

## МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ ЭМБРИОНОВ ПТИЦ НА РАННИХ СТАДИЯХ ЭМБРИОГЕНЕЗА В УСЛОВИЯХ ПОСТОЯННОГО ОБЛУЧЕНИЯ $^{90}\text{Sr}$

В. А. Гайченко<sup>1</sup>, Е. В. Сваричевская<sup>2</sup>, Н. И. Семенюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный аграрный университет, Киев, Украина*

<sup>2</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

Обосновывается возможность оценки эквивалентной дозы облучения зародышей птиц на ранних стадиях эмбриогенеза (стадия диска) за счет  $^{90}\text{Sr}$ , инкорпорированного в скорлупе птичьих яиц, в условиях постоянного облучения с учетом особенностей положения эмбриона в яйце в этот период.

### Введение

Обследование птиц, обитающих в Чернобыльской зоне отчуждения, показало существенное влияние ионизирующего излучения на воспроизводство практически всех орнитокомплексов и, в особенности, птиц водно-болотного комплекса и мелких воробьиных [1 - 5].

Радиометрическое определение удельной активности скорлупы птичьих яиц показало очень высокую концентрацию  $^{90}\text{Sr}$  в них, сравнимую с активностью радиоактивных отходов (около  $10^4$  Бк/кг), в связи с чем нами была поставлена задача определения возможных последствий этого явления, в частности изучение воздействия инкорпорированного в скорлупе яиц радиоактивного стронция на развивающийся эмбрион [6].

Традиционно оценку дозовых нагрузок на различные биологические объекты проводят на основании камерных стационарных моделей, что позволяет пренебречь второстепенными дозиметрическими характеристиками, выделить критические пути воздействия на объект и ограничиться наименьшим количеством параметров облучения.

В данной работе нами предложена модель расчета эквивалентных доз облучения зародышей различных видов птиц, обитающих на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС, от инкорпорированного в скорлупе  $^{90}\text{Sr}$ .

### Модель и параметры расчета

При расчетах эквивалентных доз облучения эмбрионов птиц учитывались следующие предположения:

1. Дозы, полученные в первую неделю развития зародыша, являются наиболее существенными. В течение этого периода положение центра зародыша меняется незначительно по сравнению с длиной пробега электрона и, следовательно, можно оценить дозу на его центр.

2. Пролет электронов, испускаемых при радиоактивном распаде  $^{90}\text{Sr}$ , в скорлупе намного

превышает толщину скорлупы для рассматриваемых нами видов птиц (пробег электронов  $^{90}\text{Sr}$  в биологической ткани составляет 0,19 см).

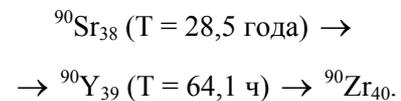
3. Поверхность яйца можно приблизительно описать эллипсоидом вращения. В качестве излучающей поверхности рассматривается часть поверхности эллипсоида, лежащая внутри сферы с радиусом  $R$ , равным длине пробега электронов.

Исходя из указанных предположений, можно оценить дозовую нагрузку на эмбрион в течение первых дней развития  $dt$  при известной активности  $A$  радионуклида  $^{90}\text{Sr}$ , содержащегося в его скорлупе.

Пусть известны: толщина скорлупы  $l$ , большой  $d1$  и малый  $d2$  диаметры яйца, активность скорлупы  $A$ , расстояние центра зародыша от скорлупы  $l_0$ , угол  $q$ , определяющий положение зародыша в яйце.

Для решения этой задачи необходимо оценить поток энергии в ткани зародыша, сопровождающий ядерные превращения радионуклида в скорлупе яйца. Биологическое действие на клетки зародыша можно оценить по величине потока частиц, их энергии и удельной максимальной эквивалентной дозе в биологической ткани.

Цепочка радиоактивного распада  $^{90}\text{Sr}$  имеет вид [7]



Ядра  $^{90}\text{Sr}$  и его дочернего продукта  $^{90}\text{Y}$  являются бета-излучателями.

Считая, что поверхность скорлупы можно разбить на элементарные точечные моноэнергетические изотропные источники излучения, расположенные в центре излучающих площадок  $dS$ , поток электронов в точке расположения зародыша  $r_0(x_0, y_0, z_0)$  определяется по формуле

$$P = \iint \frac{P_0 M(r) \cos b(r)}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

где  $b(r)$  – угол, который составляет излучающая площадка с элементом поверхности скорлупы;  $M(r)$  – множитель, учитывающий ослабление потока электронов  $P_0$  за счет поглощения в биологической ткани.

Интегрирование проводится по части поверхности скорлупы  $SR$ , удаленной от точки  $r_0$  не более чем на пробег электрона  $R$ .

