

РАСЧЕТ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА БИОТУ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ УРАНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Е.И. КАРПЕНКО,
С.И. СПИРИДОНОВ

ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВА-
ТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СЕЛЬСКОХОЗЯЙ-
СТВЕННОЙ РАДИОЛОГИИ
И АГРОЭКОЛОГИИ РАСХН, ОБНИНСК

Оценка дозовых нагрузок на биоту и человека является важной и неотъемлемой частью системы защиты окружающей среды от влияния радиационного фактора. С помощью разработанного комплекса математических моделей рассчитаны дозы облучения природных объектов в районе расположения уранодобывающего предприятия ЛПО «Алмаз». В рамках данной работы оценен вклад в дозу внешнего и внутреннего облучения биоты. Выявлено, что дозовая нагрузка на некоторые организмы превышает допустимые пределы доз облучения биоты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: уранодобывающее предприятие, естественные радионуклиды, биота, доза облучения, дозиметрические модели.

РАЗРАБОТКА И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Проблема радиоактивных отходов, образующихся на всех этапах ядерного топливного цикла, в том числе и на первом этапе — при добыче и переработке урановых руд, является весьма актуальной в настоящее время. Многие пульпохранилища и хвостохранилища не отвечают современным природоохранным требованиям, происходит нарушение защитных барьеров, что может привести к радиоактивному загрязнению окружающей среды.

Лермонтовское производственное объединение (ЛПО) «Алмаз» (г. Лермонтов, Ставропольский край) начало свою деятельность в 1950 г. как рудодобывающее, а с 1954 г. как рудоперерабатывающее предприятие. В ходе производственной деятельности осуществлялись добыча урановых руд и их переработка в закись-окись урана. В сферу деятельности

THE CALCULATION OF DOSE RATES TO BIOTA IN THE VICINITY OF THE URANIUM-MINING FACTORY BASED ON A SYSTEM OF DOSIMETRIC MODELS

E.I. KARPENKO, S.I. SPIRIDONOV

The dose assessment on human and biota is one of the important and essential part of the radiation protection of environment. Exposure doses of nature bodies situated in the region where the factory of uranium-mining LPA (Lermontov Production Association) «Almaz» is located were calculated by means of developed system of mathematical models. In terms of this research the contribution of internal and external irradiation into the exposure doses for biota was estimated. It was ascertained that dose charge for some entities exceeds the acceptance limits of exposure doses for biota.

KEYWORDS: Uranium mining plant, primordial radionuclides, biota, radiation dose, dosimetric models.

ЛПО «Алмаз» входили два рудника с подземной разработкой (шахты и штольни). Переработка руды осуществлялась кислотным способом с последующим извлечением ценных компонентов по сорбционно-экстракционной схеме. В рамках комплексной оценки радиоэкологической ситуации в районе размещения предприятия были получены экспериментальные данные по содержанию радионуклидов в окружающей среде [2].

Радиочувствительности биологических видов, как и дозовые нагрузки на них, могут различаться весьма существенно, в зависимости от специфики радиоэкологической ситуации. Поэтому важной задачей является выбор критических экосистем и компонентов биоты, которые в первую очередь подлежат изучению при оценке последствий радиационного воздействия. Это предполагает анализ природных экосистем в районе размещения предприятий атомной промышлен-

ности и выделение представительных (референтных) видов или сообществ, для которых будут производиться оценки. Понятно, что наибольший интерес представляет анализ последствий облучения наиболее радиочувствительных и наиболее распространенных экосистем и биологических видов.

Набор референтных биологических видов играет в системе радиационной защиты биоты ту же роль, что концепция «референтного человека» в системе радиационной защиты человека. При выборе референтных видов необходимо учитывать следующие характеристики: 1) роль в функционировании конкретных экосистем, 2) распространенность; 3) наличие необходимых радиобиологических данных; 4) радиочувствительность; 5) вероятность индукции и тяжесть проявления вредных эффектов при разных сценариях радиоактивного загрязнения; 6) хозяйственную ценность; 7) наличие адекватных дозиметрических моделей и возможность корректной оценки доз на критические органы в разных радиоэкологических ситуациях.

При таком подходе в районе расположения предприятия «Гидрометаллургический завод» (ЛПО «Алмаз») наиболее значимым (ценозообразующим) компонентом фитоценозов является травянистая растительность. По этой причине на первом этапе исследований представляется целесообразным оценить дозовые нагрузки именно на этот компонент. Вследствие высоких коэффициентов накопления, особенно в случае загрязнения водных экосистем α - и β -излучающими радионуклидами, оценка дозовых нагрузок

на представителей пресноводных экосистем, прежде всего, бентосных организмов, является не менее важной. Также следует оценить дозовые нагрузки на организмы, среда обитания которых является источником радиоактивного загрязнения (отвалы штолен, содержащие миллионы кубометров различных пород вскрыши, отходов обогащения и переработки руда). К таким организмам относится представитель почвенной мезофауны — дождевой червь (*Nicodrilus caliginosus* S.).

