

МЕТОД РАСЧЕТА ВНЕШНЕЙ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ В ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ

Дворник А.М.¹, Дворник А.А.²

¹УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»

²ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси»

(г. Гомель, Беларусь)

Предложен метод расчета дозы внешнего облучения в лесных насаждениях, в основу которого положены алгоритмы расчета защиты от протяженных источников ионизирующих излучений. Разработана конфигурация источников излучения. Калибровка и верификация предлагаемого метода была проведена на основе экспериментальных измерений мощности облучения дозы в сосновых насаждениях. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает их удовлетворительное согласие. Получен прогноз значений дозы внешнего облучения в сосновых насаждениях на отдаленный период времени.

ВВЕДЕНИЕ

Радиоактивному загрязнению в результате чернобыльских выпадений 1986 года подверглись все природные экологические системы на обширных территориях. На протяжении десяти лет они очищались благодаря физическим и природным процессам и под воздействием контрмер, применяемых человеком. Однако в настоящее время имеются критические экосистемы, аккумулирующие радионуклиды и определяющие длительные нагрузки на человека вследствие внешнего облучения и миграции по трофическим цепям [1,2]. К таким критическим экосистемам относятся лесные ценозы. Поведение радионуклидов в лесных экосистемах имеет свою специфику и отличается от поведения в других экосистемах, например, луговых. Корректный учет

лесной специфики позволит построить реальную картину воздействия радиационно загрязненных лесов на жизнедеятельность человека.

В формировании дозы внешнего облучения населения основную роль играют два фактора - радиоактивное загрязнение лесных массивов и режим поведения. Вклад внешней дозы облучения в суммарную дозу колеблется в достаточно широких пределах от 30 до 60% и зависит от социальной ориентации группы населения, ее профессиональной принадлежности и возраста [1, 3].

В настоящей работе на предложен метод оценки формирования дозы внешнего облучения в лесных экосистемах и сделан прогноз ее динамики. Оценка дозы внешнего облучения, формируемой сосновыми насаждениями и разработка прогноза ее динамики проводились на основе расчета по модели, учитывающей распределение радионуклидов в сосновых биогеоценозах, процессы дозообразования от комплексных протяженных источников ионизирующего излучения сложной конфигурации, и верификации результатов расчета путем сравнения их с экспериментальными измерениями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Распределение радионуклидов в лесных биогеоценозах. Распределение и перераспределение радионуклидов в сосновых биогеоценозах описывается с помощью модели FORESTLIFE [1]. Модель опирается на реальные экспериментальные данные многолетних наблюдений за распределением и перераспределением радионуклидов в компонентах лесного биогеоценоза.

В рамках этой модели рассчитывается процесс миграции ^{137}Cs по почвенному профилю с использованием двухкомпонентных квазидиффузионных и диффузионно-конвективных дифференциальных уравнений переноса вещества в неоднородных средах. Зная коэффициенты миграции и относительные вклады различных механизмов, можно рассчитать распределение радионуклидов по почвенному профилю в любой момент времени.

Распределение ^{137}Cs по компонентам соснового фитоценоза определяется с помощью коэффициентов перехода радионуклидов из почвы в древесное растение и его возрастной зависимости.

Исходными данными для модельных расчетов служат возраст, порода дерева и тип леса (и, следовательно, связанный с ним тип почвы).

Выбор метода и алгоритмы расчета дозы внешнего облучения. В результате анализа методов расчета доз внешнего излучения от лесных насаждений для наших исследований выбран метод расчета дозовых нагрузок и защиты от ионизирующего излучения протяженных источников, применяемых на ядерно-энергетических установках [4, 5].

Для каждой формы источника и защиты по уравнениям, описывающим ослабление нерассеянного излучения в материале источника и защиты, определяются поток излучения, ток излучения и экспозиционная доза. При этом источник рассматривается как пространственная структура определенной геометрии. Неоднородность источников и защиты учитывается при проведе-

нии гомогенизации отдельных блоков. В расчеты введены также поправки на многократное рассеяние излучения в материале источника, защиты и альбедо. Функции ослабления излучения рассчитаны численно для конкретных конфигураций источников и защит.

Таксационные характеристики сосновых насаждений, описывающие форму и материал надземного источника излучения, выбирались из [6].

Для верификации модели полученные результаты сравниваются с экспериментальными измерениями экспозиционной дозы, выполненных с помощью газоразрядного дозиметра ДРГ-01Т и методом ТЛ-дозиметрии. Измерения экспозиционной дозы проводились в сосновых насаждениях различного возраста и типа.

