

УДК 535.231.16:599(476.2)

## Динамика мощности поглощенной дозы внутреннего облучения крупных млекопитающих, обитающих на территории радиоактивного загрязнения

А.В. Гулаков, Д.Н. Дроздов

Вне зависимости от уровня радиоактивного загрязнения территории местообитания наблюдается высокая вариация поглощенной дозы внутреннего облучения диких животных, которая сохраняется в отдаленный период после аварии на ЧАЭС. Мощности поглощенной дозы внутреннего облучения крупных млекопитающих, обитающих на стационарах с разной плотностью радиоактивного загрязнения, имеют достоверные различия. Сравнительный анализ доз облучения видов, рекомендованных ICRP в качестве референтных, показал, что уровень мощности поглощенной дозы внутреннего облучения за весь период наблюдений либо не превышает производный референтный уровень, либо имеются единичные случаи превышения.

**Ключевые слова:** дикие млекопитающие, мощность дозы, цезий-137, мышечная ткань.

Regardless of the level of radioactive contamination of the habitat, there is a high variation in the absorbed dose of internal irradiation of wild animals, which persists in the remote period after the Chernobyl accident. The rates of the absorbed dose of internal irradiation of large mammals living in permanent study area with different density of radioactive contamination have significant differences. Comparative analysis of radiation doses of the types recommended by ICRP as a reference showed that the level of the absorbed dose of internal radiation for the entire observation period either does not exceed the derived reference level, or there are isolated cases of excess.

**Keyword:** wild mammals, dose rate, cesium-137, muscle tissue.

**Введение.** В 108 публикациях МКРЗ декларировано о том, что современная концепция радиационной защиты не может ограничиваться только безопасностью человека, в ней должна быть учтена возможность перехода от антропоцентрического к экоцентрическому подходу [1]. Положения этой концепции аргументированы в научных работах F. Brechignas, D. Delistraty, R.J. Pentreath, P.M. Алексахин, С.В. Фесенко и др. [2]–[9]. В соответствии с экоцентрическим подходом радиологические эффекты у биоты могут возникать из-за путей облучения, не имеющих аналогов для человека. При этом радиационная защита биоты, как и защита человека, строится на требовании соблюдения референтного и предельного уровня дозы облучения. Этот уровень устанавливается по ожидаемому отрицательному эффекту или затратам, которые потребуются на проведение защитных мероприятий [10]. В рамках концепции радиационной защиты в отношении биоты предложена репрезентативная выборка из 12 животных и растений (RAPs). Референтная группа составлена на основании общности таксона «семейство», где уровень радиобиологического отклика можно считать относительно постоянным. Для RAPs группы предложены референтные уровни (DCRLs) – диапазоны мощностей поглощенной дозы, в пределах которых существует вероятность вредных эффектов от ионизирующего излучения. DCRLs используются для оценки затрат на защиту окружающей среды в разных ситуациях облучения (планируемого, аварийного, существующего) [11]. Выбор референтных организмов основан на ряде критериев: положение в экосистеме, доступность для мониторинга, радиочувствительность. В настоящее время среди референтных организмов крупные наземные млекопитающие представлены только семейством *Cervidae* и видами *Alces alces*, *Capreolus capreolus*, *Cervus elaphans*, *Odocoileus hemionus*, *Odocoileus virgiannus*.

В докладе ICRP (Carl-Magnus Larsson, Seoul, 2015) для семейства *Cervidae* диапазоны мощностей поглощенной дозы, в пределах которых существует вероятность вредных эффектов, определены в интервале 0,1–1 мГр/сут [10]. В рамках европейского проекта PROTECT 2000–2008 гг. предложено распределение чувствительности видов и определены величины безопасного порога облучения биоты. Для крупных млекопитающих скрининговая величина,

предназначенная для первичной оценки безопасности, определена на уровне 10 мкГр/ч, или  $2,4 \cdot 10^{-4}$  Гр/сут. В случае, когда нижняя граница облучения не превышает скрининговый уровень, ситуацию можно считать безопасной [11].

