

**ФОРМИРОВАНИЕ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК И ЭФФЕКТЫ
ХРОНИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ У ВОДНОЙ БИОТЫ
В ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ**

**FORMATION OF DOSE RATES AND EFFECTS OF CHRONIC RADIATION
EXPOSURE ON AQUATIC BIOTA IN THE CHERNOBYL EXCLUSION ZONE**

**Д. И. Гудков¹, А. Е. Каглян¹, Н. Л. Шевцова¹, Н. А. Поморцева¹, С. И. Киреев²,
К.Д. Ганжа¹, А. А. Явнюк³, В. В. Беляев¹, Е. В. Дзюбенко⁴, В. В. Павловский⁵**
**D. I. Gudkov¹, A. Ye. Kaglyan¹, N. L. Shevtsova¹, N. A. Pomortseva¹, S. I. Kireev²,
Ch. D. Ganzha¹, A. A. Iavniuk³, V. V. Belyaev¹, E. V. Dzyubenko⁴, V. V. Pavlovsky⁵**

¹Институт гидробиологии НАН Украины, г. Киев, Украина, digudkov@gmail.com

²Государственное специализированное предприятие «Экоцентр» ГАЗО Украины, г. Чернобыль, Украина

³Факультет экологии Учебно-научного института экологической безопасности Национального авиационного университета, г. Киев, Украина

⁴Переяслав-Хмельницкий государственный педагогический университет им. Г. Сковороды, г. Переяслав-Хмельницкий, Украина

⁵Учебно-научный центр «Институт биологии и медицины»

Киевского национального университета им. Т. Шевченко, г. Киев, Украина

¹Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

²State Specialized Enterprise “Ecocentre” of the SAEZM of Ukraine, Chernobyl, Ukraine

³Department of Ecology of the Educational and Scientific Institution of Ecological Safety of the National aviation University, Kiev, Ukraine

⁴G. Skovoroda Pereyaslav-Khmelnitsk State Teacher Training University, Pereyaslav-Khmelnitsk, Ukraine

⁵Educational and Scientific Center “Institute of Biology and Medicine” of the T. Shevchenko National University of Kiev, Ukraine

У водных организмов Чернобыльской зоны отчуждения, обитающих в градиенте хронического радиационного воздействия, на протяжении последних 15 лет выявлены дозозависимые эффекты, свидетельствующие о поражении биологических систем на субклеточном, клеточном, органотканевом, организменном и популяционно-видовом уровнях. Для высших водных растений в наиболее загрязненных радионуклидами водоемах установлено снижение устойчивости к поражению паразитическими грибами и беспозвоночными, следствием чего является снижение темпов роста, семенной продуктивности и биомассы растений. Частота хромосомных нарушений в тканях высших водных растений и эмбрионов моллюсков в водоемах Чернобыльской зоны отчуждения многократно превышает уровень спонтанного мутагенеза и может быть проявлением радиационно-индуцированной генетической нестабильности.

In the aquatic organisms of the Chernobyl exclusion zone, living in a gradient of chronic radiation exposure, over the past 15 years, dose-dependent effects that indicate damage to biological systems at the sub-cellular, cellular, organ and tissue, organism and population-species levels have been revealed. For the higher aquatic plants in the water bodies most contaminated with radionuclides, a decrease in resistance to damage by parasitic fungi and invertebrates has been established, it results in a decrease in growth rates, seed productivity and plant biomass. The rate of chromosomal abnormalities in the tissues of higher aquatic plants and mollusk embryos in the water bodies of the Chernobyl exclusion zone in many times higher than the level of spontaneous mutagenesis, and can be a manifestation of radiation-induced genetic instability.

Ключевые слова: Чернобыльская зона отчуждения, водные экосистемы, радионуклидное загрязнение, водные организмы, мощность поглощенной дозы, радиационные эффекты.