Дозиметры ДРГ-01Т имеет действующее аттестационное свидетельство. ТЛ-дозиметрия проводилась радиологической лабораторией ГУ «Гомельский областной центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья».

При разработке алгоритмов одной из наиболее ответственных задач является определение геометрии источников на лесных объектах и приведение ее к наиболее простым конфигурациям, рассчитанным в этой области науки [4, 5]. Пространственная конфигурация лесного насаждения представлена в виде трех функциональных блоков:

1. Блок почвы;
2. Блок стволовой древесины;
3. Блок кроны.

Каждый блок представляется в виде бесконечной пластины определенной толщины, состава и имеет заданное распределение радионуклидов в пространстве пластины.

Блок почвы имеет набор 20 таких пластин толщиной 1 см каждая. Они распределены по глубине почвы, причем излучение текущей пластины экранируется пластинами, лежащими выше. Источник излучения находится внутри каждой пластины и имеет равномерное пространственное распределение. Интенсивность излучения от каждой пластины изменяется пропорционально распределению содержания ^{137}Cs по почвенному профилю. Изменение интенсивности излучения со временем происходит пропорционально прогнозу миграции ^{137}Cs по почвенному профилю. Детектор излучения находится на высоте 1 м над поверхностью почвы.

Блок древесины и блок кроны представлены в виде гомогенной смеси древесины, воздуха, ветвей и хвои с учетом соответствующих пропорций.

Гомогенизация блока древесины производится на основании таксационных материалов [6], в которых определены такие характеристики лесных насаждений, как диаметр и высота стволов дерева, количество деревьев на единицу площади, долевой состав сучьев, хвои и древесины в разрезе пород дерева, типа насаждения, его возраста и бонитета.

Детектор излучения в блоке древесины находится внутри блока на высоте 1 м над нижней поверхностью блока. Источник излучения распределен равномерно в гомогенной смеси блока древесины. Активность радионуклида

пропорциональна долевному вкладу древесины в гомогенную смесь. Высота блока древесины величина переменная и изменяется в зависимости от породы, возраста, типа и бонитета лесного насаждения.

Блок кроны рассчитывается аналогично блоку древесины. Размеры блока кроны изменяются в зависимости от характеристик насаждения.

Суммарная активность определяется парциальной активностью хвои, сучьев и части стволовой древесины и весовыми долями этих компонентов в составе гомогенной смеси. Суммарная активность распределена равномерно в блоке кроны. Детектор излучения находится вне пределов блока.

Для конкретных расчетов с использованием указанных алгоритмов необходимо определить набор параметров, отражающих определенные лесорастительные условия и свойства излучающих материалов.

Расчет дозы внешнего облучения от лесного насаждения. В реальных задачах наряду с нерассеянным излучением источника регистрируется также многократно рассеянное в среде излучение. Для фотонов это излучение учитывается фактором накопления. Фактор накопления зависит от многих переменных. В общем случае фактор накопления есть функция регистрируемого потока излучения, энергии фотонов, геометрии источника и защиты, материала и толщины защиты, взаиморасположения источника, защиты и детектора.

Расчет дозы внешнего облучения от блока почвы. Геометрия источника излучения от почвы представляется в виде набора полубесконечных пластин толщиной 1 см, равномерным распределением активности по толщине источника.

Суммарная мощность дозы от почвы получается суммированием доз от каждого компонента источника. При этом первая пластина отделена от детектора слоем воздуха толщиной 1 м. Вторая пластина - слоем почвы 1 см и слоем воздуха 1 м, и т.д.

Распределение активности между пластинами описывается распределением ^{137}Cs по почвенному профилю. Оно изменяется во времени согласно расчетам, полученных с помощью модели FORESTLIFE [7].

Мощность экспозиционной дозы от полубесконечной пластины, экранированной полубесконечной защитой толщиной d выражается формулой (1) [4]:

$$P = \frac{2 \pi q_{soil} K_g B_{soil} \delta}{\mu_s} E_2(\mu d), \quad (1)$$

где

P - мощность экспозиционной дозы, Р/час;

q_{soil} - равномерно распределённая активность ^{137}Cs в слое почвы толщиной 1 см, мКи/см²;

K_g - гамма-постоянная, 3,24 Р·см²/ (ч·мКи);

μ_s - линейный коэффициент ослабления излучения в материале источника, см⁻¹, плотность почвы равна 1,4 г/см³;

μ - линейный коэффициент ослабления излучения в материале защиты, см⁻¹;

d - толщина защиты, см;

$E_2(\mu d)$ - интегральная показательная функция;

B_{soil} - дозовый фактор накопления;

δ - отношение дозовых факторов накопления в барьерной геометрии к фактору накопления в бесконечной среде для плоского мононаправленного источника.

