

УДК 535.231.16:546.36*137:599.735.34(476.2)

Динамика поглощенной дозы внутреннего облучения мышечной ткани дикого кабана от ^{137}Cs , обитающего в условиях Полесского радиационно-экологического заповедника

А.В. ГУЛАКОВ, Д.Н. ДРОЗДОВ

Вне зависимости от уровня радиоактивного загрязнения территории наблюдается высокая вариация поглощенной дозы внутреннего облучения диких животных, которая сохраняется в отдаленный период аварии на ЧАЭС. Мощности поглощенной дозы ^{137}Cs в мышечной ткани диких кабанов, обитающих на территориях зоны отчуждения, достоверно отличаются от доз облучения животных зоны отселения и контрольного района. Увеличение плотности загрязнения территории ^{137}Cs ведет к нелинейному росту поглощенной дозы. Наблюдаются периодические колебания дозовых величин, выходящих за предел скрининговых показателей ($7 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$ Гр/сут).

Ключевые слова: дикий кабан, мощность дозы, цезий-137, мышечная ткань.

Regardless of the level of radioactive contamination of the territory, there is a high variation in the absorbed dose of the internal exposure of wild animals, which remains in the remote period of the Chernobyl accident. The absorbed dose rates of ^{137}Cs in the muscle tissue of wild boars inhabiting the territories of the exclusion zone differ significantly from the radiation doses of animals from the resettlement zone and the control region. An increase in the pollution density of the ^{137}Cs territory leads to a nonlinear increase in the absorbed dose. There are periodic fluctuations in dose values, that go beyond the screening parameters ($7 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$ Gy/day).

Keyword: wild boar, dose rate, cesium 137, muscle tissue.

Введение. Радиоактивное загрязнение и миграция источников ионизирующего излучения является одним из наиболее сложно устранимых экологических факторов, которые оказывают негативное воздействие на биоту территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Основными источниками радиоактивного загрязнения являются радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr . Представители фауны, обитающие на загрязненных чернобыльскими радионуклидами территориях, подвергаются хроническому внешнему и внутреннему облучению. Формирование дозы облучения в органах и тканях обуславливает возникновение радиобиологических эффектов, которые могут быть оценены с помощью поглощенной дозы на единицу времени [1]–[3].

Между процессами формирования дозы внешнего и внутреннего облучения существуют значимые различия [4]. Для процессов формирования дозы внутреннего облучения важными являются процессы поступления, накопления и распределения радионуклидов по органам и тканям. Эти процессы зависят от физиологических особенностей животного организма, поэтому вопрос о формировании доз внутреннего облучения имеет не только физическое, но биологическое содержание. В результате поступления и накопления радионуклидов в организм животных формируются достаточно высокие дозы внутреннего облучения. Среди наземных позвоночных животных максимальные активности радионуклидов ^{137}Cs регистрируют в организме дикого кабана [5]. Показатели радиоактивности в мышечной ткани этих животных варьируют в широких пределах от $1,0 \cdot 10^2$ Бк/кг до $6,6 \cdot 10^5$ Бк/кг [5].

Дикий кабан (*Sus scrofa* L.) населяет разные биотопы, предпочитает широколиственный лес с заболоченными участками или участки с зарослями кустарников по берегам водоемов. Зимой собирается в ельниках и на непромерзающих болотах. Животные держатся группами по 6–16 особей, за исключением взрослых самцов и самок с сеголетками. Во время гона и на жировке размеры стада увеличиваются. Размеры участка обитания у одиночных самцов достигают летом 10 км^2 , а зимой сокращаются до $0,5-2,5 \text{ км}^2$. В неурожайные годы мигрируют на расстояние 100–200 км. Животные всеядны, преимущественно растительноядные. В структуру питания входят орехи, желуди, семена, опавшие плоды диких яблонь, груш,

наземные и подземные части растений. Охотно поедают дождевых червей, моллюсков, насекомых и их личинок, мышевидных грызунов. В поисках пищи разрывают почву и лесную подстилку на больших участках [6].

