗ определяли *in vivo*.

Для измерения активности образцов авторы экспериментального исследования [14] использовали одноканальный сцинтилляционный гамма-спектрометр с кристаллом  $\text{NaI(Tl)}$  размером  $80 \times 70 \text{ мм}^2$ . Погрешность этих измерений составила 10 – 15%. Прижизненную оценку содержания  $^{131}\text{I}$  в ЩЗ проводили сцинтилляционным детектором с кристаллом  $\text{NaI(Tl)}$  размером  $40 \times 40 \text{ мм}^2$ , погрешность измерений  $\pm 40\%$ .

Значения параметров метаболизма  $^{131}\text{I}$  у коров получены из корреляции расчетных данных с эмпирическими, соответствующими достижению максимума коэффициентов детерминации во всех камерах одновременно, при изменении параметров транспорта и, соответственно, динамики активности  $^{131}\text{I}$ . Значения биокинетических параметров, допускаемых камерной моделью, оценивались с использованием граничного значения коэффициента детерминации  $R^2$  – не менее 0.75 во всех камерах [11] после однократного приема  $^{131}\text{I}$  с кормом.

Камерная модель метаболизма йода была адаптирована для анализа экспериментальных данных [12], полученных на телятах. Эксперимент [12] был также выбран в качестве бенчмарка. Оценку диапазона для констант скорости  $k_{ij}$  у телят проводили с использованием параметров, полученных в эксперименте на дойных коровах [10] без камеры для вымени (рис. 4), а также с максимальными параметрами метаболизма, более свойственными молодому животному.

В эксперименте [12] телятам трехмесячного возраста с массой тела ~ 60 кг скармливали  $^{131}\text{I}$  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  $\gamma$ -излучения в области ЩЗ [12], возможно, за счет лучевой деструкции паренхиматозной ткани ЩЗ и выведения  $^{131}\text{I}$  в кровотоки. Не исключена также вероятность радиационно-химического разложения тироксина в ткани ЩЗ.

Расчет характеристик поля излучения  $^{131}\text{I}$  проводился с помощью кода MCNP5. Морфология ЩЗ, плотность ткани, масса и характерные размеры взяты из [13–15].

ЩЗ КРС моделировалась двумерным осесимметричным телом, состоящим из девяти сегментов, которые получают осевыми и радиальными сечениями цилиндров. Эти сегменты симметрично расположены на трахее и имеют разные наружный диаметр и высоту. Симметричные сегменты соединяются попарно, образуя четыре излучающих тела. Пятый источник имитирует перешеек.

На рисунке 5 представлены участки ЩЗ, которые покрывают трахею и состоят из цилиндрических слоев, моделирующих форму тела ЩЗ для коровы и теленка. Размеры ЩЗ коровы были взяты из [13]: для коровы с весом ~500 кг усредненные значения составляют  $20.0 \text{ см}^3$  и 20.6 г. Для телят трехмесячного возраста с массой тела 60 кг, фигурирующих в эксперименте [12], согласно [14], средний объем и масса ЩЗ

составляют  $11.6 \text{ см}^3$  и  $12.0 \text{ г}$  соответственно. Ткань ЩЗ плотностью  $1.03 \text{ г/см}^3$  кроме четырех основных элементов включает в себя Na, P, S, Cl, K и I [15] (табл. 1). Активность йода равномерно распределена по объему ЩЗ.