Множественное рассеяние излучения учитывается введением в расчетные формулы фактора накопления в экспоненциальном представлении Тейлора. Коэффициенты для расчета множественного рассеяния взяты из [4].

Расчет дозы внешнего облучения от блока древесины. Геометрия источника излучения от стволовой древесины представляется в виде полубесконечной пластины толщиной H_{wood} с равномерным распределением активности по толщине источника.

Плотность материала источника определяется гомогенизацией составляющих компонентов: воздуха и стволовой древесины, взятых в весовых долях на площади 1 га. Размер части ствола выбирается равным 2/3 полной высоты дерева. Количество деревьев на единице площади, средняя высота и диаметр выбираются из нормативных материалов [6] и зависят от характеристик лесных насаждений. Плотность древесины сосны принята равной $0,3 \text{ г/см}^3$, воздуха – $0,00129 \text{ г/см}^3$.

Распределение активности источника и ее изменение во времени описывается с помощью модели FORESTLIFE. Детектор излучения располагается внутри блока на расстоянии $H_{det} = 1 \text{ м}$ от нижней поверхности.

Мощность экспозиционной дозы от блока древесины выражается формулой (2) [4]:

$$P = \frac{2\pi q_{wood} K_g}{\mu_s} \{2 - E_2(\mu_s H_{det}) - E_2[\mu_s (H_{wood} - H_{det})]\}, \quad (2)$$

где

q_{wood} - равномерно распределенная активность ^{137}Cs в блоке древесины толщиной H_{wood} , мКи/км³.

Остальные параметры имеют значение как в формуле (1).

Расчет дозы внешнего облучения от блока кроны. Геометрия источника излучения от кроны представляется в виде полубесконечной пластины толщиной H_{crown} с равномерным распределением активности по толщине источника.

Плотность материала источника определяется гомогенизацией составляющих компонентов: воздуха, части стволовой древесины, сучьев, однолетней хвои и хвои прошлых лет, взятых в весовых долях на площади 1 га. Размер части ствола выбирается равным 1/3 полной высоты дерева. Количество деревьев на единице площади, их средняя высота и диаметр, весовые доли компонентов кроны выбираются из нормативных материалов [6] и зависят от характеристик лесных насаждений. Плотность древесины и сучьев сосны принята равной $0,5 \text{ г/см}^3$, воздуха – $0,00129 \text{ г/см}^3$.

Распределение активности источника и ее изменение во времени описывается с помощью модели FORESTLIFE.

Детектор излучения располагается вне на расстоянии $H_{det} = (H_{wood} - l)$ от нижней поверхности блока.

Мощность экспозиционной дозы от блока древесины выражается формулой (3) [4]:

$$P = \frac{2\pi q_{crown} K_g}{\mu_s} [E_2(\mu H_{det}) - E_2(\mu H_{det} + \mu_s H_{crown})], \quad (3)$$

где

q_{crown} - равномернораспределенная активность ^{137}Cs в блоке кроны толщиной H_{crown} , мКи/см³.

Остальные параметры имеют значение как в формуле (1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С целью пояснения методики расчета внешней дозы приведем конкретный пример такого расчета. В качестве объекта выбирается лесное насаждение, расположенное около н.п. Закружье Ветковского района Гомельской области, со следующими лесоводственно-таксационными характеристиками: сосняк мшистый, состав 10С, возраст - 40 лет, тип почвы - дерново-подзолистая, песчаная. Запас ^{137}Cs в почве - 1455 (кБк/м²), мощность экспозиционной дозы (МЭД) - 187 мкР/ч.

Для калибровочных расчетов использовались модельные параметры, характерные для наиболее распространенных почв загрязненных областей Белорусского Полесья. Распространение модели на другие типы почв происходит с использованием соответствующего им набора параметров. Лесной объект «ЗАКРУЖЬЕ» служит для калибровки модели, выбора и оптимизации модельных параметров.

Используя для вычислений формулы (1) - (3), получаем расчетную мощность экспозиционной дозы равную 178 мкР/ч. Соотношение доза/запас равно 4,52 (мкР/ч) / (кБк/м²).

Хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о достаточно корректном подборе модельных параметров. Однако, в ходе расчетов по модели было установлено, что модель чувствительна к подбору параметров, в частности, характеристикам древостоя, скорости миграции радионуклидов вглубь почвы. Для проверки адекватности модели натурным измерениям МЭД в различных условиях необходимо провести верификацию метода.

