

УДК 574:539.1

А.А. Дворник

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА В ОЦЕНКЕ ПОСТУПЛЕНИЯ ЦЕЗИЯ-137 В ДРЕВЕСИНУ СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Изучены закономерности поступления ^{137}Cs в древесину сосны обыкновенной. В статье приводятся расчетные данные о динамике коэффициентов перехода на ближайший и отдаленный периоды. Прогноз показывает, что для древесины сосны период полуснижения поступления цезия-137 составляет 15–20 лет. На основании модельных расчетов разработаны две схемы определения уровней загрязнения древесины.

Введение

В течение длительного времени после аварии на Чернобыльской АЭС лесные экосистемы сохраняют высокий уровень радиоактивного загрязнения. Любая экосистема при воздействии на нее антропогенных факторов стремится к равновесному состоянию. Это фундаментальное правило экологии находит отражение в *принципе Ле Шателье – Брауна*: *при внешнем воздействии, выводящем систему из устойчивого равновесия, это равновесие смещается в направлении, при котором эффект внешнего воздействия ослабляется* [1].

Так, миграция радионуклидов в компонентах этих экосистем проходит несколько динамических стадий: от накопления до стабилизации и постепенного снижения. Направление миграции элементов в биогеоценозах зависит как от их природы, так и от почвообразовательных процессов. Радионуклиды либо фиксируются и накапливаются в почве, либо мобилизуются и выносятся с поверхностными и почвенными водами, лесной и луговой растительной продукцией. Таким образом, радионуклиды возвращаются обратно на поверхность почвы.

Долговременное поведение радионуклидов в естественных экосистемах трудно предсказать из-за изменения скорости вертикальной миграции и их биологической доступности со временем. Анализ процессов миграции радионуклидов дает важную информацию, необходимую для прогнозирования уровней загрязнения, изменений скоростей миграции и т.д. Качественный прогноз возможен только на основании математического моделирования.

Целью настоящего исследования является численная оценка закономерностей поступления изотопа ^{137}Cs в компоненты сосновых лесных насаждений и построение на ее основе схем определения уровней загрязнения древесины.

Материалы и методы

Объектом исследования являются лесные экосистемы, загрязненные в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Опытный объект расположен в районе населенного пункта Крюки Брагинского района Гомельской области на расстоянии 20 км от ЧАЭС. В качестве пробной площади был выбран наиболее распространенный в районах аварийных выбросов ЧАЭС сосняк мшистый.

Сосняк мшистый расположен на дерново-подзолистой оглеенной внизу песчаной почве, на водно-ледниковых связных песках, сменяемых рыхлыми песками с глубины 0,4 м. Некоторые таксационные характеристики пробной площади «Крюки» приведены в таблице 1.

Агрохимические показатели корнеобитаемого слоя почвы (0–15 см) пробной площади указывают на кислую реакцию среды ($\text{pH KCL} = 4,0$). Количество фосфора $\text{P}_2\text{O}_5 - 3,85$ мг/100 г почвы, калия $\text{K}_2\text{O} - 1,18$ мг/100 г почвы [2; 3].

Для отбора образцов лесных почв выбирают элементарный участок леса. Определение однородности участка по радиоактивному загрязнению проводилось путем измерения мощности эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения на высоте 1 м и 3–4 см от поверхности почвы в 10 точках, равномерно расположенных по территории участка. Результаты измерений наносятся на схему участка.

Таблица 1 – Таксационная характеристика пробной площади «Крюки»

Характеристика	Значение
Тип леса	Сосняк мшистый
Происхождение насаждения	Культура
Состав	10С
Возраст, лет	52
Диаметр, см	20,0
Высота, м	22,3
Полнота	0,9
Запас древостоя, м^3	300
Подрост	Нет
Подлесок	<i>Sorbus acuparia</i> .L. и <i>Frangula alnus</i> Mill
Тип почвы	Дерново-подзолистая, песчаная
Тип увлажнения	Автоморфный
Плотность загрязнения ^{137}Cs , кБк/м^2	2587,6

Однородным по радиоактивному загрязнению считается участок, на котором минимальное и максимальное значения МЭД не отличаются от среднего более чем на 50%, в противном случае участок разделяется на более мелкие участки, однородные по радиоактивному загрязнению [4].