Уникальной территорией для ведения многолетних наблюдений, которые будут способствовать развитию методологии радиационной безопасности в отношении биоты, является Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, занимающий 2162 км<sup>2</sup> территории Республики Беларусь. Здесь зарегистрированы 1251 вид растений, 54 вида млекопитающих (в том числе виды референтной группы *Alces alces* и *Capreolus capreolus*), 25 видов рыб, 280 видов птиц [12]. Основными источниками радиоактивного излучения являются радионуклиды <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr, поступление и накопление которых в организме животных в естественной среде происходит без каких-либо ограничений и может влиять на формирование доз облучения выше предельного уровня. Среди крупных наземных позвоночных, обитающих в границах ППРЭЗ, следует указать вид *Sus scrofa*, уровень удельной активности <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr и ее динамика в организме которого отличается значительной вариабельностью – от  $1,0 \cdot 10^2$  Бк/кг до  $6,6 \cdot 10^5$  Бк/кг [13]. В отношении референтных видов *Alces alces* и *Capreolus capreolus*, а также вида *Sus scrofa* накоплен массив данных, позволяющий провести сравнительный анализ динамики мощности поглощенной дозы внутреннего облучения.

В данной связи цель работы состоит в том, чтобы оценить динамику и уровень мощности поглощенной дозы внутреннего облучения крупных млекопитающих в постчернобыльский период на основании данных удельной активности мышечной ткани в результате хронического поступления в организм <sup>137</sup>Cs.

**Объект и методы исследований.** Оценка мощности поглощенной дозы проводили в отношении инкорпорированного <sup>137</sup>Cs в мышечной ткани крупных млекопитающих, обитающих на территории Полесского радиационно-экологического заповедника. Отбор проб осуществлялся на территории Хойникского, Брагинского и Гомельского районов. Места отбора проб охватили три участка, границы которых находятся в зоне отчуждения (более 555 кБк/м<sup>2</sup>), зоне отселения (185–555 кБк/м<sup>2</sup>) и на территории с плотностью загрязнения менее 37,0 кБк/м<sup>2</sup>. Большая часть территории зоны отчуждения и отселения, где производился отбор проб, занята лесными массивами и расположены вблизи населенных пунктов: д. Аревичи, д. Борщевка, д. Дроньки, д. Молочки, д. Погонное, д. Оревичи в Хойникском районе, д. Жердное, д. Пучин, д. Савичи, д. Шейка Брагинского района. Территория пробоотбора расположена в междуречье рек Припять и Днепр на расстоянии 10–35 км от Чернобыльской АЭС (рисунок 1).

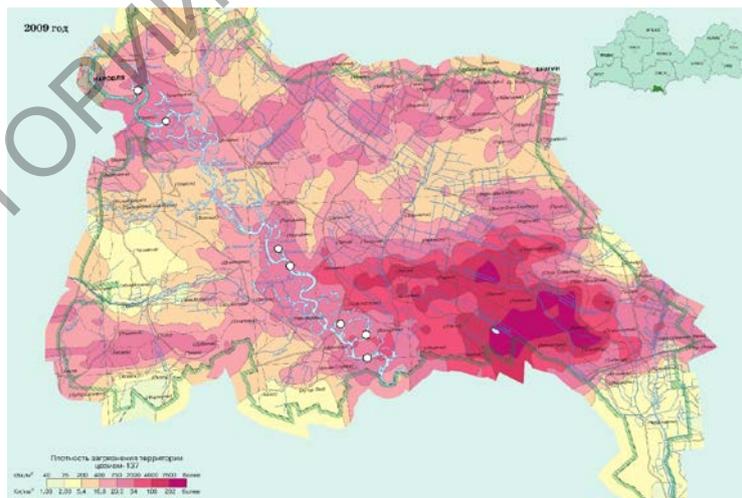


Рисунок 1 – Радиационный режим территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

В качестве контроля использовались данные полученные на участках лесных массивов вблизи д. Васильево, д. Долголесье, д. Кравцовка, д. Прибор в Гомельском районе. Контрольный участок расположен в бассейне реки Днепр и его правого притока р. Сож в 100 км от Чернобыльской АЭС.