Верификация метода и прогноз динамики внешней дозы. С целью верификации метода был проведен натуральный эксперимент по определению запаса радионуклидов и мощности экспозиционной дозы в сосновых насаждениях, произрастающих на автоморфных почвах. Эти насаждения расположены в Полес-

ском радиационно-экологическом заповеднике (ближняя зона радиоактивного загрязнения) и в Ветковском районе Гомельской области (дальняя зона). Эти древостои представляют собой наиболее распространенный в Беларуси тип леса - сосняк мшистый, II бонитета, возраст от 30 до 60 лет. В этих насаждениях были определены запас ^{137}Cs в 20 сантиметровом слое почвы и мощность экспозиционной дозы в воздухе на высоте 1 м над поверхностью почвы.

На этих участках были установлены ТЛ-дозиметры на высоте 1 м по 5 штук на каждом участке. Время экспозиции составило 2 месяца.

Пробы почвы отбирались стандартным пробоотборником по методике [7]. После соответствующей пробоподготовки, удельная активность образцов почвы измерялась на сцинтилляционном гамма-спектрометре «Прогресс 3.1». Мощность экспозиционной дозы измерялась с помощью дозиметра ДРГ-01Т. Указанные приборы прошли метрологическую аттестацию.

Измерения поглощенной дозы ТЛ-дозиметров было проведено в ГУ «Гомельский областной центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья».

Для выбранных участков с учетом таксационных характеристик были проведены расчеты внешней дозы облучения по вышеизложенной методике. Сравнение экспериментальных и расчетных данных приведено в таблице.

Из таблицы видно, что экспериментальные измерения мощности дозы двумя различными методами (ДРГ и ТЛД) имеют большой разброс с коэффициентами вариации 28 и 67%, соответственно. Наличие такой большой неопределенности в экспериментальных измерениях не требует высокой точности в модельных расчетах. Полученное в модельных расчетах значение мощности дозы, нормированное на запас радионуклидов с вероятностью 0,05 согласуется по критерию Стьюдента с экспериментальными значениями.

Таблица - Мощность экспозиционной дозы и запас ^{137}Cs в почве для сосновых насаждений

| Код участка | Мощность дозы ДРГ (мкР/час) | Мощность дозы ТЛД (мкР/час) | Мощность дозы. Расчет (мкР/час) | Запас ^{137}Cs Ки/км ² |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--|
| ЗАКРУЖЬЕ | 187 ± 30 | 210 | 178 | 39,3 |
| ВЫСОКИЙ БОР | 116 ± 23 | 102 | 133 | 29,4 |
| ПИРКИ | 238 ± 45 | 460 | 152 | 33,7 |
| КРЮКИ | 676 ± 135 | 750 | 646 | 143,0 |
| ЖЕЛИБОР | 834 ± 160 | 780 | 473 | 104,6 |
| ВОСТОК (Крушиновая ассоциация) | 111 ± 22 | 74 | 120 | 26,5 |
| ВОСТОК (Сосняк мшистый) | 108 ± 20 | 72 | 92 | 20,3 |

В рамках предложенной модели сделан прогноз динамики внешней дозы от основных насаждений на период 50 лет для зон загрязнения 5, 15, 40 Ки/км². Прогноз приведен на рисунке.