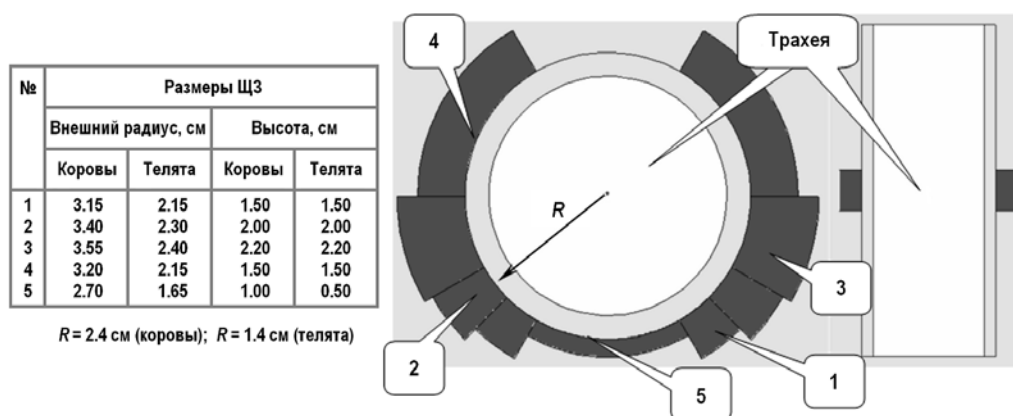


Рис. 5. Радиальное (слева) и осевое сечения расчетной модели ЩЗ (не в масштабе; получено визуализацией входного файла кода MCNP5). В таблице указаны размеры цилиндрических слоев ЩЗ

Элементный состав ЩЗ КРС (масс. %)

Таблица 1

H	C	N	O	Na	P	S	Cl	K	I	Итого
10.4	11.9	2.4	74.5	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	100

#### Биокинетические параметры $^{131}\text{I}$ и дозы облучения щитовидной железы

Таблица 2

Биокинетические параметры транспорта  $^{131}\text{I}$  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	—

Константы скорости транспорта для камерной модели метаболизма  $^{131}\text{I}$  в организме коров (см. рис. 4), полученные с использованием экспериментальных данных [10], представлены в табл. 2. Эти параметры позволили описать динамику изменения активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЗ и в молоке (рис. 6).

Высокие значения коэффициентов детерминации  $R^2$  позволяют сделать вывод об удовлетворительном согласии расчетных и экспериментальных [10] данных. Полученная динамика изменения активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЗ коров после однократного поступления радионуклида ( $185 \text{ МБк}$ ) с кормом (см. рис. 6) была использована для расчета накопления поглощенной дозы в ЩЗ (рис. 7).

Следует отметить, что динамика изменения активности  $^{131}\text{I}$  в основном дозообразующем пищевом продукте – молоке (см. рис. 6) может быть использована для оценки популяционных доз, связанных с облучением ЩЗ, например, с помощью математических моделей [16].

Особое внимание уделялось оценке критических значений поглощенных доз, вызывающих необратимую дисфункцию ЩЗ КРС, наблюдаемую в экспериментальных исследованиях [12, 17, 18].

Задача расчета дозы формулировалась следующим образом.