Результаты наблюдений, проводимые в рамках радиоэкологического мониторинга территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь, показывают, что накопление ^{137}Cs в мышечной ткани диких животных связано с радиоактивным загрязнением кормовой базы. В зависимости от сезона состав кормовой базы существенно изменяться – в составе зимнего рациона дикого кабана преобладают подземные части растений (корневища, клубни) и листовая опад, в летнем рационе – осока, крапива, гравилат, калужница, иван-чай, плоды зерновых злаков, фруктовых деревьев, желуди, ягоды и орехи. Кроме того, в состав летнего рациона также входят насекомые, черви, рыба, мелкие позвоночные (мыши, крысы). В весенне-летний период кабаны потребляют до 6–8 кг пищи в сутки, в неурожайные годы обгладывают кору деревьев, питаются грибами и падалью.

Из приведенных данных видно, что экология и структура питания дикого кабана тесно связаны с нижним ярусом фито-, и зооценоза, кроме того, животные могут использовать представителей ихтиофауны, в которой накапливается наибольшая удельная активность радионуклидов. Рассматривая возможность пребывания поголовья дикого кабана в границах зоны отчуждения и широкий ареал обитания, можно сделать вывод о том, что дикий кабан является активным аккумулятором и источником миграции чернобыльских радионуклидов на территории Европы. Из чего следует закономерный вопрос о том, какие дозы облучения формируются у дикого кабана, и какие возможные дозовые эффекты могут при этом возникать.

Цель работы: оценить динамику мощности поглощенной дозы внутреннего облучения от инкорпорированного в мышечной ткани дикого кабана ^{137}Cs , обитающего в условиях Полесского радиационно-экологического заповедника.

Объект и методы исследования. Для достижения цели использованы данные многолетних исследований содержания ^{137}Cs в органах и тканях дикого кабана. Данные получены в наиболее загрязненных чернобыльскими радионуклидами участках, расположенных в зоне отчуждения аварийного выброса ЧАЭС в районе дд. Борщевка, Молочки, Погонное, Радин, Аревичи, Дроньки Хойникского района Гомельской области, уровень загрязнения территории ^{137}Cs составлял 1100–8184 кБк/м². Территория исследования расположена в междуречье рек Припять и Днепр на расстоянии 10–35 км от Чернобыльской АЭС. Наряду с зоной отчуждения отбор проб также проводился на территории зоны отселения Брагинского района Гомельской области в окрестностях деревень Савичи, Пучин, Жердное. Плотность поверхностного загрязнения (ППЗ) участка по ^{137}Cs находилась в пределах 185–1480 кБк/м². Район, в основном, с низким и плоским рельефом, с конечноморенными грядами, террасами и равнинами. Он расположен в междуречье рек Припять и Днепр на расстоянии 30–35 км от ЧАЭС. Контрольным районом служила территория Гомельского района Гомельской области, расположенная вблизи деревни Кравцовка, на границе с Черниговской областью Украины, на притоке реки Днепр (р. Сож). Данная местность находится на расстоянии 40 км от г. Гомеля и около 100 км от Чернобыльской АЭС. Уровень загрязнения территории ^{137}Cs составлял 18,5–37,0 кБк/м² и ^{90}Sr – 1,0–1,85 кБк/м².

Объектом исследований являлся дикий кабан (*Sus scrofa* L.), обитающий на территории с различной плотностью радиоактивного загрязнения. Все пробы взяты от 117 голов дикого кабана, среди которых 54 животных изъяты из зоны отчуждения, 30 – из зоны отселения и 33 – из контрольного района. От каждого животного отбирались пробы мышечной ткани массой 0,1–0,5 кг. Данные удельной активности мышечной ткани дикого кабана от ^{137}Cs использовали для оценки мощности поглощенной дозы внутреннего облучения. В ходе оценки поглощенной дозы внутреннего облучения допускали, что в организме радионуклид находится в условиях равновесия и его концентрация в органах и тканях постоянная на протяжении года. Расчет мощности поглощенной дозы внутреннего облучения от ^{137}Cs проводили по формуле (1):

$$D(t) = A \times K, \quad (1)$$

где $P(t)$ – мощность поглощенной дозы, мкГр/сутки; A – удельная активность ^{137}Cs в мышечной ткани, Бк/кг; K – дозовый коэффициент, равный мощности дозы, создаваемой 1 Бк/кг ^{137}Cs , составляет $6,65 \times 10^{-3}$ мкГр/сутки [7].