Для проведения оценки радиационного режима территории пробоотбора использовались данные плотности поверхностного загрязнения территории  $^{137}\text{Cs}$  на момент 1992–2009 гг. и год отбора проб. Данные приведены согласно Каталогу доз облучения жителей Республики Беларусь. Средняя плотность загрязнения территории  $^{137}\text{Cs}$  на контрольном участке на год отбора пробы составила  $45 \pm 10$  кБк/м<sup>2</sup>, на участке зоны отселения –  $440 \pm 70$  кБк/м<sup>2</sup>, на участке зоны отчуждения –  $1790 \pm 200$  кБк/м<sup>2</sup>.

Отбор проб и измерение удельной активности проводился в период 1991–2008 гг., в результате получены данные 141 особи *C. capreolus*, 93 особи изъяты на территории зоны отчуждения, 27 – зоны отселения, 21 – на контрольном участке; 117 особей *S. scrofa*, 54 особи были добыты на территории зоны отчуждения, 30 – зоны отселения, 33 – контрольном участке; 103 особи *A. alces*, 66 животных были отстреляны в зоне отчуждения, 28 особей – в зоне отселения и 9 особей – на контрольном участке. От туши брали точечные пробы мышечной ткани по  $500 \pm 50$  грамм, содержание  $^{137}\text{Cs}$  в пробах определялось на сырую, естественную массу.

Измерения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  проводили на  $\gamma$ - $\beta$ -спектрометре МКС-АТ1315 (минимальная измеряемая активность  $\geq 2$  Бк/кг в геометрии 0,5 л (Маринелли), эффективность регистрации на энергии 661 кэВ –  $2,46 \times 10^{-2}$  имп/квант, энергетический диапазон регистрируемого  $\gamma$ -излучения 50–3000 кэВ) и  $\gamma$ -радиометре РКГ-АТ1320А, (МДА – 3,7 Бк/кг, эффективность регистрации –  $2,2 \times 10^{-2}$  импульсов/квант). Погрешность измерений не превышала 15 %, разница в показаниях приборов (спектрометра и радиометра) при повторных измерениях не превышала 4 %. При оценке активности допускали, что  $^{137}\text{Cs}$  равномерно распределен в мышечной ткани и находится в условиях равновесия, а его концентрация постоянная на протяжении года.

Мощность поглощенной дозы внутреннего облучения в теле наземных животных рассчитывалась в отношении  $\gamma$ -излучения радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ . В расчетах использовали значение коэффициента дозового перехода в зависимости от массы животного согласно [14]. Мощность поглощенной дозы внутреннего облучения от  $^{137}\text{Cs}$  рассчитывали по формуле (1):

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

где  $P(t)$  – мощность поглощенной дозы, мкГр/сутки;  $A$  – удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани, Бк/кг;  $K$  – дозовый коэффициент, равный мощности дозы, создаваемой 1 Бк/кг  $^{137}\text{Cs}$ , мкГр/сутки.