При оценке доз облучения рассматриваемых компонентов биоты необходимо учитывать вклад дозовых нагрузок от всей цепочки уранового семейства рис. 1.

Рассматривая тяжелые естественные радионуклиды (ТЕРН) в качестве источника облучения природных объектов, оценка дозовой нагрузки от радионуклидов «начальных звеньев» урановой цепочки производилась в предположении одинаковой активности радионуклидов от ^{238}U до ^{230}Th , по измеренной активности ^{238}U . Начиная с ^{222}Rn , расчет производится при условии уменьшенной в 0,7 раза активности радионуклидов, по измеренной активности ^{226}Ra .

МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ТРАВЯНИСТОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Травянистые растения (надземная часть) подвергаются воздействию ионизирующего излучения от радионуклидов, содержащихся в почве, и радионуклидов, поступивших в растения корневым путем. При этом доза внутреннего облучения формируется, в основном, за счет α -излучения. Источниками внешне-

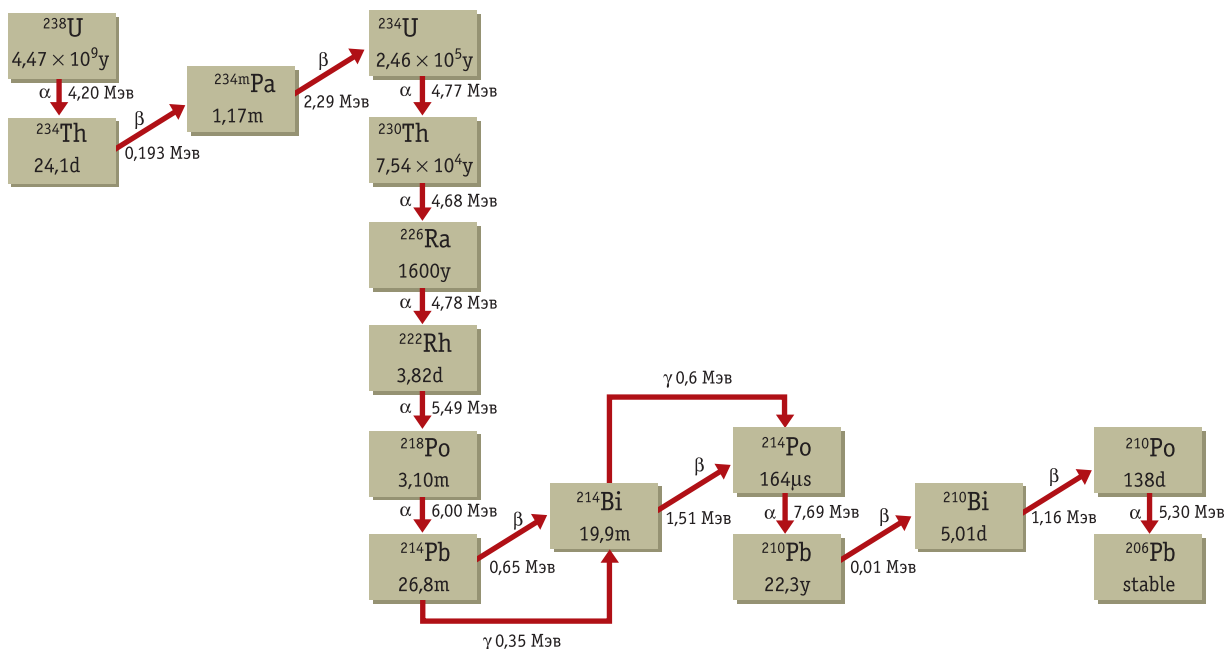


РИС. 1.
Цепочка радионуклидов семейства ^{238}U

го облучения являются, в подавляющей степени, γ - и β -излучающие радионуклиды, сосредоточенные в почве. Характеристики радионуклидов, содержание которых определялось в почвенных образцах, отобранных на территории, прилегающей к ЛПО «Алмаз», представлены в табл. 1.

При определении геометрии источника γ - облучения растений учитывался характер отбора почвенных образцов на территории завода. На каждом экспериментальном участке взяты пробы из почвенного слоя (0–10 см), который можно представить в виде толстого бесконечного источника (бесконечной «пластины»). При этом принято допущение о равномерном распределении радионуклидов в пределах слоя. Выделение слоев меньшего размера в пределах корнеобитаемого горизонта не представляется целесообразным, поскольку не известно детальное распределение радионуклидов по почвенному профилю.