Key words: Chernobyl exclusion zone, aquatic ecosystems, radionuclide contamination, aquatic organisms, absorbed dose rate, radiation effects.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2020-1-338-341>

Естественное самоочищение водоемов Чернобыльской зоны отчуждения (далее – ЧЗО) от радиоактивного загрязнения происходит крайне медленно, в результате чего экосистемы большинства озер, стариц и затонов и по сей день характеризуются высоким уровнем содержания аварийных, долгоживущих радионуклидов во всех компонентах. Научным комитетом ООН по действию атомной радиации (далее – UNSCEAR) и Международной

комиссией по радиологической защите (далее – ICRP) в качестве безопасного уровня радиационного воздействия на биоту предлагается использовать значение мощности поглощенной дозы в диапазоне 40–400 мкГр/ч [2, 4, 5]. При этом безопасным пороговым уровнем для позвоночных животных принято значение дозовой нагрузки 40 мкГр/час. В то же время в рамках проекта Европейской комиссии PROTECT (Protection of the Environment from Ionising Radiation in a Regulatory Context) величина безопасного порога облучения биоты была оценена методом анализа «распределения чувствительности видов» (SSD – species sensitivity distribution) [1]. Применение этого метода позволило определить нижнюю границу безопасного хронического облучения биоты (позвоночные, растения и беспозвоночные) на уровне 10 мкГр/час. В качестве скрининговой мощности поглощенной дозы для позвоночных животных была рекомендована величина 2 мкГр/ч, которую предложено использовать для первичной оценки уровня безопасности биоты.

Целью представленной части многолетних исследований было изучение особенностей формирования мощности поглощенной дозы (далее – МПД) за счет внешних и внутренних источников ионизирующего излучения, а также оценка цитогенетических и соматических эффектов хронического радиационного воздействия для гидробионтов различной таксономии в ЧЗО.

Представленные данные относятся к периоду 2005–2019 гг. и были получены для биоты озер Азбучин, Вершина, Глубокое, Далекое, Яновского затона, водоема-охладителя (далее – ВО) ЧАЭС и р. Припять в пределах ЧЗО. Следует отметить, что в рамках «Программы снятия с эксплуатации Чернобыльской АЭС», с ноября 2014 г. после прекращения подачи воды в ВО из р. Припять начался процесс естественного снижения уровня водоема, преимущественно за счет фильтрации воды через тело ограждающей дамбы. При этом уменьшение подпора вод ВО повлекло снижение уровня воды и в расположенных рядом водоемах, в частности, в оз. Азбучин. Приведенные для ВО данные относятся к наиболее изученной северо-западной части, являющейся в настоящее время изолированным водоемом.

Установлено, что среди рыб максимальные дозы ионизирующего излучения в водоемах ЧЗО получают виды, ведущие придонный образ жизни – линь, карась и сом европейский, а минимальные – пелагические виды – уклейя и чехонь. Среди исследованных водоемов наибольшие мощности поглощенной дозы отмечены в озерах Вершина, Глубокое, Азбучин для линя (53,1–130,8 мкГр/ч) и карася (36,3–110,4 мкГр/ч). Для рыб Яновского затона и ВО ЧАЭС мощность поглощенной дозы была, соответственно, 2,30–15,21 и 6,04–31,30 мкГр/ч. Представители ихтиофауны русской части р. Припять характеризовались величинами дозовой нагрузки в пределах 0,06–0,13 мкГр/ч.

Внешнее облучение рыб в водоемах ЧЗО обусловлено преимущественно депонированным в донных отложениях водоемов ¹³⁷Cs, вклад которого в общую МПД для рыб исследованных озер и Яновского затона составил 63,5–95,6%, а для рыб ВО ЧАЭС эта величина была близка к 100%. Некоторым исключением являются рыбы оз. Вершина, для которых вклад внешней дозы облучения, за счет аномально высоких концентраций инкорпорированного ⁹⁰Sr в костных тканях, был менее 50% общей МПД. Вклад внешнего облучения, которое получают рыбы в зимовальных ямах замкнутых и условно непроточных водоемов ЧЗО в холодный период составляет 43,0–92,0% общей годовой дозы.

