DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-2-113-122

УДК 539.1.074:574

Модель расчёта поглощения энергии от инкорпорированных излучателей моноэнергетических электронов в объектах природной биоты

Сазыкина Т.Г., Крышев А.И.

ФГБУ «НПО «Тайфун», Обнинск

Предложена модель, позволяющая рассчитывать поглощение энергии от инкорпорированных излучателей моноэнергетических электронов в организмах различной геометрии. Показана эффективность вычисления поглощённых фракций для организмов сферической, эллипсоидальной и цилиндрической формы путём сравнения расчётных значений с референтными данными. Уравнения модели не содержат подгоночных коэффициентов и не нуждаются в проведении процедур компьютерной интерполяции. Предложенный подход позволяет выполнять корректные экспресс-расчёты доз внутреннего облучения биологических объектов различной формы от бета-излучающих радионуклидов без использования методов компьютерного моделирования Монте-Карло. Модель может быть использована в задачах радиационной дозиметрии биоты и радиационной защите окружающей среды.

Ключевые слова: доза, модель, расчёт, уравнения, поглощение энергии, сферы, эллипсоиды, цилиндры, масштабирование, внутреннее облучение, электроны, радиационная безопасность, радионуклиды, защита, окружающая среда.

Введение

Расчёт внутреннего облучения биологических объектов от инкорпорированных радиоактивных веществ является достаточно сложным разделом радиационной дозиметрии. Оценки дозы внутреннего облучения необходимы в радиационной терапии, диагностике с применением радиоизотопов, в задачах радиационной защиты человека и биоты от повреждающего действия ионизирующих излучателей.

В стандартной методике, разработанной Комитетом по медицинской внутренней дозиметрии (MIRD), поглощение энергии внутри заданного биологического объекта может быть выражено в терминах радиационной поглощённой фракции от общей энергии, выделенной в данном объёме [1-3].

Оценка величины поглощённой фракции $\phi(R, E)$ является ключевой задачей для внутренней дозиметрии различных биообъектов. Расчёт поглощённой фракции может быть выполнен либо численным интегрированием функции точечного источника по объёму для простой геометрии [2, 3], либо путём компьютерного моделирования с использованием метода Монте-Карло [4-6]. В медицинской дозиметрии опубликованы справочные таблицы поглощённых фракций от инкорпорированных эмиттеров разных энергий в биообъектах, релевантных для медицинских целей [4, 6, 7], данные получены с помощью компьютерных программ Монте-Карло.

В радиационной дозиметрии природной биоты были опубликованы значения поглощённых фракций внутреннего облучения для ограниченного набора биологических сфер с массами от 10^{-6} до 10^3 кг (всего 10 размеров с 10-кратным интервалом) и 18 значений энергий электронов [5, 8], расчёты были выполнены с использованием компьютерной системы MCNP4. Для других размеров биообъектов предложена схема интерполяции между имеющимися данными расчёт-

Сазыкина Т.Г. – гл. науч. сотр., д.ф.-м.н.; Крышев А.И.* – зав. лаб., д.б.н. ФГБУ «НПО «Тайфун».

*Контакты: 249038, Калужская обл., Обнинск, ул. Победы, д. 4. Тел.: +7(484) 397-16-89; e-mail: kryshev@rpatyphoon.ru.

ной сетки с использованием формул, включающих многочисленные подгоночные параметры. Также была предложена методика преобразования расчётов от сфер к эллипсоидам [5, 8]. На основе результатов перечисленных публикаций была создана европейская компьютерная система ERICA Tool, ставшая одним из основных инструментов расчёта доз на биоту в европейских странах и в РФ [9, 10] (см. также интернет-сайт www.ERICA-tool.com).

Та же методология и интерполяционные методы заложены и в более современном электронном дополнении к Публикации 136 МКРЗ, в котором рассчитываются значения дозовых коэффициентов по заданным размерам организма и заданному радионуклиду [11], доступ на интернет-сайте <http://biotaDC.icrp.org>.

Разнообразные методы интерполяции, применяемые в радиационной дозиметрии биообъектов, содержат большое число подгоночных параметров (от семи и более параметров), которые подгоняются таким образом, чтобы соответствовать в точках расчётной сетки дискретным значениям, полученным из программ Монте-Карло.

Разнообразие форм и размеров организмов в природе очень велико, использование при расчёте дозовых нагрузок для каждого типа организмов компьютерных программ Монте-Карло является чрезмерно затратным.

