

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 614.876(476.2)
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2018-63-4-447-454>

Поступила в редакцию 15.02.2018
Received 15.02.2018

А. А. Дворник¹, А. М. Дворник²

¹Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Республика Беларусь

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ

Аннотация. В работе исследована структура источников ионизирующего излучения в лесных насаждениях, произрастающих в зонах радиоактивного загрязнения. Предложен метод оценки формирования дозы внешнего излучения в лесных сосновых насаждениях, основанный на расчете показателей защиты от протяженных источников ионизирующих излучений. Разработаны конфигурация источников излучения и алгоритмы модельных расчетов. Исходными данными для расчетов служили плотность радиоактивного загрязнения насаждения, возраст, порода дерева и тип леса. Конфигурацию и состав материала источников излучения определяли по таксационным характеристикам сосновых насаждений. Калибровку и верификацию предлагаемой модели проводили на опытных лесных объектах на основе экспериментальных измерений мощности дозы облучения разными методами. Путем сравнения полученных значений мощности экспозиционной дозы на сопряженных участках «луг–лес» экспериментально подтверждено существование так называемого «опушечного эффекта». Сравнение полученных данных и результатов модельных расчетов показывает их удовлетворительное согласие. Получен прогноз значений дозы внешнего облучения в сосновых насаждениях на отдаленный период времени.

Использование данного метода позволит повысить радиационную безопасность работников лесного хозяйства при проведении лесохозяйственных работ.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, лесные насаждения, источники излучения, доза излучения, модель, прогноз

Для цитирования: Дворник, А. А. Пространственное распределение ионизирующего излучения в лесных насаждениях, загрязненных радионуклидами / А. А. Дворник, А. М. Дворник // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 447–454. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2018-63-4-447-454>

A. A. Dvornik¹, A. M. Dvornik²

¹Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

²Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus

SPATIAL DISTRIBUTION OF IONIZING RADIATION SOURCES IN CONTAMINATED FOREST STANDS IN BELARUS

Abstract. Currently, there are critical ecosystems that accumulate radionuclides and determine the duration of radiation exposure on biota. The dose of external exposure caused by two factors – radioactive contamination of forest stands and the human behavior mode. In this work, authors represent the analysis of structure of ionizing radiation sources in forest stands at the territory with radioactive contamination. A method for estimating values of external radiation dose is based on calculation of protection against extended sources of ionizing radiation. A calculation data source is information on contamination density, wood species and forest type. We used taxation characteristics of pine stands to determine configuration and radiation sources composition. Calibration and verification of proposed model were carried out by dose rate in situ measurements by different methods. The results of comparison of the exposure dose rate in the meadow-forest areas confirmed the existence of the so-called “edge effect”. Experimental data is in a good agreement with the model calculations. A forecast of external exposure dose in pine forests for a remote period after the accident at ChNPP has been obtained. The method allows to improve radiation safety measures of forestry engineers, worked at forest sites.

Keywords: radioactive contamination, forest stands, radiation sources, exposure dose, model, forecast

For citation: Dvornik A. A., Dvornik A. M. Spatial distribution of ionizing radiation sources in contaminated forest stands in Belarus. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 447–454 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2018-63-4-447-454>

Введение. Радиоактивному загрязнению в результате чернобыльских выпадений 1986 г. подверглись все природные экологические системы на обширных территориях. На протяжении десятков лет они очищались благодаря физическим и природным процессам и под воздействием контрмер, предпринятых человеком. Однако и в настоящее время существуют критические экосистемы, аккумулирующие радионуклиды и определяющие длительные дозовые нагрузки на человека вследствие внешнего облучения и миграции радионуклидов по трофическим цепям [1, 2]. К таким критическим экосистемам относятся лесные биогеоценозы. Поведение радионуклидов в лесных экосистемах имеет свою специфику и отличается от поведения в других экосистемах, например луговых и аграрных. Корректный учет лесной специфики позволяет получить реальную картину воздействия загрязненных радионуклидами лесов на жизнедеятельность человека.

В формировании дозы внешнего облучения населения и персонала 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].

Цель настоящей работы – анализ источников внешнего излучения в лесных экосистемах, разработка метода оценки формирования дозы облучения и прогноз ее динамики.

Оценка дозы внешнего облучения, формируемой сосновыми насаждениями, и прогноз ее динамики проведены на основе расчетной 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 данными экспериментальных измерений.