Основным радионуклидом, формирующим внутреннюю дозу облучения большинства представителей ихтиофауны замкнутых и условно непроточных водоемов ЧЗО, является ⁹⁰Sr. Внутренняя годовая доза облучения рыб от инкорпорированного ⁹⁰Sr составляет 61–96% общей внутренней дозы облучения рыб. Для «мирных» видов рыб ВО вклад ⁹⁰Sr во внутреннюю дозу облучения, в связи со снижением уровня воды и ростом удельной активности радионуклида в воде, увеличился с 23–46% в период 2010–2015 гг. до 52–79% в 2018 г., а для хищных видов, соответственно, с 6–21 до 22–27%.

Реконструкция дозовых нагрузок на высшие водные растения озер Далекое и Глубокое, расположенных на территориях с наибольшими плотностями радионуклидного загрязнения в ЧЗО, позволила оценить поглощенную дозу для растений в течение вегетационного сезона 1986 г. Была определена динамика формирования дозы облучения от внешних и внутренних источников для растений различных экологических групп полигонных водоемов за счет 17 радионуклидов. Общая доза облучения за вегетационный сезон 1986 г. составила в оз. Глубокое для погруженных растений около 10 Гр, для воздушно-водных и растений с плавающими листьями 70–85 Гр; в оз. Далекое эти величины составляли около 6 и 37–44 Гр, соответственно. Установлено, что за счет ¹⁴⁴Ce в течение 1986 г. формировалось около 75% общей дозы облучения. С осени 1986 до начала 1989 гг. снижение дозовых нагрузок на растения было обусловлено радиоактивным распадом ¹⁴⁴Ce. С началом вегетационного сезона 1989 г. облучение воздушно-водных растений формируется ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs. К 1995 г. величина годовой дозы облучения растений в оз. Глубокое уменьшилась до 15–155 мГр, а в оз. Далекое – до 7–15 мГр. В период 2016–2019 гг. в оз. Глубокое усредненная доза облучения воздушно-водных растений составила около 7,5 мГр/год, а в оз. Далекое – 5,6 мГр/год.

Среднегодовая величина частоты цитогенетических нарушений в клетках корневых меристем пяти видов высших водных растений (тростника обыкновенного, манника большого, ежеголовника прямого, петушки болотного и стрелолиста стрелолистного) из водоемов ЧЗО достоверно превышает соответствующие показатели для растений в водоемах с фоновыми уровнями радионуклидного загрязнения в 2–3 раза. Основной вклад в спектр цитогенетических повреждений исследованных видов вносят тяжелые нарушения хромосом – одиночные и двойные мосты. В последние годы значительно увеличилась доля множественных аберраций в клетках корневых меристем наиболее изученного вида – тростника обыкновенного.

Установлена прямая коррелятивная зависимость между величиной поглощенной дозы ионизирующего излучения и частотой возникновения хромосомных аберраций в клетках корневых меристем воздушно-водяных

растений из водоемов ЧЗО. Предполагается, что формирование цитогенетических нарушений растений обусловлено преимущественно радионуклидами, инкорпорированными в тканях (прежде всего ^{90}Sr), формирующими внутреннюю дозу облучения, в отличие от внешнего гамма-облучения. Высокий уровень значимости инкорпорированного ^{90}Sr (химического аналога кальция) при возникновении хромосомных нарушений может быть связан, во-первых, с включением этого радионуклида в кальций-связывающие белки, входящие в мембранные структуры внутриклеточных органов, задействованных в митотическом делении клетки, а во-вторых – с включением радионуклида в состав рафид – игольчатых кристаллов оксалата или карбоната кальция, которые откладываются в растительных клетках и могут формировать локальные источники мощного дополнительного облучения.

Существует прямая зависимость от текущей дозовой нагрузки для родительских растений на показатели жизнеспособности семенного потомства тростника обыкновенного из водоемов ЧЗО в градиенте МПД 0,05–34,0 мкГр/час. Показатели всхожести семян в среднем были ниже на 30%, энергия прорастания и выживаемость проростков – в 2,0–2,5 раза ниже, а выход аномалий проростков, совместимых с жизнеспособностью (хлорофильные аномалии, нарушения органогенеза и геотропизма) – в 1,5–3,8 раза выше аналогичных показателей проростков растений из референтных водоемов.