В данной работе основная цель состояла в создании метода прямого аналитического расчёта поглощённых фракций без применения компьютерного моделирования методом Монте-Карло, а также без введения многочисленных подгоночных параметров.

В следующих разделах метод изложен применительно к биообъектам в виде сфер из мягкой биологической ткани. Излучатель моноэнергетических электронов предполагается равномерно распределённым в биообъекте. Представлена схема адаптации метода для расчёта поглощённых фракций электронного излучения в эллипсоидах.

Данные и методы расчёта

Выбор независимых международных баз данных значений поглощённых фракций электронного излучения в сферических биообъектах

Проверка работоспособности нового методического подхода и аналитической модели должна проводиться на независимых данных достаточно высокого качества, которые могут быть использованы в качестве истинных референтных значений при тестировании модели. С этой целью был выполнен анализ литературы и подобраны обширные зарубежные базы данных значений поглощённых фракций электронного излучения в сферических биообъектах, рекомендованные для использования в медицинской дозиметрии и в дозиметрии природной биоты [4-8].

В имеющихся публикациях наборы значений поглощённых фракций $\varphi(R, E)$ для биологических сфер представлены в виде обширных таблиц и графиков для различных значений размеров объектов и энергий электронов [4-8]. Графики поглощённых фракций демонстрируют нелинейные зависимости как от радиуса R , так и от энергии E в виде однотипных гладких кривых, смещённых относительно друг друга для разных R и E и изменяющихся в диапазоне значений $[0, 1]$. При рассмотрении серий однотипных графиков $\varphi_R(E, R)$ возникает очевидный вопрос – возможно ли с помощью масштабирования добиться объединения однотипных кривых в единую, универсальную кривую? Ответ – да, это возможно при специальном масштабировании.

Универсальная кривая поглощённых фракций в сферах с равномерно распределённым излучателем моноэнергетических электронов

Гипотеза о возможности существования универсальной дозовой кривой для электронного излучения была впервые высказана в конце 1960-х годов в работах Д.П. Осанова и Г.Б. Радзиевского [12] (см. также описание в книге [13]), которые предположили возможность существования универсальной кривой для изучаемых ими дозовых распределений от широких пучков моноэнергетических электронов при использовании масштабирования расстояний на длины пробегов электронов.

Имея в виду гипотезу об универсальной кривой, было необходимо произвести масштабирование размеров биообъектов, выразив их в виде безразмерных эффективных радиусов. Естественным способом получения безразмерного эффективного радиуса R_{eff} было масштабирование (шкалирование) реального радиуса R на среднюю длину пробега ионизирующей частицы (электрона) в мягкой биологической ткани. Таким образом, для моноэнергетических электронов $R_{eff} = R/\Lambda(E_\beta)$, где $\Lambda(E_\beta)$, см – длина пробега электрона с начальной энергией E_β в мягкой биологической ткани. Значения $\Lambda(E_\beta)$ являются стандартными табличными величинами, они рассчитаны для разных материалов, включая мягкие биологические ткани. Справочные таблицы значений длин пробегов электронов разных энергий имеются в справочниках по радиационной дозиметрии [14].

Применение масштабирования к международным базам значений поглощённых фракций в мягкотканых сферах выявило существование единой универсальной кривой поглощённых фракций как функции одного аргумента – безразмерного эффективного радиуса биообъекта, как подробно описано в нашей статье [15]. Фрагмент универсальной кривой поглощённых фракций электронов с указанием референтных данных показан на рис. 1.

Рис. 1. Фрагмент универсальной кривой поглощённых фракций электронного излучения в мягкотканых сферах (модифицировано из публикации [15]).

Отметим, что в работе [16] кривая сходного вида была получена путём аппроксимации собственных расчётов по программе Монте-Карло поглощения энергии электронов в сферических объектах для целей медицинской дозиметрии. В качестве базы для масштабирования в работе

[16] было предложено расстояние (X_{99}), на котором поглощается 99% энергии моноэнергетических электронов, испущенных из центра сферы; аппроксимация как величин X_{99} , так и результирующей кривой для поглощённых фракций была выполнена с использованием ряда параметров.

Модель расчёта определения поглощённых фракций энергии от инкорпорированных излучателей моноэнергетических электронов в сферических биообъектах

В соответствии со специфической формой универсальной кривой новая расчётная формула для $\varphi_{\beta}(R_{\beta,eff})$ должна иметь следующие свойства:

- функция одного аргумента $R_{\beta,eff}$;
- гладкая кривая, изменяющаяся в пределах 0-1;
- функция с насыщением по величине $R_{\beta,eff}$.