При выборе коэффициентов дозового преобразования для внутреннего облучения животных исходили из того, что формирование дозы облучения не зависит от видовой принадлежности, а зависит только от уровня накопленной животным удельной активности.

Результаты и их обсуждение. На основании проведенных дозиметрических расчетов получены средние значения мощности поглощенной дозы от инкорпорированного в мышечной ткани дикого кабана ^{137}Cs для трех пробных участков ПГРЭЗ – зоны отчуждения (ППЗ > 555 кБк/м²), зоны отселения (ППЗ от 185 до 555 кБк/м²) и контрольного района (ППЗ < 37,0 кБк/м²). Оцененные значения средней мощности поглощенной дозы и границы варьирования ее величины представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Мощности поглощенной дозы внутреннего облучения дикого кабана

Год	Контроль		Отселение		Отчуждение	
	мкГр/сут	Гр/сут	мкГр/сут	Гр/сут	мкГр/сут	Гр/сут
1991	2,79 ± 0,80 (49 %*)	3E-06	9,58 ± 1,73 (26 %)	1E-05	79,53 ± 6,38 (14 %)	8E-05
1992	–	–	64,31 ± 1,45 (40 %)	6E-05	228,96 ± 11,40 (10 %)	2E-04
1993	3,26 ± 0,93 (49 %)	3E-06	14,96 ± 2,00 (23 %)	1E-05	125,42 ± 28,73 (69 %)	1E-04
1994	–	–	62,24 ± 3,48 (11 %)	6E-05	688,74 ± 40,83 (15 %)	7E-04
1995	2,66 ± 0,53 (28 %)	3E-06	71,42 ± 3,19 (10 %)	7E-05	263,34 ± 14,83 (8 %)	3E-04
1996	4,46 ± 2,89 (112 %)	4E-06	217,79 ± 5,65 (8 %)	2E-04	1615,29 ± 139,38 (15 %)	2E-03
1997	1,73 ± 0,73 (60 %)	2E-06	121,43 ± 4,75 (9 %)	1E-04	346,27 ± 209,48 (105 %)	3E-04
1998	5,65 ± 2,00 (86 %)	6E-06	40,23 ± 2,33 (12 %)	4E-05	66,43 ± 12,97 (34 %)	7E-05
1999	3,86 ± 2,66 (154 %)	4E-06	37,57 ± 1,43 (5 %)	4E-05	1103,17 ± 93,90 (17 %)	1E-03
2000	2,39 ± 0,90 (75 %)	2E-06	12,37 ± 5,79 (94 %)	1E-05	68,50 ± 17,96 (45 %)	7E-05
2001	–	–	–	–	45,15 ± 13,97 (44 %)	5E-05
2002	–	–	–	–	36,44 ± 12,40 (90 %)	4E-05
2003	2,46 ± 1,13 (65 %)	2E-06	4,19 ± 1,63 (67 %)	4E-06	94,66 ± 26,53 (68 %)	9E-05
2004	-	-	-	-	343,14 ± 22,88 (15 %)	3E-04
2005	-	-	-	-	137,39 ± 11,84 (31 %)	1E-04
2006	-	-	-	-	199,63 ± 11,84 (17 %)	2E-04
2007	-	-	-	-	222,44 ± 49,88 (100 %)	2E-04
2008	-	-	-	-	243,32 ± 14,76 (19 %)	2E-04