При разработке концептуальной модели, предназначенной для оценки дозы, формируемой β -излучением, в качестве источника рассматривался только верхний слой почвы. Это обусловлено небольшим пробегом β -частиц в почве по сравнению с пробегом этих частиц в воздухе. Дозовая нагрузка на компоненты травянистых растений от α -излучающих радионуклидов формируется в случае накопления радионуклидов в этих компонентах. Поскольку размеры растений велики по сравнению с пробегом α -частиц, мощность поглощенной дозы рассчитывалась как мощность дозы, создаваемой в бесконечном объеме поглощающего вещества с равномерным распределением радионуклидов.

Таким образом, при оценке дозовых нагрузок на наземные части травянистых растений с использованием экспериментальных данных, отражающих распределение совокупности радионуклидов по почвенному слою, учтено поступление α -излучающих радионуклидов в растения корневым путем из почвы.

ДОЗИМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗЫ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ОТ γ -ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В рамках концептуальной схемы дозиметрической модели для оценки доз облучения растений от γ -излучающих радионуклидов выделены две зоны, описывающие компоненты луговой экосистемы:

- зона 1, представляющая надземную часть фитоценоза травянистых растений;
- зона 2 почвенный слой толщиной 10 см.

Зона 2 рассматривается в качестве бесконечного толстого источника (бесконечной «пластины») с концентрацией радионуклидов Q_2 . Согласно принятому допущению, радионуклиды равномерно распределены в пределах каждого слоя.

В публикациях, посвященных вопросам радиационной дозиметрии [1, 4], представлены формулы для расчета мощности дозы γ -излучения от источников различных геометрических форм, в том числе, от источников в виде бесконечных пластин, расположенных за защитой. Для максимально адекватной оценки мощности дозы от толстых бесконечных источников, имитирующих зоны, выделенные в луговой экосистеме, использовался подход, позволяющий учесть рассеяние γ -квантов [1, 8]. В рамках этого подхода моделируется многократное рассеяние излучения путем учета фактора накопления — кратности превышения характеристик поля нерассеянного и рассеянного излучения над характеристиками поля рассеянного излучения.

Выражения, позволяющие рассчитать мощность дозы (P) от источника в виде пластины за защитой, имеют вид [7]:

$$P = \frac{2\pi\Gamma\gamma_1}{\mu_s\gamma_2} q_v [E_2^*(\mu_s d) - E_2^*(\mu_s d + \mu_s' h)], \quad (1)$$

$$E_2^*(z) = \frac{A}{1 + \alpha_1} E_2 [(1 + \alpha_1)z] + \frac{1 - A}{1 + \alpha_2} E_2 [(1 + \alpha_2)z] \quad (2)$$

где Γ — гамма-постоянная; q_v — концентрация радионуклидов в источнике; γ_1 и γ_2 — массовые коэффициенты ослабления γ -излучения в воздухе и защите; μ_s и μ_s' — линейные коэффициенты ослабления γ -излучения в материале защиты и источника; d — толщина защиты; h — толщина источника; E_2^* — фактор накопления точечных изотропных источников в бесконечных средах; E_2 — функция Кинга.

Указанный подход был использован при разработке модели, предназначенной для расчета доз облучения надземной части травянистых растений, произрастающих на территории завода.

На основе анализа информации, характеризующей коэффициенты ослабления γ -излучения в различных

ТАБЛИЦА 1.

Основные характеристики радионуклидов в образцах почвы, отобранных на территориях штолен

Радионуклид	Период полураспада, годы	Энергия фотонов, МэВ	Средняя энергия β -частиц, МэВ	Энергия α -частиц, МэВ
^{210}Pb	21	0,047	0,010	—
^{226}Ra	1602	0,186	—	4,77
^{238}U	$4,51 \times 10^9$	—	—	4,78

средах [4], значения коэффициентов μ_s (1) определены с использованием значений плотности почвенного слоя, представляющих источники излучения.

**ДОЗИМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗЫ ВНЕШНЕГО
ОБЛУЧЕНИЯ ОТ β -ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

При расчете дозовых нагрузок, формируемых β -излучением, в качестве источника излучения рассматривался верхний почвенный слой. Концептуальная схема модели, предназначенной для расчета дозовых нагрузок на растения от β -излучающих радионуклидов, представлена на рис. 2.