Цитогенетические и гематологические исследования пресноводного моллюска прудовика обыкновенного (*Lymnaea stagnalis* L.) в ЧЗО свидетельствуют о высоком уровне аберраций хромосом в эмбриональных тканях, а также о существенном изменениях состава гемолимфы взрослых особей моллюсков в наиболее загрязненных радионуклидами водных объектах. Частота хромосомных нарушений в тканях высших водных растений и эмбрионов моллюсков в загрязненных радионуклидами водоемах ЧЗО многократно превышает уровень спонтанного мутагенеза (2,0–2,5%), присущего водным организмам [3], и может быть проявлением радиационно-индцированной генетической нестабильности.

В градиенте увеличения МПД 0,05–84,5 мкГр/ч в крови красноперки, плотвы, окуня и карася серебряного линейно снижалось количество лимфоцитов, соответственно на 6,7, 8,5, 11,2 и 41,9%, и увеличивалось количество клеток гранулоцитарного ряда, соответственно на 5,4, 7,2, 10,8 и 36,2%, относительно общего количества клеток крови у рыб контрольной выборки. Качественный анализ эритроцитов крови рыб в водоемах ЧЗО выявил многочисленные структурные нарушения клеток красной крови, а также нарушения, связанные с патологией митотического деления: деформацию ядер, пикноз, пристеночные ядра, цитолиз, микроядра и т.д. Количество различных типов нарушений эритроцитов возрастило от 3–5 для рыб референтных водоемов до 11 для рыб в водоемах с наибольшими уровнями радионуклидного загрязнения. Увеличение количества структурных повреждений эритроцитов и нарушений, связанных с патологией митотического деления, с повышением МПД для всех видов рыб ЧЗО носило дозозависимый характер, возрастаая при наибольших дозовых нагрузках в 5,0, 5,6, 10,7 и 13,8 раз, соответственно, для окуня, карася серебряного, красноперки и плотвы по сравнению с количеством нарушений в крови рыб референтных водоемов.

Среди аномалий осевого скелета, исследованных для молоди горчака европейского и овсянки оз. Глубокое, зарегистрировано преобладание нарушений строения элементов хвостового и брюшного отдела осевого скелета. Были выявлены раздвоение невральных дуг, срастание двух и более позвонков, дополнительные отростки на преуральных позвонках, а также деформации гемальных дуг и ребер. У рыб оз. Азбучин преобладали как деформации последнего позвонка хвостового отдела, удвоение невральных и гемальных дуг позвонков, так и значительные деформации гемальных дуг. Общее количество аномалий осевого скелета рыб из озер ЧЗО в 4–5 раз превышало значения для рыб водоемов с фоновыми уровнями радионуклидного загрязнения.

Для высших водных растений в наиболее загрязненных радионуклидами водоемах выявлено снижение устойчивости к поражению беспозвоночными (галлообразующими клещами и двукрылыми) и паразитическими грибами (*Clavicipitaceae*), следствием чего является существенное снижение темпов роста, семенной продуктивности и биомассы растений.

Таким образом, зарегистрированные современные уровни МПД существенно превышают безопасные пороговые уровни для позвоночных животных, предложенные UNSCEAR, ICRP, а также в рамках проекта ЕС PROTECT. Установленные дозозависимые эффекты у водных организмов ЧЗО свидетельствуют о поражении биологических систем на субклеточном, клеточном, органотканевом, организменном и популяционно-видовом уровне. Хронические дозовые нагрузки на водную биоту в ЧЗО вызывают реакции, свидетельствующие о радиационном поражении отдельных видов растений и животных. Особое значение приобретают цитогенетические и генетические эффекты, которые являются следствием нарушений стабильности генома, с высокой вероятностью проявления в виде увеличения частоты мутаций, снижения репродуктивной способности и выпадения отдельных видов. Кумулятивные радиобиологические процессы могут продолжаться в течение многих поколений, позволяя в настоящее время предполагать возможность неполной реализации отдаленных последствий облучения. Крайне важным является изучение радиационно-индцированных поражений биосистем на различных уровнях организации, которые на фоне внешнего благополучия биоценозов в ЧЗО могут представлять реальную угрозу проявления негативных последствий длительного радиационного воздействия в будущем.