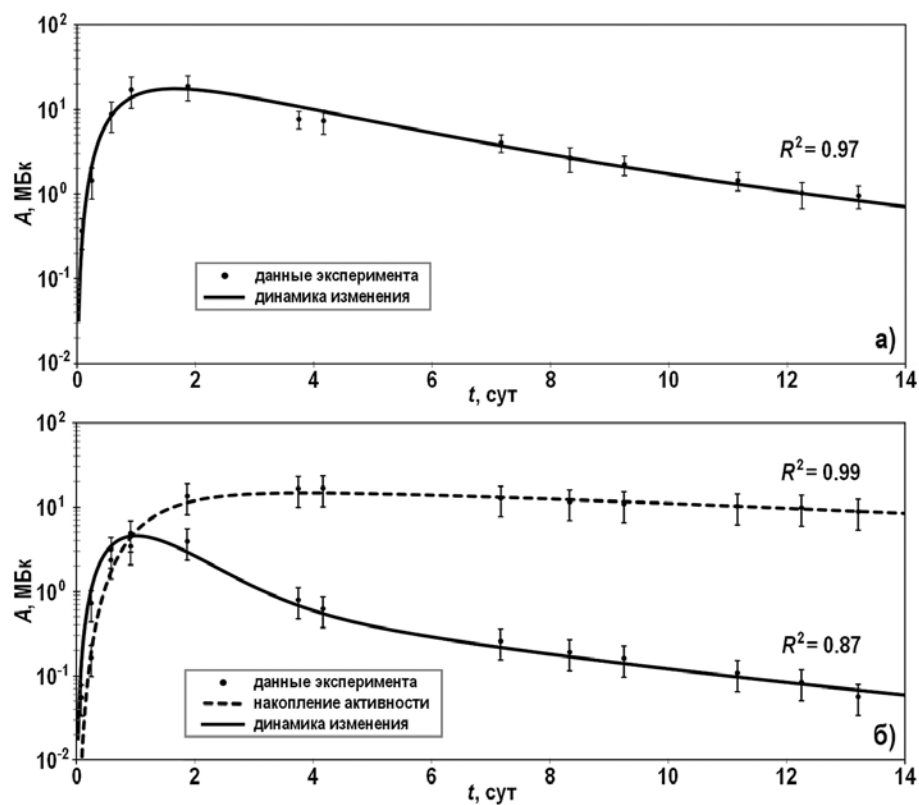


Рис. 6. Активность  $^{131}\text{I}$  после однократного приема йода: а) – в ЩЗ; б) – в молоке коров

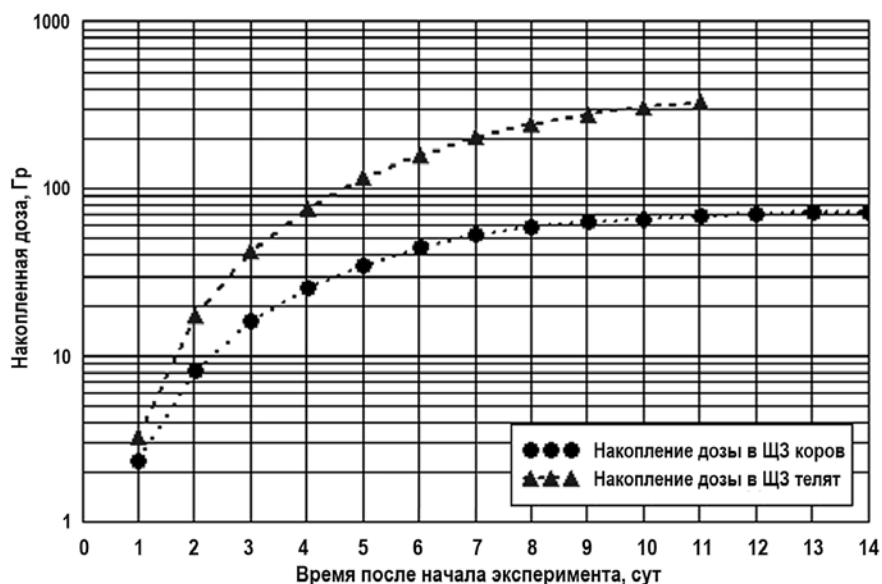


Рис. 7. Рассчитанное для эксперимента [10] накопление дозы в ЩЗ коров после однократного приема радионуклида  $A=185$  МБк (через 14 дней накопленная доза  $\sim 71$  Гр) и накопление дозы в ЩЗ телят для эксперимента [12] (через 11 дней накопленная доза  $\sim 330$  Гр)

1. С помощью кода MCNP5, предназначенного для расчета переноса излучения методом Монте-Карло, получить усредненную (по девяти сегментам) дозу в модельной ЩЗ с равномерным по объему распределением активности  $^{131}\text{I}$ .

2. Зависящая от времени активность  $^{131}\text{I}$  в ЩЗ определяется с использованием камерной модели.

Для расчета полной дозы в ЩЖ задачи с  $\beta$ - и  $\gamma$ -источником в каждом из пяти тел (см. рис. 5) решались последовательно. На основании аддитивности функционалов поля излучения дозы, полученные от двух типов источников, суммировались с учетом массы (объема) сегментов. Два компонента, нормированных на 1 Бк источника (мощность доз от источников  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения), были суммированы для того, чтобы вычислить полную мощность дозы, которая должна быть умножена на текущую активность  $^{131}\text{I}$  в ЩЗ. 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 ЩЗ.