Материалы и методы исследования. *Экспериментальные измерения.* Исследования проводили в 1998 г. в районе бывших населенных пунктов (б. н. п.) Пирки, Крюки, Желибор (территория Полесского государственного радиационно-экологического заповедника), а также на территории дальнего следа радиоактивного загрязнения – б. н. п. Закружье, Восток, Бартоломеевка.

На каждый участок методом конверта размером 20×20 м на высоте 1 м устанавливали по 5 термолюминесцентных дозиметров. Одновременно проводили измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД) дозиметром ДРГ-01Т и отбирали пробы почвы. Время экспозиции составило 60 дней.

Экспериментальные измерения МЭД выполняли с помощью газоразрядного дозиметра ДРГ-01Т (имеет действующее аттестационное свидетельство) и методом термолюминесцентной дозиметрии. Одновременно отбирали образцы почвы и определяли плотность радиоактивного загрязнения согласно методике, приведенной в работе [4]. Показания термолюминесцентных дозиметров обрабатывали в радиологической лаборатории ГУ «Гомельский областной центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья».

В соответствии с [5] значения мощности экспозиционной дозы и поглощенной дозы были пересчитаны в эквивалентную дозу с поправочными коэффициентами 0,7 мЗв/мкГр, если мощность поглощенной дозы гамма-излучения была выражена в мкГр/ч, и 0,0061 мЗв/мкР, если МЭД гамма-излучения была выражена в мкР/ч.

Для выявления особенностей формирования дозы излучения в лесных насаждениях и на открытой местности выбирали смежные участки на расстоянии 50 м от стены леса.

Распределение радионуклидов в лесных биогеоценозах. Распределение и перераспределение радионуклидов в сосновых биогеоценозах описывали с помощью модели FORESTLIFE [1], которая основывается на полученных экспериментальных данных многолетних наблюдений за распределением и перераспределением радионуклидов в компонентах лесного биогеоценоза.

В рамках этой модели определяли характер процесса миграции ^{137}Cs по почвенному профилю, используя двухкомпонентные квазидиффузионные и диффузионно-конвективные дифференциальные уравнения переноса вещества в неоднородных средах. Зная коэффициенты миграции и относительные вклады различных механизмов, можно рассчитать распределение радионуклидов по почвенному профилю в любой момент времени. Образцы подстилки отбирали в слоях A_0L и $A_0F + A_0H$, образцы почвы – послойно с толщиной слоя 1 см до глубины 20 см.

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

Исходными данными для модельных расчетов служили возраст, порода дерева и тип леса (а 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 проведения исследований нами выбран метод расчета дозовых нагрузок и защиты от ионизирующего излучения протяженных источников, применяемых на ядерно-энергетических установках [6, 7].

Для каждой формы источника и защиты с помощью уравнений, описывающих ослабление нерассеянного излучения в материале источника и защиты, определяли поток излучения и экспозиционную дозу. При этом источник рассматривали как пространственную структуру определенной геометрии. Неоднородность источников и защиты учитывали при проведении гомогенизации отдельных блоков. При расчетах вводили также поправки на многократное рассеяние излучения в материале источника, защиты и альbedo. Проводили численный расчет функций ослабления излучения для конкретных конфигураций источников и защиты.

Таксационные характеристики сосновых насаждений, описывающие форму и материал надземного источника излучения, взяты из работы [8].

Для верификации модели полученные результаты сравнивали с экспериментальными измерениями экспозиционной дозы, выполненными с помощью газоразрядного дозиметра ДРГ-01Т и методом термолюминесцентной дозиметрии. Измерения экспозиционной дозы проводили в различного возраста сосновых насаждениях мшистого типа.

При разработке алгоритмов одной из наиболее ответственных задач является определение структуры и геометрии источников на лесных объектах и приведение их к наиболее простым конфигурациям [6, 7]. Структура и пространственная конфигурация источников внешнего излучения лесного насаждения представлена в виде трех функциональных блоков: блока почвы, блока стволовой древесины, блока кроны (рис. 1).

