

## КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

**Дворник А.М., Дворник А.А.**

*УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»  
(г. Гомель, Беларусь)*

*ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси»  
(г. Гомель, Беларусь)*

*В работе приводятся результаты моделирования поведения долгоживущих радионуклидов в лесных экосистемах после аварии на Чернобыльской АЭС. Разработана система радиоэкологической оценки лесных экосистем после крупномасштабных ядерных аварий. Она включает методы прогнозирования и математические модели, которые описывают динамику уровней радиоактивного загрязнения лесных экосистем и доз облучения населения от леса и лесных продуктов, расчет пирологических характеристик лесного пожара и параметров переноса дымового облака, расчет доз внешнего и внутреннего облучения участников пожаротушения и расчета доз внутреннего облучения населения прилегающей территории. Экспериментальные данные получены на базовой сети лесных стационаров долговременного наблюдения. Разработана информационно-аналитическая система FORESTLIFE и ее компьютерное приложение. Она создает научную основу для разработки системы принятия решений по управлению лесным хозяйством на загрязненных радионуклидами территориях, оценки, анализа и прогнозов последствий ядерных аварий, принятия защитных действий и контрмер.*

### ВВЕДЕНИЕ

С момента Чернобыльской катастрофы прошло 30 лет. Много это или мало? С точки зрения продолжительности человеческой жизни – это почти половина. С точки зрения последствий ядерной катастрофы – это незначительный период. Лесные экосистемы выполняют свои природные функции и являются естественным барьером на пути потоков радионуклидов и препятствуют их вторичному перераспределению. Леса проявили себя, как аккумулятор радиоактивных выпадений, накопив большое количество радионуклидов. За 30 лет площадь загрязненных лесных земель снизилась с 25% до 18%.

Ликвидация последствий радиационных аварий проходит три необходимые стадии:

- сбор и накопление экспериментальных данных, оценка масштабов загрязнения;
- выявление и анализ основных закономерностей поведения радионуклидов в различных природных средах, моделирование и прогнозирование развития радиационной ситуации;
- разработка эффективных мероприятий ликвидации последствий радиоактивного загрязнения.

Для изучения поведения радионуклидов в лесных экосистемах в Институте леса Национальной академии наук Беларуси под руководством академика В.А. Ипатьева создан коллектив ученых, который с первых дней катастрофы начал радиационные исследования. Среди них были доктора наук И.М. Булавик, А.М. Дворник, А.Н. Переволоцкий, кандидаты наук Н.И. Булко, Т.А. Жученко, Н.В. Митин и другие. Позже радиоэкологические исследования были продолжены УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины», ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси», РНИУП «Институт радиологии» МЧС Республики Беларусь.

Результаты исследования поведения радионуклидов в лесных экосистемах опубликованы в 5 монографиях, сотнях статей в научных журналах, сборниках и конференциях, реализованы в виде методик, практических рекомендаций, патентов.

Исследования выполнялись в рамках крупных научных программ:

- государственной программы преодоления последствий катастрофы на ЧАЭС;
- государственной программы фундаментальных исследований Национальной академии наук Беларуси;
- государственной программы «Леса Беларуси»;
- государственной программы «Радиация и экосистемы», «Природно-ресурсный потенциал»;
- международное сотрудничество Европейская комиссия, Беларусь, Российская Федерация, Украина Project ECP-5, Project INCO-COPERNICUS FORECO;
- международных грантов Великобритании, Японии.

Широко развивалось сотрудничество с зарубежными учеными из США, Канады, Великобритании, Японии, Италии, Германии, Бельгии.

В данной работе мы хотели изложить результаты наших исследований по моделированию поведения радионуклидов в лесных экосистемах [1-10].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью выяснения основных закономерностей поведения радионуклидов в лесных экосистемах и прогнозирования динамики радионуклидов создана базовая математическая модель. Она строится на детальном изучении процессов перераспределения радионуклидов в лесном биогеоценозе, используя экспериментальные данные базовой сети лесных стационаров длительного наблюдения. Полученные на них экспериментальные данные имеют высокую статистическую обеспеченность, что значительно повышает достоверность научных результатов.