**Результаты и их обсуждение.** Референтный уровень обеспокоенности (DCRLs) или безопасный порог облучения для крупных млекопитающих равен 0,1–1 мГр/сут, скрининговая величина первичной оценки безопасности определена на уровне 10 мкГр/ч, или  $2,4 \cdot 10^{-4}$  Гр/сут. В случае если нижняя граница облучения не превышает скринингового уровня, ситуацию можно считать безопасной. В данном случае мы использовали скрининговый уровень ( $2,4 \cdot 10^{-4}$  Гр/сут), считая, что все случаи, когда значения мощности поглощенной дозы внутреннего облучения ниже этой величины, ситуация существующего облучения принимается безопасной. Все случаи превышения могут рассматриваться как потенциально опасные, в соответствии со шкалой радиационных эффектов на биоту [11]. Потенциально опасные мощности поглощенной дозы облучения имеют место преимущественно у *S. scrofa* в течение не только первых десяти лет после аварии, но и в отдаленный период. Максимальная величина мощности поглощенной дозы внутреннего облучения наблюдалась спустя десять лет после аварии и составляла  $2,0 \cdot 10^{-3}$  Гр/сут (в 8,3 раза больше скрининговой величины). В зоне отчуждения сохранялась высокая вероятность (более 50 %) эффектов влияющих на заболеваемость и репродуктивную систему дикого кабана. В зоне отселения и на контрольном участке не установлено превышения скрининговой величины. Для вида *C. capreolus* превышение скрининговой величины в течение периода наблюдения зарегистрировано только в зоне отчуждения – в 1994 г. превышение в 2,6 раза, в 2005 г. в 1,6 раза. Для вида *A. alces* за весь период наблюдения не было установлено превышения скрининговой величины ни на одном из участков наблюдения.

В результате анализа данных установлено, что на территории с разным уровнем загрязнения наблюдаются достоверные различия вариации мощности поглощенной дозы. Для вида *S. scrofa* за период наблюдения не удалось получить однородной выборки как по удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ , так и по мощности поглощенной дозы. На контрольном участке вариация в

среднем составила 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). Для вида *C. capreolus* на контрольном участке вариации в среднем составил 57 %, разброс значений – от 41 % до 87 %, в зоне отселения – 54 %, разброс значений – от 14 % (1995 г) до 117 % (1999 г), среднее значение коэффициента вариации в зоне отчуждения – 105 %, разброс значений – от 17 % (2006 г) до 194 % (1995 г). Для вида *A. alces* на контрольном участке вариация в среднем составила 89 %, в зоне отселения – 99 %, в зоне отчуждения – 105 %, максимум вариации наблюдался в 2003–2004 гг. (137–212 %).

Установлено, что между вариацией мощности поглощенной дозы и ее величиной на территориях с разной плотностью загрязнения имеет место корреляционная зависимость: чем больше плотность загрязнения территории, тем больше вариация дозы, в результате выборка становится менее однородной по дозе облучения ( $r = 0,6$ ,  $p < 0,05$ ). Согласно результатам наблюдений, эта закономерность с годами не изменяется [15].

Можно предположить, что вариация мощности поглощенной дозы в большей степени связана не с фактором плотности загрязнения почвы, а с миграцией, пищевым поведением и возможностью поступления  $^{137}\text{Cs}$  в организм животных. Методом дисперсионного анализа установлено, что плотность загрязнения составляет не более 25 % вариации мощности поглощенной дозы внутреннего облучения ( $p = 0,01$ ).

Оставшаяся доля вариации связана с пищевой специализацией животных, а также использованием в рационе аккумуляторов  $^{137}\text{Cs}$ , таких как грибы и лишайники. В особенности это характерно для вида *S. Scrofa*, экология и структура питания которого тесно связаны с нижним ярусом фито- и зооценоза, животные могут использовать также представителей ихтиофауны. Рассматривая возможность пребывания поголовья дикого кабана в границах зоны отчуждения и широкий ареал обитания, можно утверждать, что дикий кабан – это активный аккумулятор и источник миграции чернобыльских радионуклидов на территории Европы. В то же время экология и структура питания *C. capreolus* и *A. alces* в большей степени связана со средним ярусом лесного фитоценоза и ярусом травяных растений лугов и заброшенных сельхозугодий, для вида *A. alces* следует отметить связь с нижним и средним ярусом прибрежно-водного фитоценоза. На рисунке 2 представлены результаты дисперсионного анализа поглощенных доз внутреннего облучения млекопитающих разных видов, обитающих на территориях с разным радиационным режимом.