Простейшей математической формулой кривой с насыщением, удовлетворяющей перечисленным выше свойствам, является зависимость типа формулы Моно.

В нашей работе [15] было показано, что уравнения для расчёта поглощённой фракции для моноэнергетических электронов и сферических биообъектов имеют вид:

$$\varphi_{\beta}(R_{\beta,eff}) = \frac{1}{1 + \frac{0.5}{R_{\beta,eff}}} ; R_{\beta,eff} = \frac{R}{\Lambda(E_{\beta})}; \quad (1)$$

$$\theta_{\beta}(R_{\beta,eff}) = \exp(1 - R_{\beta,eff}), \text{ если } R_{\beta,eff} < 1;$$

$$\theta_{\beta}(R_{\beta,eff}) = 1, \text{ если } R_{\beta,eff} \geq 1;$$

где $\varphi_{\beta}(R_{\beta,eff})$ – поглощённая фракция электронного излучения в сфере радиуса R , см; $R_{\beta,eff} = R/\Lambda(E_{\beta})$ – масштабированный эффективный радиус сферы (безразмерный); $\Lambda(E_{\beta})$ – пробег электрона в мягкой биологической ткани, см; $\theta_{\beta}(R_{\beta,eff})$ – корректирующая аналитическая функция, отличная от 1 при $R_{\beta,eff} < 1$.

Выражение (1) для расчёта поглощённых фракций электронов в сферах является функцией одного безразмерного аргумента $R_{\beta,eff}$, который содержит одновременно информацию о размере биообъекта и энергии электронов. С помощью (1) поглощённые фракции могут быть рассчитаны непосредственно без подгоночных параметров и без применения методов Монте-Карло.

Модификация модели для расчёта поглощённых фракций электронного излучения в биообъектах несферической формы

Для расчёта поглощённых фракций ионизирующих излучений в мягкотканых эллипсоидах Э. Амато (E. Amato) с соавторами [6, 7] была разработана оригинальная методика, в которой продемонстрировано, что поглощённые фракции энергии внутреннего излучения одинаковы для эллипсоида и сферы, имеющей такое же отношение «объём/поверхность» как у исходного эллипсоида. В указанной методике при расчёте поглощённых фракций эллипсоид с объёмом V и площадью поверхности S аппроксимируется суррогатной сферой с генерализованным радиусом $R_{сурр}$, который для эллипсоида рассчитывается по формулам:

$$R_{сурр}^{(э)} = 3 \frac{V}{S}; V = \frac{4}{3} \pi \cdot a \cdot b \cdot c; \quad (2)$$

$$S \cong 4\pi \left[\frac{(a \cdot b)^d + (a \cdot c)^d + (b \cdot c)^d}{3} \right]^{\frac{1}{d}}; d = \ln 3 / \ln 2 \cong 8/5,$$

где a, b, c – полуоси эллипсоида; V, S – объём и площадь эллипсоида.

Таким образом, применительно к эллипсоидным биообъектам задача преобразуется к определению поглощённой фракции электронного излучения в суррогатной сфере с помощью уравнений (1). В дозиметрии природной биоты применение метода Амато оказывается весьма полезным, поскольку большинство животных при расчётах доз аппроксимируются однородными эллипсоидами разных размеров.

В дозиметрии биоты [6-8, 11, 17] для случаев непрерывного энергетического спектра бета-излучения радионуклида обычно производится аппроксимация спектра дискретным значением, равным средней энергии бета-излучения. При необходимости более точного расчёта может быть произведена более детальная аппроксимация непрерывного бета-спектра [18]. Примеры практического применения метода для аналитических расчётов дозовых коэффициентов внутреннего облучения эллипсоидных организмов биоты от инкорпорированных бета-излучающих радионуклидов приведены в нашей статье [15], также дозовые коэффициенты приводятся в работах [5, 11, 19].