Работа выполнена при поддержке Государственного агентства Украины по управлению зоной отчуждения и в рамках проектов Национальной академии наук Украины, украинско-японского проекта «Улучшение радиационного контроля окружающей среды и законодательной базы в Украине для экологической реабилитации радиоактивно загрязненных территорий», финансируемого программой SATREPS (Science and Technology Research

Partnership for Sustainable Development) и проекта “Transfer-Exposure-Effects (TREE): Integrating the science needed to underpin radioactivity for humans and wildlife (Ref: NE/000393/1), финансируемого Научным советом охраны окружающей среды (NERC) Великобритании. Авторы выражают признательность руководству и сотрудникам государственных специализированных предприятий «Экоцентр» и «Чернобыльская АЭС» за содействие при выполнении полевых работ на водоемах ЧЗО, а также аналитических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Andersson, P., Garnier-Laplace, J., Beresford, N. A. et al.* Protection of the environment from ionising radiation in a regulatory context (PROTECT): proposed numerical benchmark values // Journal of Environmental Radioactivity. – 2009. – Vol. 100. – P. 1100–1108.
2. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Publication 108. Environmental Protection: The Concept and Use of Reference Animals and Plants // Annals of the ICRP. – 2008. – Vol. 38, Nos 4–6. – 251 p.
3. *Tsytsugina, V. G.* An indicator of radiation effects in natural populations of aquatic organisms // Radiation Protection Dosimetry. – 1998. – Vol. 75, № 1–4. – P. 171–173.
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 1996 Report to the General Assembly with Scientific Annex. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Annex: Effects of radiation on the environment. – New York: United Nations, 1996. – 86 p.
5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annex E: Effect of ionizing radiation on non-human biota. – New York: United Nations, 2011. – 164 p.

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ, ПРОЖИВАЮЩЕГО В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

EXPOSURE DOSE ASSESSMENT OF THE POPULATION LIVING IN THE AREA OF NUCLEAR FUEL CYCLE ENTERPRISES FROM VARIOUS TYPES OF WATER USE

Д. И. Гусейнова

D. Huseinava

*Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь*

*Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus
dianahuseinava@gmail.com*

Представлены пути облучения населения от предприятий ядерного топливного цикла при водопользовании. Приведен метод расчета годовых эффективных доз по всем путям внешнего и внутреннего облучения для различных возрастных групп при водопользовании.

Population exposure pathways from nuclear fuel cycle enterprises in water use are demonstrated in the article. A method for calculating annual effective doses in all ways of external and internal exposure for different age groups in water use is given.

Ключевые слова: эффективная доза, ядерный топливный цикл, пути воздействия, внешнее облучение, внутреннее облучение, радионуклиды, дозовый коэффициент.

Keywords: exposure dose, nuclear fuel cycle, exposure pathways, external irradiation, internal exposure, radionuclides, dose coefficients.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2020-1-341-344>

Оценка доз облучения населения, проживающего в районе размещения предприятий ядерного топливного цикла (далее – ЯТЦ) производится с учетом результатов анализа водной системы, определения видов водопользования на критических участках и соответствующих путей облучения населения, расчетов факторов разбавления в типовых элементах водной системы, определения перечня нормируемых радионуклидов и источников сбросов.

Пути облучения населения определяются исходя из анализа водопользования и жизнедеятельности населения в районе расположения ЯТЦ. Необходимо учитывать следующие пути облучения населения при водопользовании:

- внешнее облучение при купании в водном объекте;
- внешнее облучение при плавании и ловле рыбы;