Поглощение немонотонных частиц, испускаемых радиоактивными изотопами, происходит почти по экспоненциальному закону и вдали от границы полного поглощения описывается формулой

$$M(r) = \exp(-mr), \quad (2)$$

где  $m$  – линейный коэффициент поглощения электронов, который можно оценить по величине граничной энергии бета-спектра  $E_m$  и плотности биологической ткани ( $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ ) [8]

$$m = \rho \cdot 15,5 \cdot E_m^{-1,41}. \quad (3)$$

Плотность потока электронов в окружающее пространство с поверхности скорлупы можно выразить через поверхностную активность  $a$

$$P_0 = a \cdot 3,71E^{10} \cdot N, \quad (4)$$

где  $N$  – число бета-электронов в одном акте распада.

В общем случае

$$a = \frac{A}{S} \cdot i,$$

где  $i$  – доля от общей активности, излучаемая с внутренней поверхности скорлупы;  $S$  – площадь излучающей поверхности.

Величину поглощенной дозы за время  $dt$  в точке  $r$  можно оценить по величине потока электронов в данной точке и максимальной удельной эквивалентной дозе  $h$  для энергии  $E_{cc}$ :

$$Dl = \int_t h \cdot P \cdot dt. \quad (5)$$

Итак, решение задачи сводится к вычислению интеграла по поверхности  $SR$  от функции

$$f(r) = k \cdot \frac{\cos[b(r)\exp(-mr)]}{r^2}, \quad (6)$$

где

$$k = \frac{A \cdot i \cdot h \cdot dt}{4\pi S} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \cdot N.$$

Поверхность яйца можно приближенно описать эллипсоидом вращения, у которого две оси равны:

$$\frac{x^2}{a^2} = \frac{y^2}{b^2} = \frac{z^2}{b^2} = 1, \quad a = d1/2; \quad b = d2/2. \quad (7)$$

Площадь поверхности эллипсоида

$$S = 2\pi(b^2 + \frac{ab}{e} \arcsin e), \quad (8)$$

где  $e$  – эксцентриситет эллипса, равный

$$\frac{(a^2 - b^2)^{1/2}}{a}.$$

Считая, что период первых дней развития зародыша является определяющим в его развитии, и полагая  $dt = 7$  сут, можно установить, что в течение этого периода размер зародыша меняется незначительно по сравнению с длиной пробега электрона  $R$  и, следовательно, можно оценить дозу на его центр  $r_0$ , положение которого не изменится за время  $dt$ .

Примем  $q = 90^\circ$  и

$$x_0 = (d1/2 - l_0)\cos q = 0,$$

$$y_0 = (d2/2 - l_0)\sin q = d2/2 - l_0, \quad (9)$$

$$z_0 = 0.$$

Тогда  $r(x, y, z) = [x^2 + (y - y_0)^2 + z^2]^{1/2}$ , причем координаты  $(x, y, z)$  лежат на поверхности эллипсоида вращения.

Итак, излучающая часть поверхности эллипсоида лежит внутри сферы с центром  $(x_0, y_0, z_0)$  и радиусом  $R$ .

Удобно перейти к сферическим координатам и воспользоваться параметрическим уравнением эллипсоида

$$x = a \sin \varphi \cos \theta,$$

$$y = b \sin \varphi \cos \theta, \quad (10)$$

$$z = b \cos \varphi.$$

Тогда искомый интеграл от функции  $f(r_0) = f(x, y, z)$  можно представить в виде

$$I = 4 \iint dS_{el} \cdot f(\varphi, \theta), \quad (11)$$

где интегрирование проводится по первому октанту. Углы  $\varphi$  и  $\theta$  связаны между собой уравнением линии пересечения поверхностей эллипсоида и сферы

$$x^2 = (y - y_0)^2 + z^2 = R^2 \quad (12)$$

или в сферических координатах

$$\begin{aligned} \sin^2 \varphi (a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta) - \\ - 2by_0 \sin \varphi \sin \theta + b^2 \cos \varphi = R^2 - y_0^2, \end{aligned} \quad (13)$$

а элемент поверхности эллипсоида определяется формулой

$$\begin{aligned} dS = ab^2 \left( \frac{\sin^2 \varphi \cdot \cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \varphi \cdot \sin^2 \theta}{b^2} + \frac{\cos^2 \varphi}{b^2} \right)^{1/2} \times \\ \times \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot d\theta. \end{aligned} \quad (14)$$

В общем виде для произвольной величины  $R$  задача достаточно сложна.