Из данных, приведенных на рисунке 2 видно, что достоверно высоким уровнем мощности поглощенной дозы отличается вид *S. scrofa*, средняя мощность дозы внутреннего облучения за период наблюдения в зоне отчуждения составила 330 мкГр/сут. Средняя мощность поглощенной дозы внутреннего облучения в зоне отчуждения вида *C. capreolus* – 136 мкГр/сут, вида *A. alces* – 60 мкГр/сут. Достоверные различия средних значений поглощенной дозы установлены только для территории зоны отчуждения ( $p < 0,05$ ), на контрольном участке и в зоне отселения не установлено достоверного различия между средними значениями доз облучения исследуемых видов.

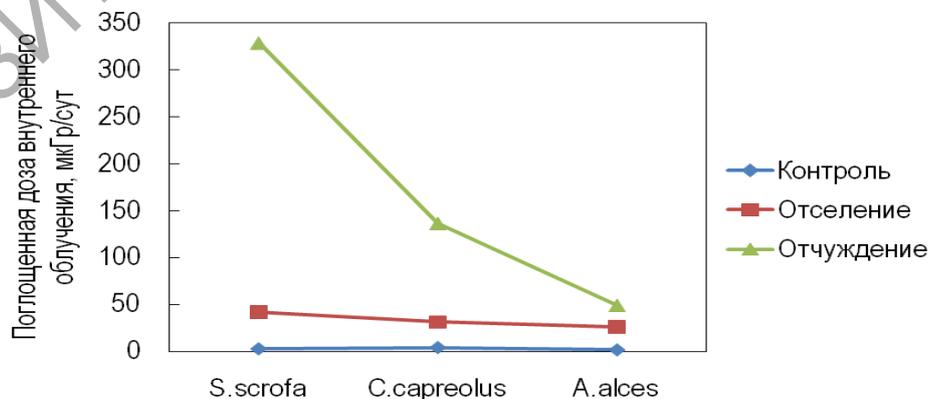


Рисунок 2 – Динамика мощности поглощенной дозы внутреннего облучения крупных млекопитающих разных видов

**Заключение.** В результате анализа данных мощности поглощенной дозы внутреннего облучения крупных млекопитающих, обитающих на стационарах с разной плотностью радиоактивного загрязнения, имеют достоверные различия.

Среднее значение мощности поглощенной дозы внутреннего облучения вида *S. scrofa* на контрольном участке составляет  $3,2 \pm 0,6$  мкГр/сут, на территории зоны отселения –  $54,9 \pm 27,9$  мкГр/сут, на территории зоны отчуждения –  $330,2 \pm 113,7$  мкГр/сут. Среднее значение мощности поглощенной дозы внутреннего облучения вида *C. capreolus* на контрольном участке составляет  $3,7 \pm 1,4$  мкГр/сут, на территории зоны отселения –  $34,5 \pm 9,6$  мкГр/сут, на территории зоны отчуждения –  $136,0 \pm 77,6$  мкГр/сут. Среднее значение мощности поглощенной дозы внутреннего облучения вида *A. alces* на контрольном участке, составляет  $2,4 \pm 0,6$  мкГр/сут, на территории зоны отселения –  $23,5 \pm 7,8$  мкГр/сут, на территории зоны отчуждения –  $60,8 \pm 9,4$  мкГр/сут.

Таким образом, анализ средних годовых поглощенных доз внутреннего облучения крупных млекопитающих, обитающих на территории ПГРЭЗ, показал, что в соответствие с современными рекомендациями радиационной защиты биоты в отдаленный период после аварии на ЧАЭС важным источником миграции и аккумуляции радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  является вид *S. scrofa*. В ходе анализа временной динамики мощности поглощенной дозы внутреннего облучения *S. scrofa* установлено, что в течение 15 лет после аварии в зоне отчуждения сохранялась высокая вероятность слабых эффектов влияющих на заболеваемость и репродуктивную систему данного вида (более 50 %).