Отбор проб почвы проводится с живым напочвенным покровом и лесной подстилкой стандартным пробоотборником почвы на глубину 200 мм по углам площадки размером 50×50 м, закладываемой в наиболее характерном для данного участка месте. Образцы почвы отбирались цилиндрическим буром диаметром 5 см до глубины 20 см. Образцы лесной подстилки отбирались на каждой пробной площади в шести точках квадратным пробоотборником размером 20×20 см. Подстилка разделяется на неразложившуюся, находившуюся над слоем мха, и полуразложившуюся, находившуюся в толще мха до минерального слоя почвы. Одинаковые по глубине слои смешивались, и таким образом готовились смешанные образцы почвы [5].

На этапе пробоподготовки почвенные образцы высушиваются до воздушно-сухого состояния при температуре 105°C . После сушки из пробы удаляют части растений и камешки размером более 1 см, затем пробу перемешивают и просеивают через металлическое сито. Подготовленный материал рекомендуется озолить до полного разложения органических веществ путем сжигания в муфельной электропечи при температуре от 400 до 450°C . Из подготовленной пробы методом квартования отбирали на-

вески, заполняя ими измерительные кюветы с максимально возможным уплотнением материала. Далее проба проверялась на однородность.

Почвенные и растительные образцы измерялись в воздушно-сухом состоянии. Измерения проводились с использованием гамма-спектрометра CANBERRA с полупроводниковым детектором Ge(Li) расширенного энергетического диапазона. Геометрия измерений: сосуд Маринелли объемом 1 л; цилиндрический сосуд диаметром 7 см, высотой 3,2 см, «дента». Полученные данные использовались для оценки поступления радиоактивного изотопа ^{137}Cs в древесину сосны обыкновенной.

Результаты и их обсуждение

Интенсивность поступления цезия-137 в древесные растения определяется рядом факторов: распределением ^{137}Cs по почвенному профилю, вертикальным распределением корневых систем в почве, содержанием биологически доступных форм ^{137}Cs в различных слоях почвенного горизонта.

Важнейшим этапом в определении уровней загрязнения древесины сосны является оценка экспериментальных данных о накоплении и распределении радионуклидов по компонентам соснового фитоценоза. Такая оценка проводится на основании рассчитанных коэффициентов перехода радионуклидов из почвы в различные компоненты сосны, а также их зависимости от возраста насаждений.

Древесина представляет собой хозяйственно ценную часть сосны и является объектом изучения. При моделировании поведения радионуклидов в древесине сосновых насаждений внимание акцентировалось на возрастную динамику коэффициентов перехода цезия-137 [6].

Предложенная характеристика была описана математической функцией с использованием метода наименьших квадратов. Для анализа использовались модуль нелинейного оценивания программного пакета STATISTICA 6.1 и приложение MS Excel. Для функции получены соответствующие коэффициенты. Аналитический вид уравнений приводится ниже.

Временная зависимость коэффициентов перехода радиоизотопа ^{137}Cs в древесину сосновых насаждений дает важнейшую информацию об особенностях поступления и аккумуляции радионуклида. Анализ экспериментальных данных и данных многолетних экспериментов других исследователей показывает выраженную тенденцию к увеличению поступления радионуклида цезия-137 в древесину на протяжении 10 лет после катастрофы. Рисунок 1 показывает динамику коэффициентов перехода ^{137}Cs в древесину сосны. Как видно, максимум поступления радионуклида приходится на 9–10 годы после аварии, что соответствует 1996–1997 году. Далее следует выраженная тенденция к снижению значений коэффициентов перехода.