Для определения дозы от бесконечно плоского источника конечной толщины (h) использовался подход, описанный в работе [9]:

$$D_{\beta} = \int_x^{\infty} \rho \cdot \frac{\tau}{\sigma} \cdot D(y) dy - \int_{x+h}^{\infty} \rho \cdot \frac{\tau}{\sigma} \cdot D(y) dy, \quad (3)$$

где σ — поверхностная плотность активности; τ — количество распадов радиоактивного вещества в единице массы источника, произошедшее за рассматриваемый период времени; ρ — плотность среды; $D(y)$ — доза излучения на расстоянии x от тонкого плоского источника.

**ДОЗИМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ДОЗЫ ОТ ИНКОРПОРИРОВАННЫХ
 α -ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

Для определения дозовых нагрузок на травянистые растения от α -излучения инкорпорированных радионуклидов использовалось уравнение, описанное в работах [9, 5]:

$$R = 0,16 \cdot \bar{E}_{\alpha} \cdot C, \quad (4)$$

где R — мощность дозы α -излучения в ткани, C — концентрация радионуклидов, \bar{E}_{α} — средняя энергия α -излучения на распад.

Оценка концентраций α -излучающих радионуклидов в наземной части растительности (C) выполня-

лась на основе коэффициентов перехода радионуклидов в растения из почвы.

**МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗЫ
ОБЛУЧЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ МЕЗОФАУНЫ**

Данный подход используется для расчета дозовых нагрузок на почвенную мезофауну. При адаптации дозиметрических моделей учитывались следующие источники облучения:

- инкорпорированные α -излучатели;
- внешние и инкорпорированные β -излучатели;
- внешние и инкорпорированные γ -излучатели.

Концептуальная схема модели, предназначенной для расчета дозовых нагрузок на дождевого червя, представлена на рис. 3. В том случае, если при разработке модели используется информация, характеризующая распределение радионуклидов по почвенному профилю, количество почвенных слоев в концептуальной модели может быть увеличено.

**ОЦЕНКА ДОЗЫ ОТ ИНКОРПОРИРОВАННЫХ
 α -ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

В том случае, если размеры организма велики по сравнению с пробегом α -частиц, мощность поглощенной дозы приблизительно равна мощности дозы, создаваемой в бесконечном объеме поглощающего вещества. Такой подход был использован для оценки дозовых нагрузок на дождевого червя от инкорпорированных α -излучателей. Сделано допущение о равномерном распределении радионуклидов в организме этого объекта с концентрацией C_1 (Бк/кг). Мощность поглощенной дозы (P_{α} , Гр/с) рассчитывается по следующей формуле [3]:

$$P_{\alpha} = 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot C_1 \cdot E_{\alpha} \quad (5)$$

где \bar{E}_{α} — средняя энергия α -частицы на распад, МэВ; $1,6 \cdot 10^{-13}$ — коэффициент перехода от МэВ к джоулям.

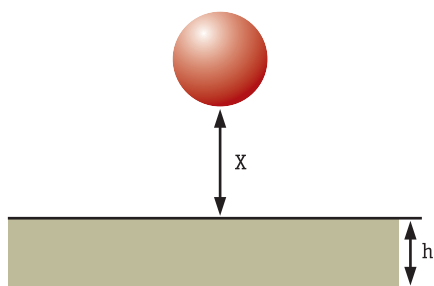


РИС. 2.

Концептуальная схема модели, предназначенной для расчета дозовых нагрузок на растения от β -излучающих радионуклидов

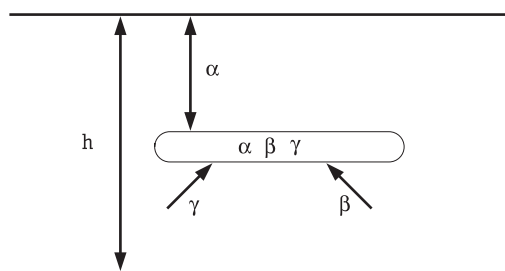


РИС. 3.

Концептуальная схема модели: h — толщина слоя почвы, содержащего радионуклиды; a — толщина слоя почвы над поверхностью тела дождевого червя

ОЦЕНКА ДОЗЫ ОТ β -ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Основным уравнением в дозиметрии β -излучения является формула Левингера для распределения дозы от точечного источника [3]. В случае, если размеры рассматриваемого организма велики по сравнению с пробегом β -частиц, мощность поглощенной дозы от инкорпорированных источников β -излучения можно оценить с использованием формулы для большого объема. Так, размеры дождевого червя (12 см — длина, 0,8 см — диаметр) существенно превышают пробег β -частиц для ^{137}Cs в мягкой ткани (0,4 мм). В рассматриваемом случае мощность поглощенной дозы β -излучения (P_β , Гр/с) от инкорпорированных радионуклидов рассчитывается по формуле:

$$P_\beta^{\text{int}} = 1.6 \cdot 10^{-13} \cdot C_1 \cdot \bar{E}_\beta \quad (6)$$

где C_1 — удельная активность радионуклида в теле дождевого червя, Бк/кг; \bar{E}_β — средняя энергия, МэВ, $1.6 \cdot 10^{-13}$ — коэффициент перехода от МэВ к джоулям.