Представляет интерес дальнейшее расширение применимости нового метода для расчёта поглощённых фракций электронного излучения в телах цилиндрической формы. Так же, как сфера и эллипсоид, цилиндр является выпуклым телом и для него величина средней хорды пропорциональна отношению «объём тела/площадь», т.е. V/S . Аналогично формуле (2) для эллипсоидов, радиус суррогатной сферы для цилиндра радиусом r и высотой h рассчитывается по формулам:

$$R_{\text{сурр}}^{(ц)} = 3 \frac{V_{ц}}{S_{ц}}; V_{ц} = \pi \cdot r^2 \cdot h; \quad (3)$$

$$S_{ц} = 2\pi \cdot r \cdot (r + h).$$

Результаты и обсуждение

Тестирование аналитических результатов на независимых международных данных значений поглощённых фракций моноэнергетических электронов

Аналитические значения поглощённых фракций были рассчитаны для геометрических моделей разных размеров и форм. Аналитические значения сравнивали с рекомендованными из медицинской дозиметрии, опубликованными в работе [4] и с данными по дозиметрии биоты [5]. На рис. 2 представлены корреляции между аналитическими значениями для сферических биообъектов и референтными значениями поглощённых фракций электронов, взятых из публикаций разных авторов: рис. 2А показывает корреляцию с данными Стабина и Конейненберга [4] (расчёты Монте-Карло по программе MCNP); рис. 2Б – корреляцию между аналитическими значениями и данными Улановского [5] для сферических биообъектов. Сравнивались значения поглощённых фракций для одинаковых значений энергии электронов и одинаковых размеров сфер. Корреляционный анализ подтверждает хорошее согласие аналитического расчёта с независимыми международными данными, соотношение аналитических данных с расчётными описывается линейной зависимостью $Y=kX$, где величина k составляет значения 0,99-1, коэффициенты корреляции выше 99%.

Рис. 2. Корреляции между аналитическими значениями поглощённых фракций электронного излучения (сферические тела) и международными референтными данными [4, 5].

А – Сравнение с данными публикации [4]; Б – сравнение с референтными данными из публикации [5].

На рис. 3 представлены корреляции между аналитическими значениями поглощённых фракций электронов, рассчитанными по формулам (1)-(3) для мягкотканых цилиндров и независимыми референтными значениями, полученными в публикации [20] с помощью современной компьютерной программы Монте-Карло GEANT4. Сравнение показывает хорошую применимость аналитического метода для объектов цилиндрической формы.

Рис. 3. Корреляции между аналитическими значениями поглощённых фракций электронного излучения (мягкотканые цилиндры) и референтными данными из публикации [20].

На рис. 4 представлено более детальное сопоставление величин поглощённых фракций электронов для разных объёмов цилиндров (от 1 до 10^5 см³, $h=1,5r$) для нескольких значений энергий электронов – 0,1; 1 и 4 МэВ; тестовые данные взяты из публикации [20], аналитические значения рассчитаны с помощью формул (1), (3). Как видно из представленных данных, новый метод имеет хорошую работоспособность для выпуклых биологических тел, включая сферы, эллипсоиды и цилиндры, что позволяет рассчитывать поглощённые фракции электронов для большинства объектов животного мира.

Рис. 4. Аналитические значения поглощённых фракций электронов в телах цилиндрической формы в зависимости от соотношения объёма и площади; сравнение с референтными данными из публикации [20].

Заключение

Разработана модель расчёта поглощения энергии от источников моноэнергетических электронов, равномерно распределённых в животных объектах природной биоты разной формы. Модель включает масштабирование реальных размеров организмов на стандартные средние длины пробега электронов.

Предложенные уравнения расчёта не связаны с компьютерными методами Монте-Карло, а также не содержат подгоночных параметров и не требуют интерполяций между расчётными точками. Показана работоспособность уравнений для расчёта поглощения моноэнергетических электронов не только в сферах, но и в эллипсоидах и цилиндрах. Модель предоставляет возможность простого и общедоступного экспресс-расчёта поглощённых фракций бета-излучающих радионуклидов и дозовых нагрузок для различных объектов природной среды. Подход может иметь широкое применение в задачах оценок радиационной безопасности живых организмов, а также в задачах радиационной защиты окружающей среды.