* – коэффициент вариации

Из данных, представленных в таблице 1, видно, что между территориями с разным уровнем ППЗ ^{137}Cs наблюдается достоверное различие мощности поглощенной дозы, достоверная вероятность различия не превысила уровень значимости 0,05. Средние значения мощности поглощенной дозы у животных, отловленных в контрольном районе, составили 3,25 ± 1,40 мкГр/сут, в зоне отселения – 59,64 ± 3,04 мкГр/сут, в зоне отчуждения 328,23 ± 41,11 мкГр/сут. Методом корреляционного анализа установлено, что увеличение ППЗ ведет к нелинейному росту удельной активности ^{137}Cs и мощности поглощенной дозы. На рисунке 1 представлены две динамические модели: 1) удельной активности ^{137}Cs в мышечной ткани животного и 2) мощности поглощенной дозы от ППЗ. Из рисунка 1 видно, что с увеличением ППЗ мощность поглощенной дозы растет пропорционально росту удельной активности.

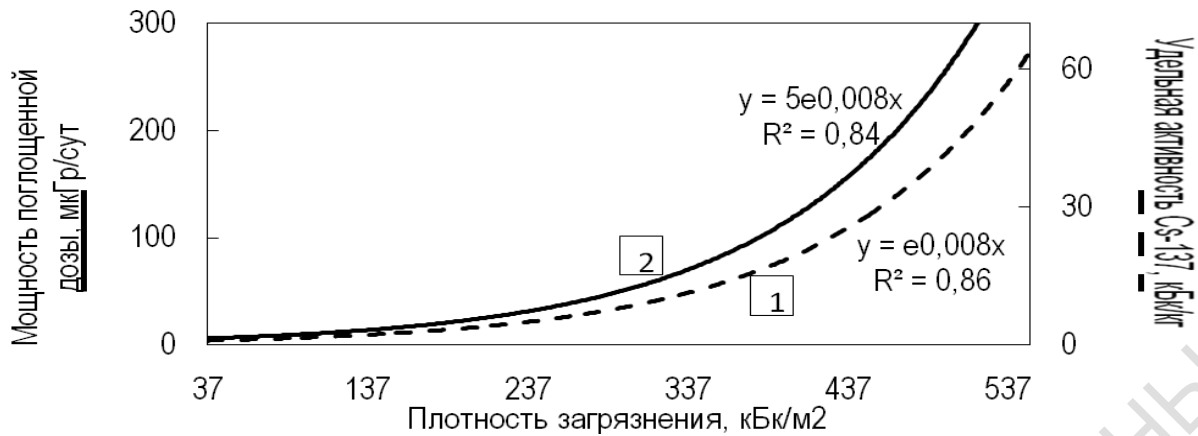


Рисунок 1 – Удельная активность и мощность поглощенной дозы от ^{137}Cs мышечной ткани дикого кабана

Отдельный интерес вызывает вариация мощности поглощенной дозы на территориях с разным уровнем ППЗ. Из таблицы 1 видно, что в течение всего периода наблюдения не было получено однородной выборки в отношении как удельной активности ^{137}Cs , так и оцененной мощности поглощенной дозы. В контрольном районе среднее значение коэффициента вариации составило 37 %, разброс значений – от 49 % (1991–92 гг.) до 154 % (1999 г.), в зоне отселения – 106 %, разброс – от 5 % (1999 г.) до 94 % (2000 г.), в зоне отчуждения – 127 %, разброс – от 8 % (1995 г.) до 105 % (1997 г.). Можно предположить, что вариация мощности поглощенной дозы в большей степени связана не с фактором плотности загрязнения почвы, а с миграцией и возможностью поступления ^{137}Cs в организм животных. В данном случае ППЗ влияет на уровень мощности поглощенной дозы, а не ее вариацию – методом ANOVA анализа установлено, что сила влияния фактора ППЗ на величину мощности поглощенной дозы оценивается в 22 % ($p = 0,01$).