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

Блок почвы представлен набором 20 таких пластин толщиной 1 см каждая. Они распределены по глубине почвы, причем излучение текущей пластины экранируется пластинами, лежащими

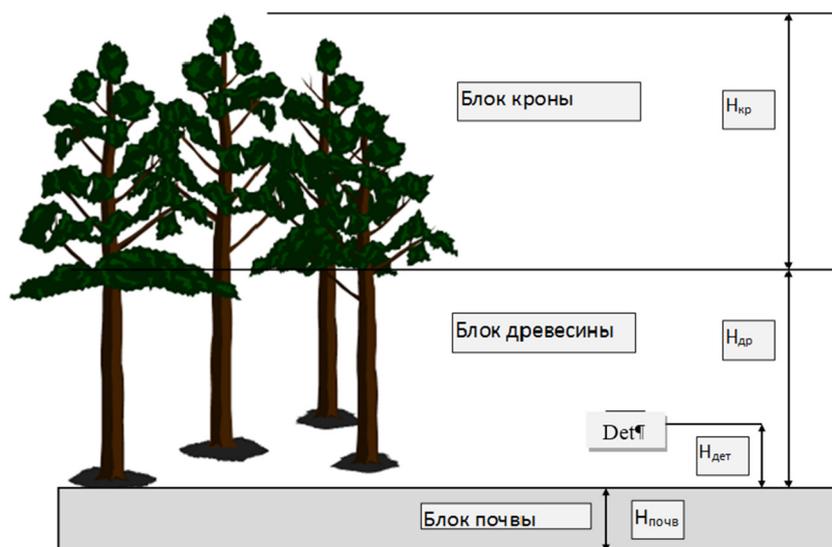


Рис. 1. Пространственная конфигурация источников внешнего излучения лесного насаждения.

$H_{кр}$ – толщина блока кроны, $H_{др}$ – толщина блока древесины, Дет – детектор, $H_{дет}$ – высота расположения детектора, $H_{почв}$ – толщина блока почвы

Fig. 1. Spatial configuration of external radiation sources in forest stands. $H_{кр}$ – thickness of the crown block, $H_{др}$ – thickness wood block, Дет – detector, $H_{дет}$ – altitude detector, $H_{почв}$ – soil block thickness

выше. Источник излучения находится внутри каждой пластины и имеет равномерное пространственное распределение. Интенсивность излучения от каждой пластины изменяется пропорционально экспериментальному 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 стволовой древесины и блок кроны представлены в виде гомогенной смеси древесины, воздуха, ветвей и хвои в соответствующих пропорциях.

Гомогенизация блока древесины производится на основании таксационных материалов [8], в которых определены такие характеристики лесных насаждений, как диаметр и высота стволов дерева, количество деревьев на единицу площади, долевой состав сучьев, хвои и древесины с учетом породы дерева, типа насаждения, его возраста и бонитета.

Детектор излучения в блоке древесины находится внутри блока на высоте $H_{\text{дет}} = 1$ м над нижней поверхностью блока. Источник излучения распределен равномерно в гомогенной смеси блока древесины. Активность радионуклида пропорциональна долевого вкладу стволовой древесины в гомогенную смесь. Высота блока древесины, определяемая расстоянием от почвы до начала кроны, является величиной переменной, которая изменяется в зависимости от породы, возраста, типа и бонитета лесного насаждения.

Блок кроны, как и блок древесины, рассчитываются аналогично. Размеры блока кроны изменяются в зависимости от характеристик насаждения.

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

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

Расчет дозы внешнего облучения от лесного насаждения. Наряду с нерассеянным излучением источника регистрируется также многократно рассеянное в среде излучение. Для фотонов это излучение учитывают с помощью фактора накопления. Последний зависит от многих переменных. В общем случае фактор накопления – это регистрируемый поток излучения, энергия фотонов, геометрия источника и защиты, материал и толщина защиты, взаиморасположение 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 состоит из суммирования доз от каждого компонента источника. При этом первая пластина отделена от детектора слоем воздуха толщиной 1 м, вторая – слоем почвы 1 см и слоем воздуха 1 м, и т. д.

Распределение активности между пластинами соответствует распределению ^{137}Cs по почвенному профилю и изменяется во времени согласно расчетам, полученным с помощью модели FORESTLIFE [1].

Многократное рассеяние излучения учитывается путем введения в расчетные формулы фактора накопления в экспоненциальном представлении Тейлора. Коэффициенты для расчета многократного рассеяния взяты из работы [4].

Расчет дозы внешнего облучения от блока древесины. Геометрия источника излучения от стволовой древесины представляется в виде полубесконечной пластины толщиной $H_{\text{др}}$ 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 [8] и зависят от характеристик лесных насаждений. Плотность древесины сосны принята равной $0,5 \text{ г/см}^3$, плотность воздуха – $0,00129 \text{ г/см}^3$.