Литература

1. **Loevinger R., Berman M.** A revised schema for calculating the absorbed dose from biologically distributed radionuclides. MIRD Pamphlet N 1, revised. New York: Society of Nuclear Medicine, 1976. P. 3-10.
2. **Хайн Дж., Браунелл Г.** Радиационная дозиметрия: пер. с англ. /под ред. Н.Г. Гусева, К.А. Труханова. М.: Издательство иностранной литературы, 1958. 758 с.
3. Руководство по радиационной защите для инженеров. Т. 2: пер. с англ. /под ред. Д.Л. Бродера. М.: Атомиздат, 1973. 288 с.
4. **Stabin M.G., Konijnenberg M.W.** Re-evaluation of absorbed fractions for photons and electrons in spheres of various sizes //J. Nucl. Med. 2000. V. 41, N 1. P. 149-160.
5. **Ulanovsky A., Pröhl G.** A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota //Radiat. Environ. Biophys. 2006. V. 45, N 3. P. 203-214.
6. **Amato E., Lizio D., Baldari S.** Absorbed fractions in ellipsoidal volumes for β^- radionuclides employed in internal radiotherapy //Phys. Med. Biol. 2009. V. 54, N 13. P. 4171-4180.
7. **Amato E., Lizio D., Baldari S.** Absorbed fractions for electrons in ellipsoidal volumes //Phys. Med. Biol. 2011. V. 56, N 2. P. 357-365.
8. **Ulanovsky A., Pröhl G., Gomez-Ros J.M.** Methods for calculating dose conversion coefficients for terrestrial and aquatic biota //J. Environ. Radioact. 2008. V. 99, N 9. P. 1440-1448.
9. **Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N.A., Copplestone D., Hosseini A.** A new version of the ERICA Tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals //J. Environ. Radioact. 2016. V. 153. P. 141-148.
10. **Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N.A., Copplestone D., Pröhl G., Ulanovsky A.** The ERICA Tool //J. Environ. Radioact. 2008. V. 99, N 9. P. 1371-1383.
11. ICRP, 2017. Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation. ICRP Publication 136 //Ann. ICRP. 2017. V. 46, N 2. P. 1-136.
12. **Osanov D.P., Tissen M.U., Radzievsky G.B.** Dose distribution of β -radiation of fission products in the tissue equivalent material //Health Phys. 1969. V. 17, N 3. P. 484-495.
13. **Осанов Д.П.** Дозиметрия и радиационная биофизика кожи. М.: Энергоатомиздат, 1990. 233 с.
14. **Машкович В.П., Кудрявцева А.В.** Защита от ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1995. 494 с.
15. **Sazykina T.G., Kryshev A.I.** A new analytical method for estimating electron-absorbed fractions in soft-tissue biological volumes //Radiat. Environ. Biophys. 2021. V. 60, N 1. P. 141-149.
16. **Степаненко В.Ф., Яськова Е.К., Белуха И.Г., Петриев В.М., Скворцов В.Г., Колыженков Т.В., Петухов А.Д., Дубов Д.В.** Расчёты доз внутреннего облучения нано-, микро- и макро-биоструктур электронами, бета-частицами и квантовым излучением различной энергии при разработках и исследованиях новых РФП в ядерной медицине //Радиация и риск. 2015. Т. 24, № 1. С. 35-57.
17. ICRP, 2008. Environmental protection – the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108 //Ann. ICRP. 2008. V. 38, N 4-6. P. 1-242.
18. ICRP, 2008. Nuclear decay data for dosimetric calculations. ICRP Publication 107 //Ann. ICRP. 2008. V. 38, N 3. P. 1-96.
19. **Amato E., Italiano A.** An analytical model for calculating internal dose conversion coefficients for non-human biota //Radiat. Environ. Biophys. 2014. V. 53, N 2. P. 455-459.
20. **Rahman Z., Rehman S.U., Mirza S.M., Arshed W., Mirza N.M.** Geant4-based comprehensive study of the absorbed fraction for electrons and gamma-photons using various geometrical models and biological tissues //Nucl. Technol. Radiat. Prot. 2013. V. 28, N 4. P. 341-351.

Model for calculating energy absorption in environmental objects from incorporated sources of monoenergetic electrons

Sazykina T.G., Kryshev A.I.

Research and Production Association "Typhoon", Obninsk

Model is suggested to calculating energy absorption in organisms of various geometry from incorporated sources of monoenergetic electrons. The effectiveness of the approach was demonstrated for spheres, ellipsoids, and cylinders by comparison of analytical values with large international testing data. Model equations are free of any fitting parameters; computer approximating procedures are not employed. The method allows to make correct express-calculations of internal absorbed doses in various biological objects from beta emitting radionuclides; the calculations are performed without Monte Carlo codes. The model may be used in the internal radiation dosimetry for non-human biota, and in environmental radiation protection.

Key words: dose, model, calculation, equations, energy absorption, spheres, ellipsoids, cylinders, scaling, internal exposure, electrons, radiation safety, radionuclides, protection, environment.