Экологический принцип толерантности распространяется на пределы приемлемых дозовых нагрузок, границы которых обеспечивают выживание количества особей достаточного для того, чтобы поддерживать необходимую для воспроизведения численность популяции. Диапазон толерантности радиационного фактора установлен в работе [8] и реализован в рамках европейского проекта PROTECT. В результате исследования [9]–[11] методом построения «распределения чувствительности видов» (*species sensitivity distribution*) установлена и оценена величины безопасного порога облучения биоты. Для животных нижняя граница облучения определена на уровне 10 мкГр/ч, или $2,4 \cdot 10^{-4}$ Гр/сут – это скрининговая величина, предназначенная для первичной оценки безопасности биоты. В случае, если нижняя граница облучения не превышает скринингового уровня, ситуацию можно считать безопасной [9].

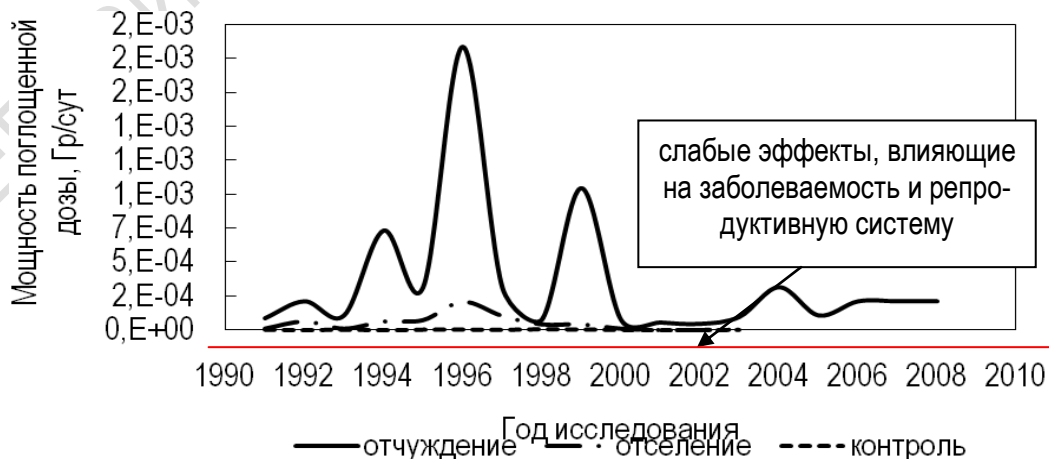


Рисунок 2 – Динамика мощности поглощенной дозы внутреннего облучения от ^{137}Cs инкорпорированного в мышечной ткани дикого кабана

Предложенный критерий использован нами для оценки возможных радиационных эффектов для случаев хронического облучения дикого кабана. В результате анализа временной динамики мощности поглощенной дозы внутреннего облучения было установлено, что в зоне отчуждения в течение 15 лет после аварии сохранялась высокая вероятность слабых эффектов, влияющих на заболеваемость и репродуктивную систему дикого кабана (более 50 %). В последующий период среди особей имело место увеличение вероятности цитогенетических эффектов (около 30 %). В зоне отселения и контрольном районе не установлено превышения скрининговой величины.

Общая для разных территорий динамика мощности поглощенной дозы представлена на рисунке 2, где видно, что в зоне отчуждения на протяжении 20 лет после аварии сохранялась выраженная флуктуация поглощенной дозы, выходящая за границу предела скрининговой величины. Максимальное значение поглощенной дозы в зоне отчуждения наблюдалось в 1996 г. и составило $1615,29 \pm 139,38$ мкГр/сут, новый всплеск произошел в 1999 г. – $1103,17 \pm 93,90$ мкГр/сут, после чего наблюдалось более чем 15-ти кратное падение мощности дозы до значений, характерных для зоны отселения $68,50 \pm 17,96$ мкГр/сут. Последний участок флуктуации наблюдался в зоне отчуждения в 2004 г. – $343,14 \pm 22,88$ мкГр/сут, после чего значения мощности поглощенной дозы внутреннего облучения не превышали предел скрининговой величины.