ОЦЕНКА ДОЗЫ ОТ γ -ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

При оценке дозовой нагрузки от γ -излучения на почвенную мезофауну слой почвы, содержащий радионуклиды, можно представить в виде толстого бесконечного источника.

Расчет мощности дозы γ -излучения, формируемой внутри источника в виде бесконечной пластины, можно выполнить на основе уравнения:

$$D_0^\gamma = \frac{2\pi\Gamma\rho_s q_v^0}{\mu_s \rho_0} \left[2 \left(\frac{A}{1+\alpha_1} + \frac{1-A}{1+\alpha_2} \right) - \right. \\ \left. - E_2^* \left[\mu_s \frac{r_0}{\rho_s} (h_0 - \Delta h_0) \right] - E_2^* \left[\mu_s \frac{\rho_0}{\rho_s} \Delta h_0 \right] \right] \quad (7)$$

где q_v^0 — концентрация радионуклидов в среде; ρ_0 и h_0 — плотность среды и ее толщина соответственно; Γ — гамма-постоянная; q_v^0 — концентрация радионуклидов в i -ой зоне; ρ_s — плотность i -ой зоны; μ_s — линейный коэффициент ослабления γ -излучения в среде; h_k — толщина k -ой зоны; Δh_0 — толщина слоя между уровнем, на котором проводится отбор и границей верхней зоны; E_2 — функция Кинга.

Поскольку пробег γ -квантов превышает размеры рассматриваемого организма (дождевого червя), для оценки дозовой нагрузки от γ -излучающих радионуклидов необходимо оценивать геометрический фактор. При этом дождевого червя можно представить в виде цилиндра. Мощность дозы, формируемой в некоторой точке А внутри цилиндра, содержащего γ -излучающие радионуклиды, вычисляется по формуле [3]:

$$P_\gamma = 1,1454 \cdot \Gamma \cdot C \cdot \rho \cdot g_A \cdot 10^{-5} \quad (8)$$

Е.И. КАРПЕНКО, С.И. СПИРИДОНОВ
РАСЧЕТ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА БИОТУ
В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ УРАНОДОБЫВАЮЩЕГО
ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА
ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

где P_γ — мощность дозы, пГр/с; C — концентрация радионуклидов в ткани, Бк/кг; Γ — γ -постоянная радионуклида, аГр·м²/(с·Бк); ρ — плотность ткани, г/см³; g_A — геометрический фактор для цилиндра, см.

Мощность дозы внешнего облучения дождевого червя (D_{ext}), формируемой γ -излучающими радионуклидами, можно оценить с помощью соотношения:

$$D_{\text{ext}} = D_0^\gamma - P_\gamma \quad (9)$$

где D_0^γ — мощность дозы облучения внутри слоя почвы, являющегося источником γ -облучения; P_γ — мощность дозы в области, занятой организмом.

Расчет величины P_γ в рассматриваемом случае выполняется на основе концентрации радионуклидов в окружающей среде (почве) с использованием формулы (8).

При применении данного рода моделей можно варьировать ряд параметров (влияющих на дозу от γ -излучения), к которым относятся глубина обитания дождевого червя в почве, его биометрические характеристики, распределение радионуклидов по почвенному профилю, плотность почвы и т.д.

МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРЭСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Для пресноводных экосистем природным депо для долго- и среднеживущих радионуклидов являются донные отложения. Референтным видом пресноводных организмов (микрозообентос), обитающих в донных отложениях, являются хирономиды (*Cricotopus gr. silvestris*).

Концептуальная схема модели, предназначенной для расчета дозовых нагрузок на микрозообентос, принципиально не отличается от модели для почвенной мезофауны, однако различия имеются в размерах рассматриваемого организма (длина хирономид 15 мм и диаметр 2 мм) и в глубине обитания (около 5 см). При расчетах мощности дозы внутреннего облучения важной характеристикой, позволяющей оценить вклад источников α -, β - и γ -излучений, является соотношение между линейными размерами организмов и максимальными длинами пробега ионизирующих частиц в тканях. Таким образом в модели для расчета дозовых нагрузок на микрозообентос основной вклад в дозу внутреннего облучения могут давать α -частицы, а вкладом от инкорпорированных β - и γ -излучателей можно пренебречь.