Исследования проводились как в ближней зоне загрязнения, 30 км вокруг ЧАЭС (ПГРЭЗ), так и дальней – территория Ветковского спецлесхоза, 150-200 км от ЧАЭС. Объекты подбирались с учетом плотности радиоактивного загрязнения территории, типа леса и его возрастных особенностей.

В отличие от традиционных методик, требующих сбора экспериментальных данных с целью моделирования в течение нескольких сезонов, нами разработана методика сбора данных за один сезон. Используя методологический подход, выполнено научное обоснование и создана сеть лесных стационаров долговременного наблюдения и населенных пунктов для проведения комплексной радиоэкологической оценки лесных экосистем после ядерных аварий.

На объектах определены запасы лесных горючих материалов (ЛГМ) и уровень их загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  для различных типов сосновых лесов. В соответствии разработанным нами методом сделана оценка динамики уровня загрязнения подстилки  $^{137}\text{Cs}$  с течением времени. Отбор дымовых аэрозолей и радиоактивных продуктов сгорания (РПС) и аэрозолей проводился при помощи устройства для сжигания твердых материалов и отбора проб для анализа веществ, находящихся в дыме.

Для оценки переноса радионуклидов с дымом лесных пожаров, случившихся на загрязненной радионуклидами территории, нами предложен новый способ такой оценки. Предлагаемый метод основан на проведении комплексного сравнительного анализа контролируемых параметров: данных радиационного контроля атмосферного воздуха, метеорологической обстановки в пунктах наблюдения, лесопожарной обстановки и радиационного контроля лесных экосистем.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате наших исследований на основе общего методологического подхода создана система математических моделей для комплексной радиоэкологической оценки лесных экосистем после крупномасштабных ядерных аварий, включающая в себя радиоэкологию загрязненных лесов и их влияние на население, прогнозирование и оценку эффективности системы защитных мероприятий, направленных на снижение радиационного риска.

Система математических моделей включает в себя следующие модули (рисунок):

- радиоэкологическую модель *FORESTLIFE* для расчета уровней загрязнения компонентов лесных насаждений;
- дозовую модель *FORESTDOSE\_EXTERNAL* для расчета доз внешнего облучения;
- дозовую модель *FORESTDOSE\_INTERNAL* для расчета доз внутреннего облучения от потребления даров леса;
- радиационно-пирологическую модель *FORESTFIRE TRANSFER* для расчета пирологических характеристик лесного пожара и параметров переноса дымового облака;
- дозовую модель *FORESTFIRE DOSE* для расчета доз внешнего и внутреннего облучения участников пожаротушения и расчета доз внутреннего облучения населения прилегающей территории.

Прогнозная математическая модель *FORESTLIFE* миграции радионуклидов в лесных насаждениях различного типа, позволяющая достоверно рас-

считывать динамику поведения радионуклидов на основе ограниченного количества исходных данных: плотность загрязнения, тип леса и его возраст.

В дозовой модели *FORESTDOSE\_EXTERNAL* для расчета доз внешнего облучения пространственная конфигурация источника излучения представлена в виде трех функциональных блоков: блок почвы; блок стволовой древесины; блок кроны.