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

Расчет дозы внешнего облучения от блока кроны. Геометрия источника излучения от кроны представляется в виде полубесконечной пластины толщиной $H_{\text{кр}}$ 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 [8] и зависят от характеристик лесных насаждений. Плотность древесины и сучьев сосны принята равной 0,5 г/см³, плотность воздуха – 0,00129 г/см³.

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

Более подробно модель FORESTLIFE (ее алгоритмы, формулы и параметры) представлена в [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 б. н. п. Закружье Ветковского района Гомельской области, со следующими лесоводственно-таксационными характеристиками: сосняк мшистый, состав 10С, возраст – 40 лет, тип почвы – дерново-подзолистая, песчаная. Плотность загрязнения по ¹³⁷Cs в почве – 1455 кБк/м², МЭД – 1,87 ± 0,30 мкЗв/ч. Соотношение доза/запас составляет 1,29·10⁻³ (мкЗв/ч)/(кБк/м²).

Для калибровочных расчетов использовали 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 модель FORESTLIFE, получаем расчетную мощность экспозиционной дозы, равную 1,78 мкЗв/ч.

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

Верификация метода и прогноз динамики внешней дозы. Для выбранных участков с учетом таксационных характеристик были проведены расчеты внешней дозы облучения по изложенной выше методике.

Для выявления особенностей формирования дозы излучения в лесных насаждениях и на открытой местности выбирали смежные участки на расстоянии 50 м от стены леса. Модельные расчеты МЭД для опытных участков выполняли с учетом конкретных лесотаксационных характеристик лесных насаждений. Сравнение экспериментальных и расчетных данных приведено в таблице.

Согласно приведенным в таблице данным, экспериментальные измерения мощности экспозиционной дозы двумя различными методами (с помощью дозиметра ДРГ 01Т и термолюминесцентной дозиметрии) 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 с уровнем значимости $p < 0,05$ ($t_{\text{факт}} < t_{\text{ст},0,05} = 2,23$) по критерию Стьюдента не противоречит экспериментальным значениям.

Сравнение показателей мощности дозы излучения в лесных насаждениях и на открытой местности показывает, что МЭД излучения в лесу систематически превышает этот показатель для открытой местности.

Нормированное соотношение мощности дозы и уровня загрязнения составляет для участков Пирки-лес и Пирки-луг 1,75·10⁻³ и 1,41·10⁻³ (мкЗв/ч)/(кБк/м²), для участков Крюки-лес и Крюки-

сельхозполе – $1,27 \cdot 10^{-3}$ и $0,93 \cdot 10^{-3}$, для участков Закружье-лес и Закружье-сельхозполе – $1,29 \cdot 10^{-3}$ и $0,85 \cdot 10^{-3}$ (мкЗв/ч)/(кБк/м²) соответственно.

Мощность экспозиционной дозы в сосновых насаждениях и на открытой местности
Exposure dose rate in pine stands and open areas

Участок	Мощность дозы, мкЗв/ч			Плотность загрязнения ¹³⁷ Cs, кБк/м ²	Критерий Стьюдента
	ДРГ	ТЛД	Расчет по модели		
Пирки, лес	2,38 ± 0,45	4,60	1,47	1245	1,44
Пирки, луг	1,61 ± 0,11	–	–	1140	–
Крюки, лес	6,76 ± 1,35	7,50	6,27	5291	0,21
Крюки, с/х поле	2,90 ± 0,24	–	–	3100	–
Желибор	8,34 ± 1,60	7,80	4,59	3870	1,78
Закружье, лес	1,87 ± 0,30	2,10	1,72	1455	0,25
Закружье, с/х поле	1,10 ± 0,12	–	–	1280	–
Бартоломеевка	1,16 ± 0,23	1,02	1,29	1088	0,29
Восток (Крушина)	1,11 ± 0,22	0,74	1,16	981	0,12
Восток	1,08 ± 0,20	0,72	0,89	751	0,57

Такое соотношение может быть следствием двух причин. Во-первых, так называемый «опушечный эффект». Древесная растительность характеризуется более высокой задерживающей способностью в отношении радиоактивных выпадений по сравнению с травянистой. «Опушечный эффект» проявляется в повышенном осаждении радионуклидов в кронах деревьев на опушках, смежных с безлесными участками. «Опушечный эффект» прослеживался на расстоянии 20–50 м от кромки леса.