References

1. **Loevinger R., Berman M.** A revised schema for calculating the absorbed dose from biologically distributed radionuclides. MIRD Pamphlet N 1, revised. New York, Society of Nuclear Medicine, 1976, pp. 3-10.
2. **Hine G.J., Brownell G.L.** Radiation dosimetry. Russ. ed.: N.G. Gusev, K.A. Trukhanov. Moscow, Foreign Literature Publ., 1958. 758 p. (In Russian).
3. *Engineering compendium on radiation shielding*. Vol. 2. Russ. ed.: D.L. Broder. Moscow, Atomizdat, 1973. 288 p. (In Russian).
4. **Stabin M.G., Konijnenberg M.W.** Re-evaluation of absorbed fractions for photons and electrons in spheres of various sizes. *J. Nucl. Med.*, 2000, vol. 41, no. 1, pp. 149-160.
5. **Ulanovsky A., Pröhl G.** A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2006, vol. 45, no. 3, pp. 203-214.
6. **Amato E., Lizio D., Baldari S.** Absorbed fractions in ellipsoidal volumes for β^- radionuclides employed in internal radiotherapy. *Phys. Med. Biol.*, 2009, vol. 54, no. 13, pp. 4171-4180.
7. **Amato E., Lizio D., Baldari S.** Absorbed fractions for electrons in ellipsoidal volumes. *Phys. Med. Biol.*, 2011, vol. 56, no. 2, pp. 357-365.
8. **Ulanovsky A., Pröhl G., Gomez-Ros J.M.** Methods for calculating dose conversion coefficients for terrestrial and aquatic biota. *J. Environ. Radioact.*, 2008, vol. 99, no. 9, pp. 1440-1448.
9. **Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N.A., Copplestone D., Hosseini A.** A new version of the ERICA Tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals. *J. Environ. Radioact.*, 2016, vol. 153, pp. 141-148.
10. **Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N.A., Copplestone D., Pröhl G., Ulanovsky A.** The ERICA Tool. *J. Environ. Radioact.*, 2008, vol. 99, no. 9, pp. 1371-1383.
11. ICRP, 2017. Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation. ICRP Publication 136. *Ann. ICRP*, 2017, vol. 46, no. 2, pp. 1-136.
12. **Osanov D.P., Tissen M.U., Radzievsky G.B.** Dose distribution of β -radiation of fission products in the tissue equivalent material. *Health Phys.*, 1969, vol. 17, no. 3, pp. 484.

Sazykina T.G. – Chief Researcher, D. Sc., Phys.-Math.; **Kryshev A.I.*** – Head of Lab., D. Sc., Biol. RPA "Typhoon".

*Contacts: 4 Pobedy str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249038. Tel.: +7 (484) 397-16-89; e-mail: kryshev@rpatyphoon.ru.

13. **Osanov D.P.** Dosimetry and radiation biophysics of skin. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 233 p. (In Russian).
14. **Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V.** Protection from ionizing radiation. Moscow, Energoatomizdat, 1995. 494 p. (In Russian).
15. **Sazykina T.G., Kryshev A.I.** A new analytical method for estimating electron-absorbed fractions in soft-tissue biological volumes. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2021, vol. 60, no. 1, pp. 141-149.
16. **Stepanenko V.F., Yaskova E.K., Belukha I.G., Petriev V.M., Skvortsov V.G., Kolyzhenkov T.V., Petukhov A.D., Dubov D.V.** The calculation of internal irradiation of nano-, micro- and macro-biostructures by electrons, beta particles and quantum radiation of different energy for the development and research of new radiopharmaceuticals in nuclear medicine. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 35-57. (In Russian).
17. ICRP, 2008. Environmental protection – the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108. *Ann. ICRP*, 2008, vol. 38, no. 4-6, pp. 1-242.
18. ICRP, 2008. Nuclear decay data for dosimetric calculations. ICRP Publication 107. *Ann. ICRP*, 2008, vol. 38, no. 3, pp. 1-96.
19. **Amato E., Italiano A.** An analytical model for calculating internal dose conversion coefficients for non-human biota. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2014, vol. 53, no. 2, pp. 455-459.
20. **Rahman Z., Rehman S.U., Mirza S.M., Arshed W., Mirza N.M.** Geant4-based comprehensive study of the absorbed fraction for electrons and gamma-photons using various geometrical models and biological tissues. *Nucl. Technol. Radiat. Prot.*, 2013, vol. 28, no. 4, pp. 341-351.