Прецизионные расчеты проведены для переноса  $\beta$ -излучения  $^{131}\text{I}$  в ЩЗ, сопровождающегося вторичным излучением и его дальнейшим переносом с учетом всех процессов, включая генерацию и перенос тормозного излучения, оже-электронов и др., и переноса собственного  $\gamma$ -излучения  $^{131}\text{I}$  с учетом генерации и переноса рентгеновского и флуоресцентного излучения и т.д. Диссипация энергии контролировалась до 1 кэВ, расчеты продолжались до достижения интегральной (по энергии) дисперсии дозы  $< 0.1\%$ .

Расчетами показано, что для данных условий облучения вклад от собственного  $\gamma$ -излучения  $^{131}\text{I}$  (вместе со всеми вторичными излучениями) в полную дозу составляет  $\sim 20\%$ .

Основным результатом расчетов является «коэффициент конверсии» активности  $^{131}\text{I}$  (равномерно распределенной в ЩЗ) в среднюю мощность полной дозы в ЩЗ (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 ЩЗ доза у телят, после которой наблюдалась деструкция ЩЗ, определялась с использованием изменения активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЗ. Решение системы дифференциальных уравнений, описывающих метаболизм йода согласно принятой камерной модели (см. рис. 4), позволило получить изменение активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЗ после шести ежедневных одноразовых поступлений  $^{131}\text{I}$  в ЖКТ телят. В результате была рассчитана динамика накопления поглощенной дозы в ЩЗ телят (см. рис. 7). Величина поглощенной дозы, накопленной в ЩЗ за период времени, после которого наблюдалось разрушение паренхиматозной ткани, составила  $\sim 330$  Гр.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное состояние вычислительных технологий переноса излучения позволяет точно моделировать как предметную область, так и функционалы поля излучения. Термин «точное моделирование» означает, что мы можем в полной мере использовать наши знания в построенных нами моделях. Такой подход на практике приводит к значительному сужению коридора погрешности при моделировании объектов предметной области и процессов переноса излучения. Описанный подход (равноточное моделирование предметной области и переноса излучений) был применен к широкому кругу задач радиационной и ядерной медицины. Основное внимание в исследовании уделено приложению представленной технологии численного моделирования к дозиметрическим задачам радиоэкологии сельскохозяйственных животных как референтных видов. Рассмотрен сценарий острого периода радиационной аварии с выбросом радиоактивного йода, определяющего патологии ЩЗ КРС, радиоактивное загрязнение молочной продукции и, как следствие, облучение ЩЗ у населения. Полученные результаты не противоречат дозиметрическим данным, характеризующим радиобиологические последствия лучевого поражения ЩЗ ( $\approx 300$  Гр) у человека [19] и овец [17, 18].

Представленный анализ формирования поглощенной дозы в организме телят позволяет оценить нижнюю границу дозы, вызывающей быстрое катастрофическое разруше-

ние паренхиматозной ткани ЩЗ и локализованного в ней источника излучения  $^{131}\text{I}$ . Прижизненная дозиметрия телят убедительно показывает этот процесс: в течение суток после 11 – 12-ти дней наблюдений мощность дозы в области ЩЗ резко уменьшается более чем в пять раз. К этому времени в ЩЗ накоплена доза около 300 Гр. Следует отметить, что необратимые патологии ЩЗ КРС в зоне влияния Чернобыльской аварии отмечались также при более низких поглощенных дозах (~150 Гр), но в течение более длительного времени (~ 3 – 5 мес.). Указанные обстоятельства дают важную информацию для оценки состояния здоровья животных в условиях радиоактивного загрязнения окружающей среды продуктами ядерного деления.