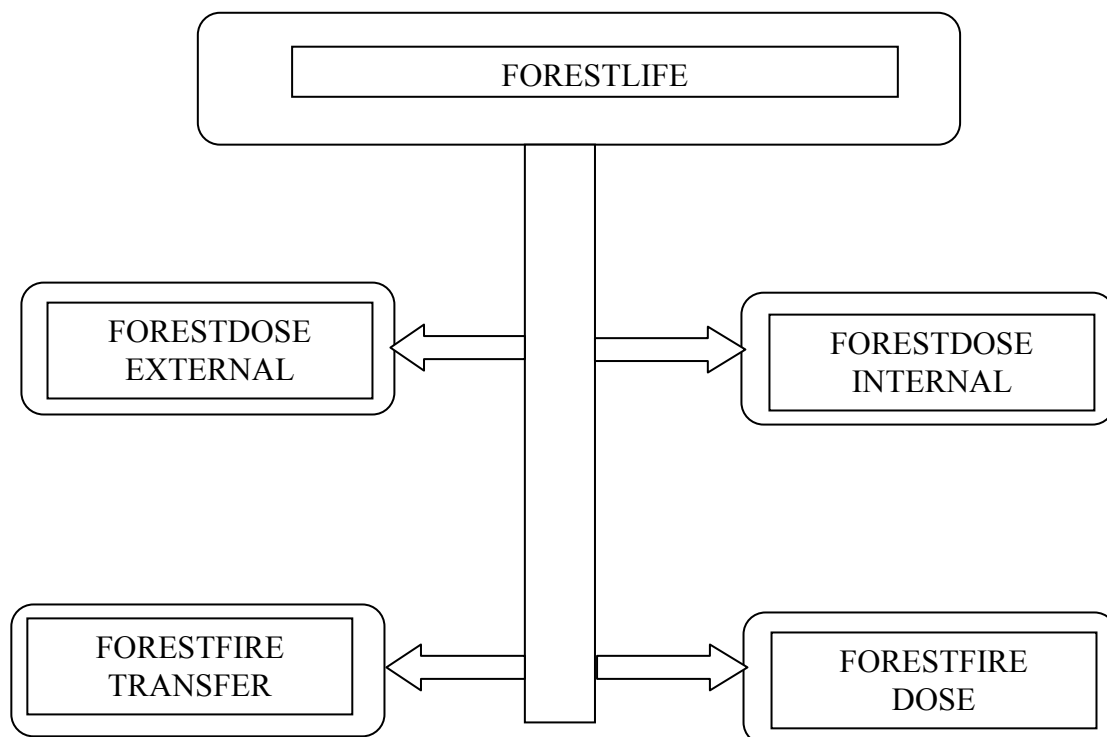


Рисунок – Схема комплексной модели *FORESTLIFE* поведения радионуклидов в лесных экосистемах

В дозовой модели *FORESTDOSE\_INTERNAL* для расчета доз внутреннего облучения от потребления даров леса использует три принципиальных положения:

- структура лесного окружения конкретного населенного пункта;
- средневзвешенную активность пищевой продукции леса;
- потребление пищевой продукции леса населением.

Радиационно-пирологическая модель *FORESTFIRE TRANSFER* для расчета пирологических характеристик лесного пожара и параметров переноса дымового облака является составной и построена по модульному принципу. В модели выделяется два основных подмодели: блок расчета радиоактивного загрязнения ЛГМ (модель *FORESTLIFE*) и блок расчета пирологических характеристик лесного пожара и параметров переноса дымового облака (модель *FORESTFIRE TRANSFER*).

Дозовая модель *FORESTFIRE DOSE* предназначена для расчета доз внешнего и внутреннего облучения участников пожаротушения и доз внутреннего облучения населения прилегающей территории.

В качестве исходных данных используются радиационно-лесоводственные характеристики сосновых насаждений, а также площадь и интенсивность пожара и скорость ветра.