Зависимость значений коэффициентов перехода от времени возможно описать составной математической функцией, которая будет иметь следующий аналитический вид:

$$Y = a \cdot t^b \cdot \exp(-c \cdot t), \quad (1)$$

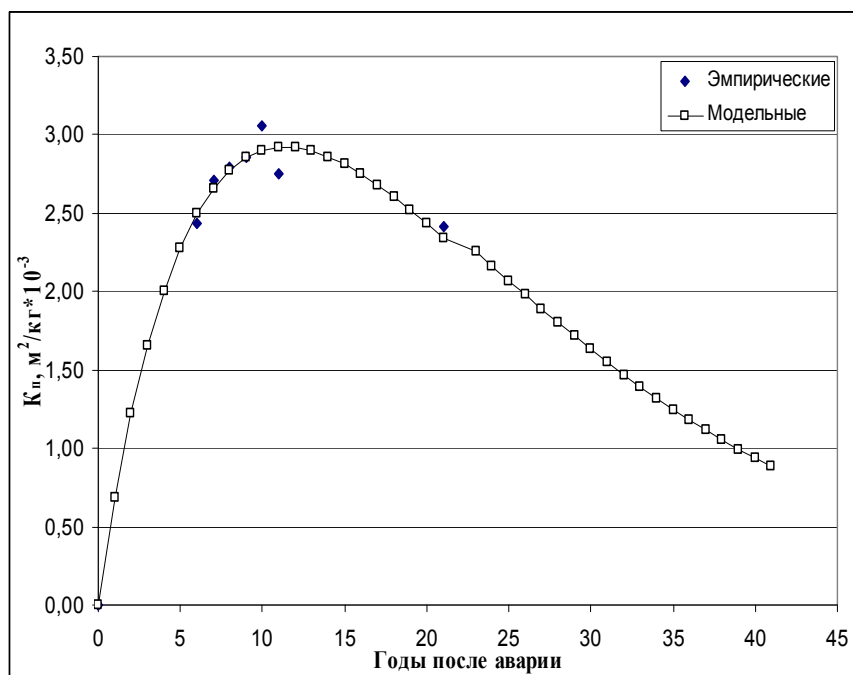
где Y – значения коэффициентов перехода, $\text{м}^2/\text{кг} \cdot 10^{-3}$;

t – время после аварии в годах;

a, b, c – коэффициенты в уравнении.

С учетом имеющихся коэффициентов уравнение принимает вид:

$$Y = 0,865 \cdot t^{0,953} \cdot \exp(-0,084 \cdot t) \quad (2)$$



**Рисунок 1 – Динамика коэффициентов перехода.
Модельные и эмпирические данные**

Валидация модели проверялась с использованием двухвыборочного F-теста на экспериментальных данных других авторов. Проверка показала, что модельные значения, полученные по приведенной выше аппроксимации, дают хорошее согласие с эмпирическими результатами (значение критерия Фишера, равное 0,41, при критическом значении $F = 0,23$).

Полученный модельный тренд позволяет провести расчет приблизительного периода полуснижения поступления цезия-137 в древесину сосны, т.е. время полупотерь из древесины за счет различных процессов, не связанных с физическим распадом. Расчет показывает, что для древесины сосны период полуснижения составляет 15–20 лет.

В настоящее время значительная часть лесных насаждений непригодна для заготовки лесной продукции из-за превышения действующих в Республике Беларусь нормативов на содержание в ней радионуклидов [7].

Особое практическое значение имеет прогнозирование уровней загрязнения древесины в сосновых насаждениях на территориях с неблагоприятной радиационной обстановкой с целью планирования лесохозяйственной деятельности на этой территории.

На основании анализа опубликованных данных и проведенных расчетов временной зависимости коэффициентов перехода были разработаны две схемы определения уровней загрязнения древесины.

Для расчетов удельной активности были выбраны следующие значения плотности загрязнения территорий: 15 Ки/км² (555 кБк/м²) и более 40 Ки/км² (более 1480 кБк/м²). Распределение удельной активности древесины сосны в зависимости от зон радиоактивного загрязнения приведено в таблице 2.

Модельные расчеты показывают, что для сосновых насаждений Беларуси динамика уровней загрязнения и, соответственно, планирование и возможность промышленного и хозяйственного использования древесины различны.