ОЦЕНКА ДОЗЫ ОТ ИНКОРПОРИРОВАННЫХ α -ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Оценка дозовой нагрузки выполняется на основании того, что размеры организма велики по сравнению с пробегом α -частиц, следовательно, мощность поглощенной дозы приблизительно равна мощности дозы, создаваемой в бесконечном объеме поглощающего

вещества. Мощность поглощенной дозы (P_a , Гр/с) рассчитывается по формуле (5), описанной выше для почвенной мезофауны [3].

ОЦЕНКА ДОЗЫ ОТ β -ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

При рассмотрении дозы облучения микрозообентоса донные отложения во многих случаях могут быть представлены в виде бесконечного толстого источника с равномерно распределенной активностью. Поскольку пробег β -частиц в донных отложениях составляет около 0,6 см (для максимального значения энергии β -спектра), а концентрация радионуклидов в организме хирономид равна содержанию радионуклидов в почве, мощность поглощенной дозы внешнего β -излучения (P_β , Гр/с) рассчитывается по формуле:

$$P_\beta^{\text{int}} = 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot C_1 \cdot \bar{E}_\beta \quad (10)$$

где C_1 — удельная активность радионуклида в донных отложениях, Бк/кг; \bar{E}_β — средняя энергия, МэВ, $1,6 \cdot 10^{-13}$ — коэффициент перехода от МэВ к джоулям.

ОЦЕНКА ДОЗЫ ОТ γ -ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Оценивая дозовые нагрузки от γ -излучения на почвенную мезофауну слой почвы, содержащий радионуклиды, рассматривался в виде толстого бесконечного источника. При таком подходе выполняется расчет мощности поглощенной дозы внешнего γ -излучения для микрозообентоса.

Математические модели, предназначенные для расчета дозовых нагрузок на травянистые растения, представителей почвенной мезофауны и микрозообентоса реализованы с использованием программного пакета Mathcad 11 Enterprise Edition.

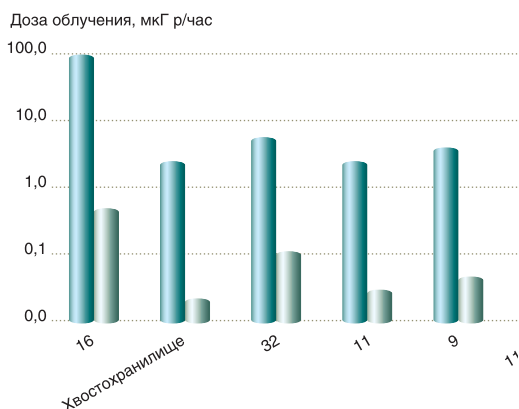


РИС. 4.

Вклад в дозовую нагрузку внешнего и внутреннего облучения травянистой растительности

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ НА ТРАВЯНИСТУЮ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ

С помощью разработанных дозиметрических моделей были выполнены оценки дозовых нагрузок на травянистую растительность в районе расположения ЛПО «Алмаз». Коэффициенты перехода рассчитывались по данным содержания радионуклидов в сопряженных пробах почвы и растительности, отобранных на исследуемых территориях.

При расчете дозовых нагрузок на биоту учитывали фактор относительной биологической эффективности (ОБЭ). Для α -облучения он равен 10, для γ - и β -облучения — 1. Отдельно рассматривается низкоэнергетическое β -облучение (при энергиях меньше 0,01 МэВ), для которого фактор ОБЭ равен 3 [10].

Величины дозовых нагрузок, рассчитанные для травянистой растительности от инкорпорированных и внешних источников облучения, представлены на рис. 4.

Наибольшему воздействию подвергаются растения, произрастающие на отвалах штольни №16, наименьшему — в районе штольни №11-бис. Таким образом, вклад от «блока радия» (радионуклиды урановой цепочки от ^{226}Ra до ^{210}Po) составляет 36% от общей дозовой нагрузки, а от «блока урана» (радионуклиды урановой цепочки от ^{238}U до ^{226}Ra) — 64%. Это связано с тем, что содержание ^{238}U намного больше в почве и растениях по сравнению с концентрацией в данных объектах ^{226}Ra . Внутреннее облучение дает 99% дозовой нагрузки от всей цепочки уранового семейства.

ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ НА ПОЧВЕННУЮ МЕЗОФАУНУ

Наибольшее содержание ТЕРН в почве находится в районе штольни №16, на остальных исследуемых территориях концентрации ТЕРН сравнительно одинаковы. Почва с высохшего пруда отстойника, расположенного в районе штольни №16, рассматривается отдельно по причине высокого содержания в ней радионуклидов, а также в связи с тем, что на данном участке исследования произошла смена экосистемы.

Величина дозовой нагрузки на почвенную мезофауну от инкорпорированных и внешних источников облучения, представлена на рис. 5.