### Литература

1. *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. – 484 p.
2. *Кураченко Ю.А., Моисеенко Д.Н.* Воксельные фантомы в задачах медицинской физики // Медицинская физика. – 2012. – №3. – С. 27-34.
3. *Вознесенский Н.К., Мардынский Ю.С., Кураченко Ю.А. и др.* Радионуклидная вертебропластика при метастазах в позвоночнике // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2012. – Т. 57. – №3 – С. 39-43.
4. *Левченко А.В., Забарянский Ю.Г., Головин А.А. и др.* Программное обеспечение радионуклидной вертебропластики // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 3. – С. 52-61.
5. *Гермогенова Т.А.* Численные методы решения кинетического уравнения в задачах физики защиты от излучений реактора // Атомная энергия. – 1975. – Т. 38. – Вып. 6. – С. 401-405.
6. *Кураченко Ю.А.* Реакторные пучки для лучевой терапии. Расчетные модели и вычислительные технологии. – Palmarium Academic Publishing, OmniScriptum GmbH&Co. RG Saarbrücken, Deutschland (ISBN: 978-3-8473-9842-4), 2013. – 372 p.
7. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection Ann. ICRP 37. – 332 p.
8. *Бударков В.А.* Обоснование выбора крупного рогатого скота как одного из референтных организмов в системе защиты окружающей среды от радиации // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2009 – Т. 49. – № 2. – С. 179-185.
9. *France J., Kebreab E.* Mathematical Modelling in Animal Nutrition. Centre for Nutrition Modelling University of Guelph. Wallingford: Biddles Ltd, King's Lynn. 2008. 588 p.
10. *Сироткин А.Н., Панченко И.Я., Тюменев Л.Н. и др.* Сравнительное поведение  $^{131}\text{I}$  у коров при различных источниках поступления его в организм / В сб. Биологическое действие внешних и внутренних источников радиации. М: Медицина. 1972. – С. 72-77.
11. *Одейчук А.Н.* Обобщенный критерий эффективности моделей прогнозирования временных рядов в информационных системах // Біоніка інтелекту. – 2009. – № 1 (70). – PP. 113-119. Электронный ресурс: <http://irbis-nbuv.gov.ua> (дата доступа 01.08.2018).
12. *Спирин Е.В., Лазарев Н.М., Саранульцев И.А.* Формирование дозы облучения щитовидной железы телят при поступлении  $^{131}\text{I}$  с кормом // Докл. РАСХН. – 2004. – № 4. С. 54-55.
13. *Peksa Z., Travnichek J., Dushova H. et al.* Morphological and histometric parameters of the thyroid gland in slaughter cattle // J Agrobiology. – 2011. – Vol. 28(1). – PP. 79-84.
14. *Suuroja T., Jarveots T., Lepp E.* Age-related morphological changes of thyroid gland in calves // Veterinarija ir zootechnika. – 2003. – Vol. 23 (45). – PP. 55-59.
15. 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. – 277 p.
16. *Клепов А.Н., Кураченко Ю.А., Левченко В.А., Матусевич Е.С.* Применение методов математического моделирования в ядерной медицине. – Обнинск: ОГТУ АЭ, ОО ЭНИМЦ «Моделирующие системы». 2006 – 206 с.
17. *Бударков В.А., Зенкин А.С., Архипов Н.И. и др.* Влияние йода-131 на овец в зависимости от содержания стабильного йода в рационе // Радиобиология. – 1992. – Т. 32. – Вып. 3. – С. 451-458.
18. *Бударков В.А., Архипов Н.Н., Зенкин А.С. и др.* Влияние продуктов аварийного выброса

Чернобыльской АЭС на щитовидную железу животных // Ветеринария – 1990. – №7. – С. 60-63.

19. A Toxicological Profile for Iodine. Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology. USA. Atlanta, Georgia. – 2004. – 517 p.

Поступила в редакцию 07.08.2018г.