Таким образом, наиболее интенсивное влияние аккумулированной в мышечной ткани ^{137}Cs оказывал на частоту цитогенетических изменений, заболеваемость и репродуктивную систему диких кабанов в период с 1994 по 1999 гг. в зоне отчуждения. В этот период происходило волнообразное увеличение поглощенной дозы облучения – периоды подъема приходятся на 1994, 1996, 1999 гг., спад – на 1995, 1998, 2000 гг. Циклическую динамику поглощенной дозы, по-видимому, можно объяснить характером кормовой базы, изучение которой на тот период времени можно рассматривать как самостоятельную научную задачу.

Заключение. Таким образом, для диких кабанов, обитающих на территории Полесского радиационно-экологического заповедника, отмечается высокая вариация поглощенной дозы внутреннего облучения. Мощности поглощенной дозы ^{137}Cs в мышечной ткани диких кабанов, обитающих на территориях зоны отчуждения, достоверно отличаются от доз облучения животных зоны отселения и контрольного района. Увеличение плотности загрязнения территории ^{137}Cs ведет к нелинейному росту поглощенной дозы.

Наблюдаются периодические колебания дозовых величин, выходящих за предел скрининговых показателей ($7 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$ Гр/сут). Наиболее интенсивная аккумуляция ^{137}Cs приходится на 1994, 1996, 1999 гг., когда доза облучения у диких кабанов, превысила предел скрининговой величины в 2–6 раз. Последний всплеск мощности поглощенной дозы регистрировался в 2004 г., когда показатель превысил скрининговый порог на 40 %. Для зоны отселения и контрольного района превышение скрининговой величины не установлено за весь период наблюдения. Однако на этой территории на протяжении всего периода наблюдения сохранилась высокая аккумуляция радионуклида в мышечной ткани диких кабанов, которые могут представлять опасность в качестве источника миграции радионуклидов ^{137}Cs .

Литература

1. Корнеев, Н.А. Основы радиоэкологии сельскохозяйственных животных / Н.А. Корнеев, А.Н. Сироткин. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 208 с.
2. Карабанов, А.К. Радон и дочерние продукты распада в воздухе зданий на территории Беларуси / А.К. Карабанов [и др.] // Природопользование. – 2015. – Вып. 27. – С. 49–53.
3. Сельскохозяйственная радиоэкология / Р.М. Алексахин [и др.] ; под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. – М. : Экология, 1991. – 400 с.
4. Рожко, А.В. СИЧ-ориентированный метод оценки годовых доз внутреннего облучения населения в отдаленный период чернобыльской аварии / А.В. Рожко [и др.] // Радиация и Риск. – 2009. – Т. 18, № 2. – С. 48–60.
5. Gulakov, A.V. Accumulation and distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the body of the wild boar (*Sus scrofa*) found on the territory with radioactive contamination / A.V. Gulakov // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – Vol. 127. – P. 171–175.

6. Фауна Беларуси. Позвоночные [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://gurkov2n.jimdo.com>. – Дата доступа : 17.09.2019.
7. Спирин, Е.В. Метод расчета доз облучения животных для оценки последствий загрязнения окружающей среды / Е.В. Спирин // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2009. – Т. 49, № 5. – С. 608–616.
8. Planel, H. Paramecium aurelia as a cellular model used for studies of the biological effects of natural ionizing radiation / H. Planel [et al.] // Methodology for assessing impacts of radioactivity on aquatic ecosystems. IAEA Tech. rep. ser. № 190. – Vienna : IAEA, 1979. – P. 335–346.
9. Andersson, P. Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations / P. Andersson [et al.] // PROTECT Deliverable 5. EC contract number: 036425 (FI6R). – 2008. – 112 p.
10. Крышев, И.И. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учётом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 / И.И. Крышев, Т.Г. Сазыкина // Радиация и риск. – 2013. – Т. 22. № 1. – С. 47–61.
11. Effects of ionizing radiation / United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation // UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes – New York : United Nations, 2009. – Vol. II Scientific Annexes C, D and E. – 81 p.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 27.09.2019