Наибольшему воздействию ионизирующего излучения подвергаются дождевые черви, обитающие на отвалах штольни №16, наименьшему — в районе хвостохранилища. Оценивая дозовую нагрузку на почвенную мезофауну, вклад от «блока радия» составляет около 62% от общей дозовой нагрузки, а от «блока урана» 38%. Это также связано с тем, что содержание ^{238}U намного больше в почве по сравнению с содержанием ^{226}Ra . Внутреннее облучение вносит вклад около 97% дозовой нагрузки от всей цепочки уранового семейства.

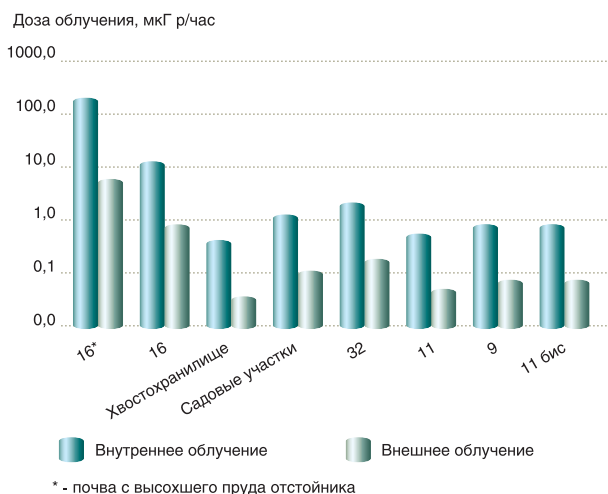


РИС. 5.

Вклад в дозовую нагрузку внешнего и внутреннего облучения почвенной мезофауны. * — почва с высохшего пруда отстойника

Е.И. КАРПЕНКО, С.И. СПИРИДОНОВ
РАСЧЕТ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА БИОТУ
В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ УРАНОДОБЫВАЮЩЕГО
ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА
ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ



РИС. 6.

Вклад в дозовую нагрузку внешнего и внутреннего облучения хирономид

ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ НА КОМПОНЕНТЫ ПРЭСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

С помощью разработанных дозиметрических моделей были также реализованы оценки доз на представителей пресноводных экосистем в районе расположения ЛПО «Алмаз». Донные отложения, отобранные на территории хвостохранилища, содержат наибольшее количество радионуклидов, наименьшее — в районе расположения штольни №11 бис. Дозовые нагрузки, рассчитанные с помощью формул для представителей пресноводных экосистем от инкорпорированных и внешних источников облучения, представлены на рис. 6.

Хирономиды, обитающие в донных отложениях родника, расположенного на территории хвостохранилища, подвергаются наибольшему воздействию. В результате большого различия в концентрациях ²³⁸U и ²²⁶Ra (первого больше чем второго в 5,4 раза), вклад «блока урана» составляет около 72%, а «блока радия» — 28%. Такое соотношение рассматриваемых показателей характерно и для травянистой растительности. Вклад внутреннего облучения составляет 99% от суммарной дозовой нагрузки. Максимальную дозу облучения получают бентосные организмы, минимальную — травянистая растительность.

Дозы внутреннего облучения компонентов окружающей среды формируются в основном за счет инкорпорированных α-излучающих радионуклидов. Результаты оценки дозовых нагрузок на биоту с учетом относительной биологической эффективности (ОБЭ) α-излучения, могут существенным образом варьировать. Значения этого показателя по данным различных исследователей находятся в диапазоне 1–20. При этом рекомендованная величина составляет 5

[11]. Таким образом, уточнение рассматриваемого показателя является необходимым условием адекватных оценок дозовых нагрузок на биоту на территориях, загрязненных ТЕРН.

Для оценки дозовых нагрузок использовались математические модели, позволяющие варьировать ряд параметров, к которым относятся: глубина обитания живых организмов (дождевого червя в почве, бентосных организмов в донных отложениях), высота травянистой растительности, биометрические характеристики организмов, распределение радионуклидов по почвенному профилю, плотность почвы или донных отложений [3, 7].

В настоящее время не существует однозначно утвержденных критериев защиты окружающей среды от ионизирующего излучения, хотя в международных соглашениях и законодательных актах отмечается значимость этой проблемы. В документе МКРЗ (публикация 91) предложены стандарты мощностей предельных доз хронического облучения: для защиты популяций водных животных и наземных растений — 10 мГр/сут (416 мкГр/час), для наземных животных — 1 мГр/сут (41,6 мкГр/час) [6]. Более жесткий дозовый стандарт для биоты рекомендован в рамках проекта Европейской комиссии ERICA — 10 мкГр/час (0,24 мГр/день или 87,6 мГр/год) [10]. Эта величина используется в настоящее время некоторыми национальными агентствами по защите окружающей среды, в частности, в Великобритании.