В данной задаче наибольший вклад в интенсивность излучения дают следующие линии [7]:

$^{90}\text{Sr}$	$^{90}\text{Y}$
$Em1 = 0,546 \text{ МэВ},$	$Em2 = 2,274 \text{ МэВ},$
$Ec1 = 0,196 \text{ МэВ},$	$Ec2 = 0,936 \text{ МэВ},$
$k1 = 17,3 \%,$	$k2 = 82,6 \%,$
$n1 = 100 \%. $	$n2 = 99,98 \%. $

Здесь  $Em$  – максимальная энергия спектра бета-распада;  $Ec$  – средняя энергия спектра;  $n$  – интенсивность излучения, %;  $k$  – доля энергии, %.

Оценку дозовых нагрузок будем проводить по значениям для двух групп линий:

$$\begin{aligned} Em &= 1,41 \text{ МэВ}, \\ Ecc &= 0,566 \text{ МэВ}, \\ kc &= 100 \%, \\ nc &= 200 \% \text{ или } N = 2, \end{aligned}$$

где  $Ecc$  – средняя энергия нескольких групп линий.

Пробег электронов в биологической ткани плотностью  $1 \text{ г/см}^3$  можно оценить по величине  $0,15 \text{ МэВ} < Ecc < 0,8 \text{ МэВ}$  [9]:

$$R = \rho \cdot 0,407 \cdot Ecc^{1,38} = 0,19 \text{ см}. \quad (15)$$

Так как пробег электронов в скорлупе для энергии  $Ecc$  намного превышает толщину скорлупы, можно вычислить ее поверхностную активность как

$$a = \frac{A}{S}. \quad (16)$$

По данным [10], пробег  $R$  в костной ткани электронов со средней энергией  $0,196 \text{ МэВ}$  составляет  $0,8 \text{ мм}$ . Так как для больших энергий пробег больше, получаем  $R_{\text{скорл}} \gg \max(l) = 0,16 \text{ мм}$  для мелких птиц и  $0,31 \text{ мм}$  для более

крупных, т.е. можно считать, что вся активность сконцентрирована на внутренней поверхности скорлупы и  $i = 1$ .

Заметим, что  $R \ll l$ , где  $l$  – линейный размер рассматриваемых поверхностей, что позволяет рассматривать поверхность  $SR$  как равномерно излучающий диск радиуса  $r = (R^2 - l_0^2)^{1/2}$  с поверхностной активностью  $a$ .

Плотность потока электронов на зародыш от равномерно излучающего диска определяется как

$$P = k \int_{l_0}^R \frac{\exp(-mx)}{x} dx = k2[E1(ml_0) - E1(mR)], \quad (17)$$

где  $E1(y) = \int \frac{\exp(-y)}{y}$  – интегральная показательная функция.

### Результаты расчетов и обсуждение

В таблице представлены результаты расчетов эквивалентных доз облучения для птичьих эмбрионов за первые семь суток насиживания.

Для измерения содержания  $^{90}\text{Sr}$  в скорлупе отбирались птичьи яйца с примерно равными линейными размерами и при наличии в одной точке отбора не менее 15 штук яиц.

Оценки, проведенные отдельно для двух линий  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Y}$ , дают близкие значения (расхождение в пределах 15 - 20 %).

При расчетах принималось: если расстояние от скорлупы до эмбриона превышает средний пробег электрона, то доза облучения является пренебрежимо малой.

Как видно из полученных данных, содержание  $^{90}\text{Sr}$  в скорлупе и, соответственно, значения эквивалентных доз облучения эмбрионов существенно разнятся в зависимости как от точки пробоотбора, так и вида птиц. Максимальная доза облучения была получена для эмбрионов мухоловки-пеструшки из с. Изумрудное –  $3,96 \text{ мЗв}$  за первые семь суток насиживания. Минимальная доза облучения  $0,02 \text{ мЗв}$  была отмечена у эмбрионов воробья полевого из с. Изумрудное.

Естественно, что с ростом эмбриона и занятием им всего объема яйца картина облучения существенно изменится. В то же время именно облучение на ранних стадиях эмбриогенеза приводит к его угнетению и, как следствие, появлению значительного числа «болтунов», на что указывалось разными авторами [1 - 5].

В заключение отметим, что разработанная нами модель позволяет учитывать два существ-

венных момента: первый – возможность расчета эквивалентной дозы на эмбрион по остаткам скорлупы, т.е. без изъятия яиц из гнезда; второй – определение дозы осуществляется только от

поверхности яйца, расположенной в непосредственной близости от эмбриона с учетом поглощения электронов толщиной белка и желтка.