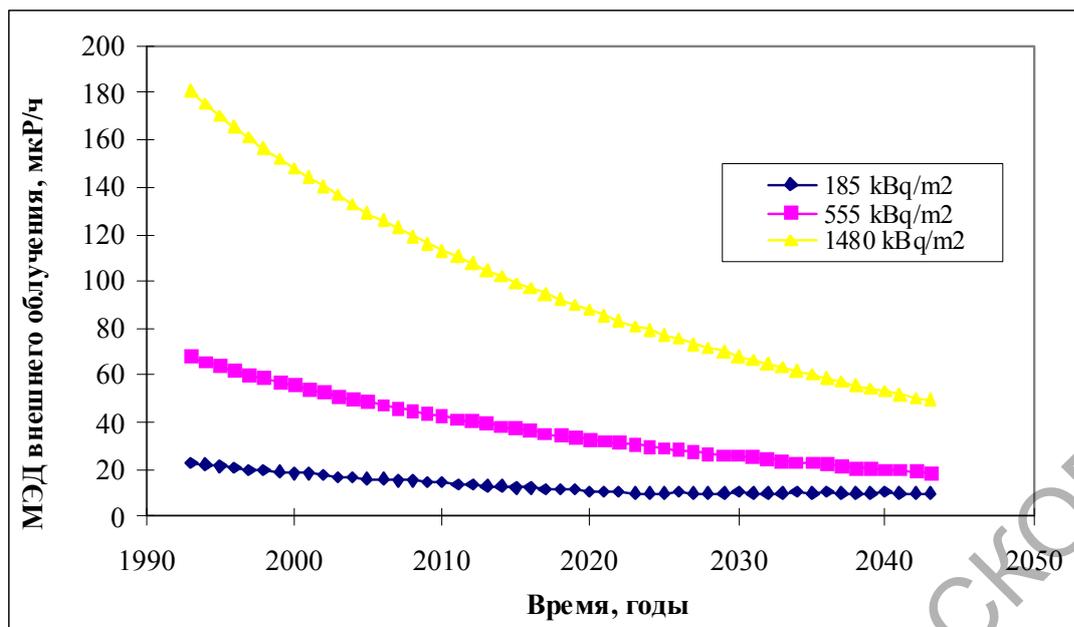


Рисунок – Динамика мощности экспозиционной дозы облучения в сосновых насаждениях

Из рисунка видно, что наклон кривых одинаков для всех зон загрязнения. Основной вклад в снижение дозы внешнего облучения от лесов вносит радиоактивный распад. Это означает, что радиоактивный распад является доминирующим механизмом, определяющим динамику внешней дозы облучения. Однако, анализ поведения отношения доза/запас показывает, что его уменьшение обусловлено миграцией радионуклидов вглубь почвы. Этот процесс и перераспределение радионуклидов в системе почва - древесный ярус будут вносить некоторые поправки в динамику внешней дозы.

В различные периоды времени комбинации этих процессов могут усиливать и компенсировать результирующее действие. Наиболее ярко эти процессы должны проявляться на переувлажненных почвах. Наряду с повышенной влажностью здесь достаточно высока скорость миграции радионуклидов и коэффициенты перехода. Следует ожидать, что на таких почвах вклад древесного яруса в формирование дозы внешнего облучения будет выше, чем на автомофных почвах. По предварительным оценкам этот вклад может достигать 20 - 25% в зависимости от реальных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод оценки формирования дозы внешнего излучения в лесных сосновых насаждениях, в основу которого положены методы расчета защиты от протяженных источников ионизирующих излучений. Разработаны конфигурация источников излучения и модельные алгоритмы расчета.

Калибровка и верификация предлагаемой модели была проведена на основе экспериментальных измерений мощности дозы облучения разными методами на опытных лесных объектах.

Сравнение экспериментальных данных и данных модельных расчетов показывает их удовлетворительное согласие. Получен прогноз значений дозы внешнего облучения в сосновых насаждениях на отдаленный период времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В.А. Ипатьев [и др.]; под. ред. В.А. Ипатьева. – Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 1999. – 452 с.
2. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах / А.И. Щеглов. – М.: Наука, 1999 – С. 177-178.
3. Шевчук В.Е. Оценка факторов, формирующих дозу внутреннего облучения у населения, пострадавшего в результате аварии на Чернобыльской АЭС: автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.00.07 / В.Е. Шевчук; Мин. гос. мед. ин-т. Минск, 1995. - 14 с.
4. Кимель Л. Р. Защита от ионизирующих излучений: справочник / Л. Р. Кимель, В. П. Машкович. – М.: Атомиздат, 1966. –311 с.
5. Бергельсон Б.Р., Зориков Г.А. Справочник по защите от излучения протяженных источников / Б.Р.Бергельсон, Г.А. Зориков. – М.: Атомиздат, 1965. – 215 с.
6. Нормативные материалы для таксации леса Белорусской ССР / В.Ф. Багинский [и др.]; под общ. ред. В.Ф. Багинского. – М.: ЦБНТИ-лесхоз, 1984. – 308 с.
7. Методы отбора проб продукции лесного хозяйства. - Минск: Минлесхоз, 1997. – 35 с.

CALCULATION OF THE EXTERNAL DOSE OF RADIATION IN FOREST PLANTATIONS

Dvornik A.M., Dvornik A.A.

A method for calculating doses of external radiation in forest plantations, based on the calculation algorithms to protect from sources of ionizing radiation. A configuration of radiation sources were developed. Calibration and verification of the proposed method was carried out on the basis of experimental measurements of the radiation dose to the power pine forest. Comparison of experimental and calculated data shows a satisfactory agreement. Forecast values received doses of external radiation in the pine forest on a remote period of time.

Статья поступила в редколлегию 15.03.2015 г.