Во-вторых, в почвах бывших сельскохозяйственных угодий вследствие обработки почвы разрушены естественные генетические горизонты по сравнению с луговыми системами. В пахотном горизонте (15–20 см) радионуклиды мигрировали глубже, чем в луговых почвах, которые не подвергались обработке. Отношение мощности экспозиционной дозы в системе «лес–поле» выше для сельхозугодий, чем для лугов.

В рамках предложенной модели сделан прогноз динамики внешней дозы на период 50 лет для 40-летних сосновых насаждений мшистого типа, произрастающих в зонах с уровнем радиоактивного загрязнения 185, 555, 1480 кБк/м² (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что наклон кривых одинаков для всех зон загрязнения. Основной вклад в снижение дозы внешнего облучения от лесов вносит радиоактивный распад. Это означает, что радио-

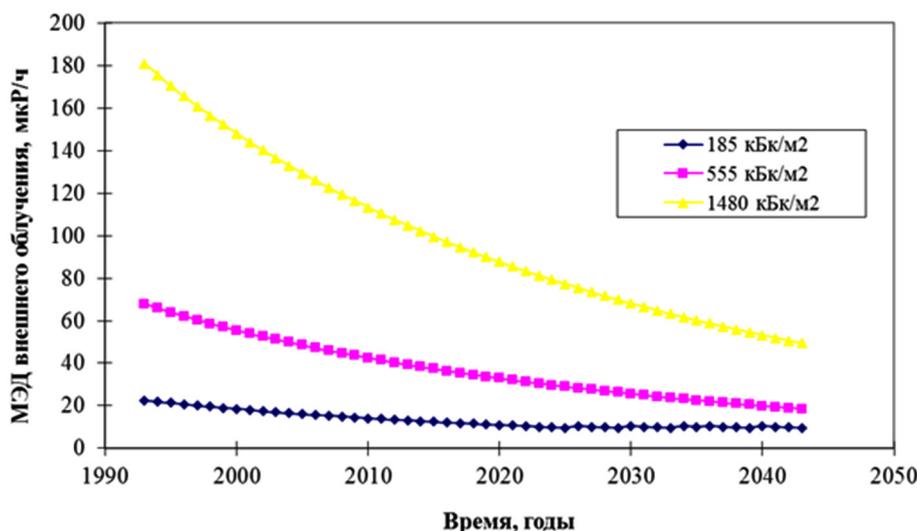


Рис. 2. Динамика мощности экспозиционной дозы облучения в сосновых насаждениях
 Fig. 2. Time's series of exposure dose rate in pine stands

активный распад является доминирующим механизмом, определяющим динамику внешней дозы облучения. Однако анализ поведения соотношения 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 или 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 автоморфных почвах. По предварительным оценкам, этот вклад может достигать 15–20 % в зависимости от реальных условий.

Заключение. В работе исследована структура источников ионизирующего излучения, представленная излучением от почвы, стволовой древесины и кроны, в лесных насаждениях, произрастающих в зонах радиоактивного загрязнения.

Предложен метод оценки формирования дозы внешнего излучения в лесных сосновых насаждениях, основанный на расчете показателей защиты от протяженных источников ионизирующих излучений. Разработаны конфигурация источников излучения и алгоритмы модельных расчетов.

Калибровку и верификацию предлагаемой модели проводили на опытных лесных объектах на основе экспериментальных измерений мощности дозы облучения разными методами.

Путем сравнения полученных значений мощности экспозиционной дозы на сопряженных участках «луг–лес» экспериментально подтверждено существование так называемого «опушечного эффекта».

Сравнение экспериментальных данных и результатов модельных расчетов показывает их удовлетворительное согласие ($p < 0,05$). Получен прогноз значений дозы внешнего облучения в сосновых насаждениях на отдаленный период времени.

Использование данного метода позволит повысить радиационную безопасность работников лесного хозяйства при проведении лесохозяйственных работ.

Благодарности. Результаты, представленные в данной статье, получены при выполнении задания ГПНИ 3.05 «Разработка дозовой модели оценки и прогнозирования индивидуальных доз внутреннего и внешнего облучения лиц, участвующих в пожаротушении и ликвидации последствий лесных пожаров в зонах радиоактивного загрязнения» на 2014–2016 гг.

Acknowledgements. The results presented in this article were obtained in the course of the assignment of the GPNI 3.05 “Development of a dose model for the assessment and prediction of individual doses of internal and external exposure of persons involved in firefighting and liquidation of the consequences of forest fires in zones of radioactive contamination” for 2014–2016.