**Эквивалентная доза облучения зародышей птиц за семь суток насиживания**

Место отбора	Вид	Поверхностная активность скорлупы, Бк/см <sup>2</sup>	Эквивалентная доза, Зв, 10 <sup>-5</sup>
Новошепелическое лесничество	мухоловка-пеструшка	6,77	17,192
	мухоловка-пеструшка	3,59	9,085
	мухоловка серая	34,74	88,488
	лазоревка	15,02	142,851
	лазоревка	7,51	71,426
	синица большая	11,62	29,450
	синица большая	2,55	6,311
	синица большая	23,53	59,74
	синица большая	6,07	15,426
	синица большая	2,48	6,311
	синица большая	2,66	6,731
	синица большая	2,15	5,469
	синица большая	3,55	18,975
	синица большая	1,89	4,768
	синица большая	3,89	12,845
с. Изумрудное	мухоловка-пеструшка	41,59	395,66
	мухоловка серая	22,83	57,952
	мухоловка серая	44,18	112,124
	мухоловка серая	19,35	49,133
	лазоревка	2,96	7,999
	синица большая	17,50	44,457
	синица большая	3,96	10,003
	синица большая	12,58	311,953
	синица большая	7,88	20,006
	синица большая	3,29	8,336
	синица большая	11,84	30,008
	воробей полевой	6,48	16,388
	воробей полевой	0,78	1,967

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Габер Н.А., Галинская И.А.* Результаты орнитологических исследований в 30-километровой зоне ЧАЭС // Доклады АН Украины.- 1993. - № 1. - С. 123 - 127.
2. *Микитюк А.Ю.* Изменение водно-болотных орнитокомплексов Киевского Полесья в результате появления радиационного фактора // Тез. докл. I Междунар. конф. "Биологические и радиэкологические аспекты последствий аварии на ЧАЭС". - М.: Наука, 1990. - 70 с.
3. *Микитюк А.Ю.* Успех воспроизводства популяций птиц в водно-болотных экосистемах радиохимически загрязненных ландшафтов // Тез. докл. II съезда радиобиологов. - К., 1993. - Т. 2. - С. 686 - 687.
4. *Микитюк А.Ю.* Изменение состояния водно-болотных комплексов в 30-километровой зоне отчуждения Чернобыльской АЭС за период 1986 - 1992 гг. // Эколого-фаунистические исследования в зоне Чернобыльской АЭС. - К.: Медицина и экология, 1995. - С. 36 - 46.
5. *Гайченко В.А.* Радіобіологічні наслідки аварії на ЧАЕС в популяціях диких тварин зони відчуження: Автореф. дис.... докт. біол. наук. - К., 1996. - 48 с.
6. *Гайченко В.А., Коваль Г.Н., Семенюк Н.И., Габер Н.А.* Формирование дозовых нагрузок на эмбрион птицы в условиях радиоактивного загрязнения // Тез. докл. II съезда радиобиологов. - К., 1993. - Т. 1. - С. 201.
7. *Немец О.Ф., Гофман Ю.В.* Справочник по ядерной физике. - К.: Наук. думка, 1975. - 415 с.
8. *Машикович В.П.* Защита от ионизирующих излучений: Справ. - М.: Энергоатомиздат, 1982. - 296 с.
9. *Иванов В.И., Машикович В.П.* Сборник задач по дозиметрии и защите от ионизирующих излучений. - М.: Атомиздат, 1980. - 248 с.
10. *Голутвина М.М., Абрамов Ю.В.* Контроль за поступлением радиоактивных веществ в организм человека и их содержанием. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 176 с.

**МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ДОЗИ ОПРОМІНЕННЯ ЕМБРІОНІВ ПТАХІВ  
НА РАННІХ СТАДІЯХ ЕМБРІОГЕНЕЗУ В УМОВАХ ПОСТІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ  $^{90}\text{Sr}$**

**В. А. Гайченко, О. В. Сваричевська, Н. І. Семенюк**

Обґрунтовується можливість оцінки еквівалентної дози опромінення зародків птахів на ранніх стадіях ембріогенезу (стадія диска) за рахунок  $^{90}\text{Sr}$ , що міститься в шкаралупі пташиних яєць, в умовах постійного опромінення з урахуванням особливостей положення ембріона в яйці в цей період.

**CALCULATION MODEL FOR THE EQUIVALENT DOSE OF THE BIRD'S EMBRYO  
AT THE EARLY EMBRYOGENESIS STAGES BY THE CONSTANT  $^{90}\text{Sr}$  RADIATION**

**V. A. Gaytchenko, E. V. Svarichevskaya, N. I. Semenyuk**

Possibility of the equivalent dose estimation of the bird's embryo basis at the early embryogenesis stages (stage of the disk) by  $^{90}\text{Sr}$  that incorporated in the bird's egg-shell by the constant radiation with taking into consideration of the especial features of the embryo's position in the egg at that time.

Поступила в редакцію 02.10.07,  
после доработки – 02.11.07.