#### Авторы

Денисова Эльвира Николаевна, аспирантка

E-mail: ellaizaden@mail.ru

Снегирев Алексей Сергеевич, аспирант

E-mail: snegir.05@mail.ru

Кураченко Юрий Александрович, доктор физ.-мат. наук

E-mail: ykurachenko@mail.ru

Козьмин Геннадий Васильевич, канд. биол. наук

E-mail: kozmin@obninsk.ru

Бударков Виктор Алексеевич, профессор, доктор биол. наук

E-mail: budarkovva@yandex.ru

Санжарова Наталья Ивановна, чл.-корр. РАН, профессор, доктор биол. наук

E-mail: natsan@mail.ru

Матусевич Евгений Сергеевич, профессор, доктор физ.-мат. наук

E-mail: ematus32@mail.ru

UDC 614.876; 539.1.037; 519.245

## NUMERICAL SIMULATION IN DOSIMETRY PROBLEMS OF NUCLEAR MEDICINE AND RADIOBIOLOGY

Denisova E.N.\*, Snegirev A.S.\*, Kurachenko Yu.A.\*, Kozmin G.V.\*,  
Budarkov B.A.\*\*, Sanzharova N.I.\*, Matusevich E.S.\*\*\*

\* Russian Institute of Radiology and Agroecology, RIRAE  
109<sup>th</sup> km of Kiev highway, Obninsk, Kaluga reg., 249032 Russia

\*\* Federal Research Center of Virology and Microbiology  
1 Acad. Bakulov str., village Volginsky, Vladimir reg., 601125 Russia

\*\*\* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering NRNU «MEPhI»  
1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

#### ABSTRACT

Currently available computational capabilities (multi-core PCs, supercomputers, radiation transport codes) allowing solving radiation transport problems typically offer the possibility to preset periodical structures, for instance, nuclear reactor core cells. This possibility opens the way to the precision (voxel) domain modeling in the problems of nuclear medicine and radiobiology. The problem of absorbed dose calculation in the thyroid gland of cattle caused by radiation accidents was examined. The purpose of the study is the determination of coordinated values of critical dose of <sup>131</sup>I in thyroid glands of animals resulting in serious dysfunction of the gland with its subsequent destruction. Complex studies were performed for this purpose further specifying parameters of the

compartmental model based on the reliable experimental and theoretical data. Modern technologies were applied in the modeling of thyroid gland and surrounding tissues. Monte-Carlo code taking into account contributions of both  $\gamma$ - and  $\beta$ -radiation emitted from the source, as well as of secondary radiation along the whole chains until the complete dissipation of energy was used in the solution of  $^{131}\text{I}$  radiation transport equation. The main theoretical result of the study is the obtained conversion factor of  $^{131}\text{I}$  activity uniformly distributed over the volume of the thyroid gland to the average dose rate in the gland ( $\text{Bq} \rightarrow \text{Gy/s}$ ). The factor was calculated for animals for the chosen configuration of the subject area and the thyroid gland morphology. The main practical result is the reliable estimation of the lower limit of the absorbed dose of internal  $^{131}\text{I}$  radiation in the thyroid gland equal to  $\sim 300 \text{ Gy}$  destructing it within short time.

**Key words:** domain modeling, radiation transport modeling, domain voxelization, databases, on-line calculations, radiation accident, farm animals, radioactive iodine, thyroid gland, compartmental model, absorbed dose.