Все исследуемые представители биоты не находятся в безопасных условиях, если предел мощности дозы равен 10 мкГр/час. Травянистая растительность подвергается минимальному радиационному воздействию, максимальному — представители пресноводных экосистем (рис. 7).

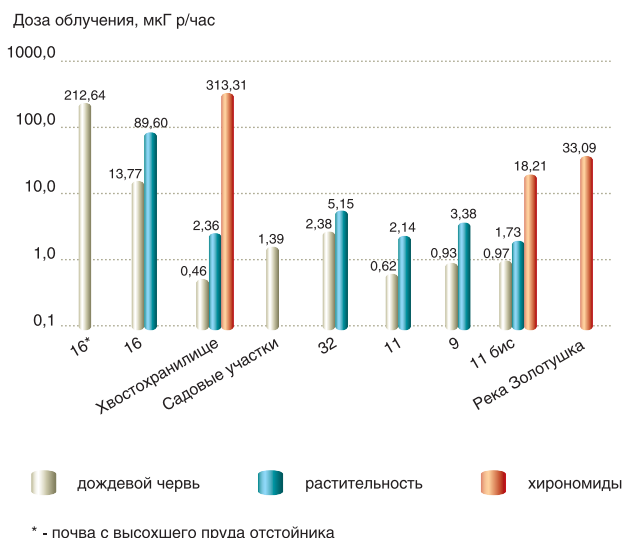


РИС. 7.

Дозы облучения биоты на исследуемых участках. * — почва с высохшего пруда отстойника

Согласно стандарту предельных доз, представленному в документах Международной комиссии по радиологической защите (предел мощности дозы для водных животных и наземных растений — 416 мкГр/час, а для наземных животных — 41,6 мкГр/час), травянистая растительность и микрозообентос является защищенным на всех участках, включая хвостохранилище. Почвенная мезофауна является не защищенной в районе штольни №16 — на участке высохшего пруда отстойника. Результаты оценок влияния радиационного фактора на биоту в районе расположения уранодобывающего предприятия существенно образом зависят от величины рассматриваемых дозовых стандартов. Таким образом, обоснование пределов радиочувствительности компонентов биоты является ключевой задачей в рамках разработки системы защиты окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П. Физические основы защиты от излучений. Т. 1. М.: Атомиздат, 1980. 461 с.
2. Карпенко Е.И., Санжарова Н.И., Спиридонов С.И., Серебряков И.С. Радиоэкологическая обстановка в районе размещения бывшего уранодобывающего предприятия ЛПО «Алмаз» // Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра. Радиация и риск. 2009. Т. 18, №4. С. 73–82.
3. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Имитационные модели динамики экосистем в условиях антропогенного воздействия ТЭС и АЭС. М.: Энергоиздат, 1990. 184 с.

4. Машкович В.П. Защита от ионизирующего излучения. М.: Энергоатомиздат, 1982. 296 с.
5. Моисеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М.: Энергоатомиздат, 1990. 215 с.
6. Основные принципы оценки воздействия ионизирующих излучений на живые организмы, за исключением человека. Публикация 91 МКРЗ. Пер. с англ. М.: Изд. «Комтехпринт», 2004. 76 с.
7. Спиридонов С.И., Фесенко С.В., Гераськин С.А., Соломатин В.М., Карпенко Е.И. Оценка доз облучения древесных растений в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48, № 4. С. 432–438.
8. Фесенко С.В., Алексахин Р.М., Гераськин С.А., Санжарова Н.И., Спирин Е.В., Спиридонов С.И., Гонтаренко И.А., Стрэнд П. Сравнительная оценка радиационного воздействия на биоту и человека в 30-километровой зоне Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44, № 6. С. 618–626.
9. Хайн Дж., Браунелл Г. Радиационная дозиметрия. Перевод с англ. под ред. Н.Г. Гусева, К.А. Труханова. М.: изд-во Иностран. лит., 1958.
10. D-ERICA: An integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionizing radiation. Project number FI6R-CT-2004-508847. Swedish Radiation Protection Authority (2007).
11. Douglas B., Chambers R.V., Osborne A.L. Garva. Choosing an alpha radiation weighting factor for doses to non-human biota. Journal of Environmental Radioactivity 87. 2006. P. 1–14.

Карпенко Евгений Игоревич
к.б.н., научный сотрудник ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии

Спиридонов Сергей Иннокентьевич
д.б.н., зав. лабораторией ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии

249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское ш., 109 км, тел.: +7 (48439) 6-48-02, e-mail: spiridonov.si@gmail.com