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.]. – Гомель : Ин-т леса НАН Беларуси, 1999. – 452 с.
2. Щеглов, А. И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-лет. исслед. в зоне влияния аварии на ЧАЭС / А. И. Щеглов. – М. : Наука, 1999. – 266 с.
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. ТКП 251-2010 (02080). Радиационный контроль. Отбор и подготовка проб лесной продукции. Порядок проведения. – Минск : Минлесхоз, 2010. – 29 с.
5. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения : метод. указания : МУ 2.6.1.1088-02 / И. П. Стамат [и др.]. – М. : Федер. центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. – 22 с.
6. Кимель, Л. Р. Защита от ионизирующих излучений : справочник / Л. Р. Кимель, В. П. Машкович. – М. : Атомиздат, 1966. – 311 с.
7. Бергельсон, Б. Р. Справочник по защите от излучения протяженных источников / Б. Р. Бергельсон, Г. А. Зорикоев. – М. : Атомиздат, 1965. – 175 с.
8. Нормативные материалы для таксации леса Белорусской ССР / под ред. В. Ф. Багинского. – М. : ЦБНТИ-лесхоз, 1984. – 308 с.

References

1. Ipat'ev V. A., Baginskii V. F., Bulavik I. M., Dvornik A. M., Volchkov V. E., Goncharenk, G. G., Podzharov V. K., Bulko N. I., Bordok I. V., Volovich P. I., Gedykh V. B., Grimashevich V. V., Didenko L. G., Esimchik L. D., Zhuchenko T. A., Keizer G. I., Kovalevich A. I., Kozhevnikov A. M., Kolodii P. V., Kopytkov V. V., Krushev L. T., Marchenko Ya. I., Mitin N. V., Padutov A. E., Padutov V. E., Perevolotskii A. N., Pikulik M. M., Sidor A. I., Silin A. E., Stepanchik V. V., Tarasenko V. P., Trukhonovets V. V., Usenya V. V., Fomina V. I., Khotyleva L. V., Chunikhin L. A., Shevchuk V. E., Yatsyna A. A. *Forest. Human. Chernobyl. Forest ecosystems after the Chernobyl accident: status, forecast the reaction of the population, the way rehabilitation*. Gomel, Publishing house of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 1999. 452 p. (in Russian).
2. Shcheglov A. I. *Biogeochemistry of technogenic radionuclides in forest ecosystems: based on the materials of a 10-year study in the zone of influence of the Chernobyl accident*. Moscow, Nauka Publ., 1999. 266 p. (in Russian).
3. Shevchuk V. E. *Assessment of factors shaping the internal dose for the population affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant*. Abstract of Ph. D. diss. Minsk, 1995. 14 p. (in Russian).
4. ТКР 251-2010 (02080). *Radiation control. Sampling and sample preparation of forest products. The procedure for holding*. Minsk, Minlesrhoz, 2010. 29 p. (in Russian).
5. Stamat I. P., Barkovskii A. N., Krisyuk E. M., Ivanov S. I., Perminova G. S., Lipatova O. V. *Assessment of individual effective doses of the population due to natural radiation sources: methodical instructions. MU 2.6.1.1088-02*. Moscow, Publishing house of the Federal Center for Sanitary and Epidemiological Supervision of the Russian Ministry of Health, 2002. 22 p. (in Russian).
6. Kimel' L. R., Mashkovich V. P. *Protection against ionizing radiation: a handbook*. Moscow, Atomizdat Publ., 1996. 311 p. (in Russian).
7. Bergel'son B. R., Zorikoev G. A. *Handbook on the protection against radiation of extended sources*. Moscow, Atomizdat Publ., 1965. 175 p. (in Russian).
8. Baginskii V. F. (ed.). *Regulatory materials for forest inventory of the Byelorussian SSR*. Moscow, Publishing house of the Central Bureau of Scientific and Technical Information, 1984. 308 p. (in Russian).

Информация об авторах

Дворник Александр Александрович – канд. биол. наук, науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246000, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: aadvornik@yandex.ru

Дворник Александр Михайлович – д-р биол. наук, профессор. Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины (ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: advornik@gsu.by

Information about the authors

Alexander A. Dvornik – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: aadvornik@yandex.ru

Alexander M. Dvornik – D. Sc. (Biol.), Professor. Francisk Skorina Gomel State University (104, Sovetskaya Str., 246019, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: advornik@gsu.by