#### REFERENCES

1. 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, 484 p.
2. Kurachenko Yu.A., Moiseenko D.N. Voxel phantoms in problems of medical physics. *Medicinskaya fizika*. 2012, no. 3, pp. 27-34 (in Russian).
3. Voznesensky N.K., Mardynsky Yu.S., Kurachenko Yu.A., Matusevich Eu.S., Voznesenskaya N.N. Radionuclide vertebroplasty at spinal metastases. *Medicinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost*. 2012, v. 57, no. 3, pp. 39-43 (in Russian).
4. Levchenko A.V., Zabaryansky Yu.G., Golovin A.A., Voznesensky N.K., Kurachenko Yu.A. Software for radionuclide vertebroplasty. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya energetika*. 2014, no. 3, pp. 52-61 (in Russian).
5. Germogenova T. A. Numerical methods for solving the kinetic equation in the problems of shielding physics against radiation of the reactor. *Atomnaya energiya*. 1975, v. 3, iss. 6, pp. 401-405 (in Russian).
6. Kurachenko Yu.A. *Reactor beams for radiation therapy. Calculation models and computation technologies*. Palmarium Academic Publishing, OmniScriptum GmbH&Co. RG, Saarbrücken, Deutschland. (ISBN: 978-3-8473-9842-4) 2013. 372 p. (in Russian).
7. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection Ann. ICRP 37. 332 p.
8. Budarkov V. A. Justification of cattle selection as one of the reference organisms in the system of environmental protection from radiation. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2009, v. 49, no. 2, pp. 179-185 (in Russian).
9. France J., Kebreab E. *Mathematical Modelling in Animal Nutrition*. Centre for Nutrition Modelling University of Guelph. Wallingford: Biddles Ltd, King's Lynn, 2008, 588 p.
10. Sirotkin A.N., Panchenko I. Ya., Tyumenev L.N., Panteleev L.I., Nikolayeva E.M., Grishin A.I., Korneev N.A. *Comparative behavior of  $^{131}\text{I}$  in cows at different sources of its intake*. In Collection «Biological effect of external and internal sources of radiation». Moscow. Medicina Publ., 1972, pp. 72-77 (in Russian).
11. Odejchuk A.N. A generalized criterion for the effectiveness of forecasting models for time series in information systems. *Bionika intellektu*. 2009, no. 1(70), pp. 113-119. Available at: <http://irbis-nbuv.gov.ua> (accessed Aug 01, 2018) (in Russian).
12. Spirin Eu.V., Lazarev N.M., Sarapul'tsev I.A. Formation of a dose of calves thyroid irradiation at  $^{131}\text{I}$  receipt with a forage. *Doklady Rossijskoj Akademii Sel'skokhozyajstvennykh Nauk*. 2004, no. 4, pp. 54-55 (in Russian).
13. Peksa Z., Travnichek J., Dushova H., Konechy R., Hason'ova L. Morphological and histometric parameters of the thyroid gland in slaughter cattle. *J Agrobiology*. 2011, v. 28(1), pp. 79-84.
14. Suuroja T., Jyarveots T., Lepp E. Age-related morphological changes of thyroid gland in calves. *Veterinarija ir zootechnika*. 2003, v. 23(45), pp. 55-59.



15. 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. 277 p.

16. Klyopov A.N., Kurachenko Yu.A., Levchenko V.A., Matusevich Eu.S. *Application of mathematical modeling techniques in nuclear medicine*. Obninsk: OGTUAE, 000 ENIMTs «Simulation systems» Publ., 2006, 206 p. (in Russian).

17. Budarkov V.A., Zenkin A.S., Arkhipov N.I., Yunusova R.M., Mayakov E.A., Amirkhanyan A.R., Prilepskaya E.P., Surgucheva L.M. The influence of iodine-131 on sheep depending on the content of stable iodine in a diet. *Radiobiologiya*. 1992, v. 32(3), no. 3, pp. 451-458 (in Russian).

18. Budarkov V.A., Arkhipov N.I., Zenkin A.S., Yunusova R.M., Yastrebkov Yu. A. Accidental release products' effect of Chernobyl NPP on the thyroid gland of animals. *Veterinariya*. 1990, no. 7, pp. 60-63 (in Russian).

19. *A Toxicological Profile for Iodine*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology. USA. Atlanta, Georgia. 2004, 517 pp.

### Authors

Denisova El'vira Nikolaevna, PhD Student

E-mail: ellaizaden@mail.ru

Snegirev Aleksej Sergeevich, PhD Student

E-mail: snegir.05@mail.ru

Kurachenko Yuriy Aleksandrovich, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: ykurachenko@mail.ru

Kozmin Gennadij Vasil'evich, Cand. Sci. (Biol.)

E-mail: kozmin@obninsk.ru

Budarkov Viktor Alekseevich, Professor, Dr. Sci. (Biol.)

E-mail: budarkovva@yandex.ru

Sanzharova Natal'ya Ivanovna, RAS corresponding member, Professor, Dr. Sci. (Biol.)

E-mail: natsan@mail.ru

Matusevich Evgenij Sergeevich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: ematus32@mail.ru