На основе данной модели разработана информационно-аналитическая система *FORESTLIFE* и ее компьютерное приложение. Она создает научную основу для разработки системы принятия решений по управлению лесным хозяйством на загрязненных радионуклидами территориях, оценки, анализа и прогнозов последствий ядерных аварий, принятия защитных действий и контрмер.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате систематического изучения лесных экосистем, загрязненных радионуклидами после аварии на Чернобыльской АЭС, разработана система их радиоэкологической оценки после крупномасштабных ядерных аварий, включающая в себя методологию комплексных исследований, методы прогнозирования, математические модели, описывающие динамику уровней загрязнения лесных экосистем и доз облучения населения от леса и лесных продуктов, радиационно-пирологические характеристики лесных пожаров и дозы облучения участников пожаротушения и населения прилегающих территорий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В.А. Ипатьев, В.Ф. Багинский, И.М. Булавик, В.Е. Волчков, Г.Г. Гончаренко, А.М. Дворник [и др.]; под ред. В.А. Ипатьева. – Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 1999. – 452 с.
2. Дворник, А.М. Радиоэкологическая оценка лесных экосистем после ядерных аварий: методология, моделирование, прогноз: дис. ... д-ра биол. наук: 06.03.03, 03.00.16 / А.М. Дворник. – Гомель, 1998. – 288 л.
3. Дворник, А.М. Атмосферный перенос радионуклидов с дымом лесных пожаров / А.М. Дворник, А.А. Дворник // Сб. науч. тр. / Ин-т леса НАН Беларуси. – Гомель, 2007. – Вып. 67: Проблемы лесоведения и лесоводства. – с. 85-93.
4. Дворник, А.А. Радиационно-пирологическая модель атмосферного переноса  $^{137}\text{Cs}$  с дымом лесных пожаров в зонах радиоактивного загрязнения / А.А. Дворник, А.М. Дворник // Изв. Гомельск. гос. ун-та. им. Ф. Скорины. – 2013. – № 5 (80). – С. 71-77.
5. Ipatyev, V. Forest and Chernobyl: forest ecosystems after the chernobyl nuclear power plant accident: 1986-1994 / V. Ipatyev, I. Bulavik, V. Baginsky, G. Goncharenko, A. Dvornik // Journal of Environmental Radioactivity. - 1999. - Т. 42, № 1. - С. 9-38.
6. Schell, W.R. Model-directed sampling in Chernobyl forests: general methodology and 1994 sampling program / W.R. Schell, I. Linkov, V. Rimkevich, O.

Chistic, A. Lutsko, A.M. Dvornik, T.A. Zhuchenko // The Science of the Total Environment. - 1996. - Т.180, № 3. - С. 229-240.

7. Shaw, G. Modelling the behaviour of radiocaesium in forest ecosystems / G. Shaw, R. Avila, S. Fesenko, A. Dvornik, T. Zhuchenko // Radioactivity in the Environment. - 2003. -Т. 4, № С. - С. 315-351.

8. Yoshida, S. Equilibrium of radiocesium with stable cesium within the biological cycle of contaminated forest ecosystems / S. Yoshida, Y. Muramatsu, A.M. Dvornik, T.A. Zhuchenko, I.J. Linkov // Journal of Environmental Radioactivity. - 2004. - Т. 75. - С. 301.

9. Дворник, А.А. Модель формирования вторичного радиоактивного загрязнения прилегающей территории под влиянием лесных пожаров / А.А. Дворник, А.М. Дворник // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. - 2015. - № 1. - С. 73-77.

10. Дворник, А.А. Долгоживущие радионуклиды в почвенном покрове сосновых фитоценозов и их потенциальная опасность для человека при лесных пожарах / А.А. Дворник, Р.А. Король, А.М. Дворник // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. - 2015. - № 1-1 (67). - С. 16-24.

### **COMPLEX MODEL OF BEHAVIOR OF LONG-LIVED RADIONUCLIDES IN FOREST ECOSYSTEMS**

*Dvornik A.M., Dvornik A.A.*

*The work presents the results of modelling of long-lived radionuclides in forest ecosystems after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Developed a system of radioecological assessing forest ecosystems after large-scale nuclear accidents. It includes methods for forecasting and mathematical models that describe the dynamics of levels of radioactive contamination of forest ecosystems and the population irradiation doses from forests and forest products, radiation characteristics of forest fires and firefighting participants doses and the population of the surrounding areas. Experimental data obtained on a basic network of forest sites long-term observation. Developed information-analytical system of FORESTLIFE and its computer application. It creates a scientific basis for the development of a system for decision-making on forest management on the contaminated territories, evaluation, analysis and predictions of the consequences of nuclear accidents, taking protective actions and countermeasures.*

**Статья поступила в редколлегию 12.04.2016 г.**