Динамика доз облучения вида *S. scrofa* имеет нелинейную зависимость, для которой фактор радиационного загрязнения территории (плотность загрязнения) не может в полной мере объяснить вариацию величины дозы облучения. По всей видимости, определяющим фактором формирования дозы внутреннего облучения вида *S. scrofa* является фактор пищевого поведения и структура рациона животного. Сравнительный анализ доз облучения видов, рекомендованных ICRP в качестве референтных, показал, что уровень мощности поглощенной дозы внутреннего облучения за весь период наблюдений либо не превышает производный референтный уровень, либо имеются единичные случаи превышения.

## Литература

1. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants : ICRP Publication 108 // Annals of the ICRP. – 2008. – Vol. 38 (4–6). – P. 242.
2. Сельскохозяйственная радиоэкология / Р. М. Алексахин [и др.] ; под ред. Р. М. Алексахина, Н. А. Корнеева. – М. : Экология, 1991. – 400 с.
3. 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.
4. Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations / P. Andersson [et al.] // NERC/Centre for Ecology & Hydrology. – 2008. – 72 p. – (СЕН Project Number: C03182. PROTECT Project: Deliverable 5).
5. Brechignac, F. Protection of the environment: how to position radioprotection in an ecological risk assessment perspective / F. Brechignac // The Science of the Total Environment. – 2003. – № 307. – P. 35–54.
6. Delistraty, D. Radioprotection of nonhuman biota / D. Delistraty // Journal of Environmental Radioactivity. – 2008. – № 99. – P. 1863–1869.
7. Pentreath, R. J. Ethics, genetics and dynamics: an emerging systematic approach to radiation protection of the environment / R. J. Pentreath // J. Environ. Radioact. – 2004. – № 74. – P. 19–30.
8. Алексахин, Р. М. Радиационная защита окружающей среды: антропоцентрический и экоцентрический принципы / Р. М. Алексахин // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2004. – № 44 (1). – С. 93–103.
9. Савкин, М. Н. Взаимное влияние объектов живой природы и пунктов захоронения радиоактивных отходов: экологическая и техническая безопасность / М. Н. Савкин, М. В. Ведерникова, С. В. Панченко // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 3 (4). – С. 30–38.
10. Larsson, C.-M. Protection of the Environment. Activities of Committee 5 : third ICRP Symposium, Seoul, Korea, 20–22 October 2015 / C.-M. Larsson ; Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. – Korea, 2015. – 18 p.

11. 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.

12. Воронецкий, Н. Н. Численность и биотопическое распределение диких животных в Полесском радиационно-экологическом заповеднике / Н. Н. Воронецкий [и др.] // Биологическое разнообразие Национального парка «Припятский» и других особо охраняемых природных территорий : сб. науч. трудов, посвящен. 30-летию Национального парка «Припятский» (1969–1999) / Национальный парк «Припятский» ; редкол.: А. В. Углянец (сост. и отв. за вып.). – Туров–Мозырь, 1999. – С. 312–315.

13. Гулаков, А. В. Динамика поглощенной дозы внутреннего облучения мышечной ткани дикого кабана от  $^{137}\text{Cs}$ , обитающего в условиях Полесского радиационно-экологического заповедника / А. В. Гулаков, Д. Н. Дроздов // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2019. – № 3 (108). – С. 29–34.

14. 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.

15. Гулаков, А. В. Мощность дозы внутреннего облучения от инкорпорированного  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани европейской косули, обитающей на территории радиоактивного загрязнения / А. В. Гулаков, Д. Н. Дроздов // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2019. – № 4. – С. 55–61.

Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 04.01.2021