Таблица 2 – Распределение удельной активности древесины сосны в зависимости от зон радиоактивного загрязнения

Год	Удельная активность древесины сосны, кБк/кг	
	555 Бк/м ²	более 1480 Бк/м ²
1992	1385	3693
1997	1623	4328
2007	1300	3468
2012	1047	2796
2020	693	1847

Если на представленные в таблице 2 модельные расчеты уровней загрязнения наложить нормативы содержания ¹³⁷Cs в продукции лесного хозяйства [8; 9], то можно определить сроки заготовки древесины сосны различного хозяйственного назначения для двух зон радиоактивного загрязнения. Графически динамику уровней загрязнения древесины можно представить в виде рисунка 2.

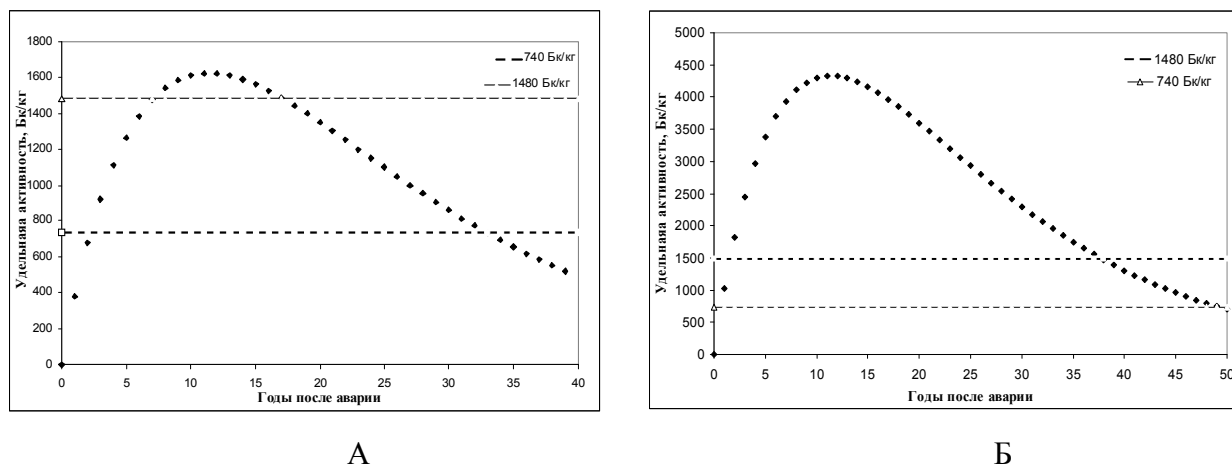


Рисунок 2 – Оценка удельной активности древесины при различных уровнях плотности загрязнения: А – 555 Бк/м²; Б – 1480 Бк/м² и более

Для пояснения можно воспользоваться нормативом допустимой концентрации ¹³⁷Cs в древесине, равным 740 Бк/кг и применяемым для пиломатериалов, изделий и деталей из древесины и древесных материалов при строительстве (внутренняя обшивка стен) жилых зданий. Рисунок 2А показывает, что заготовку древесины сосны для указанных нужд при плотности загрязнения 15 Ки/км² можно проводить через 33 года после аварии, т.е. не ранее 2019 г. Для норматива допустимой концентрации ¹³⁷Cs 1480 Бк/кг, применяемого для древесного технологического сырья, сосну (при той же плотности загрязнения) можно использовать для заготовки начиная уже с 2003 г.

Аналогично определяется период снижения удельной радиоактивности древесины при уровне плотности загрязнения, равном 40 Ки/км² и выше.

Таким образом, представленные данные также могут быть использованы для оценки потерь древесных ресурсов и экономического ущерба лесного хозяйства в зонах с неблагоприятной радиоактивной обстановкой.

Заключение

1. С использованием математической формулы (1) спрогнозирована динамика коэффициентов перехода на ближайший и отдаленный периоды после аварии.

2. На основании проведенных модельных расчетов временной зависимости коэффициентов перехода были разработаны две схемы определения уровней загрязнения древесины.

3. В результате проведенных исследований получены следующие данные:

а) для норматива допустимой концентрации ^{137}Cs в древесине 740 Бк/кг, применяемого для пиломатериалов, изделий из древесины и древесных материалов для внутренней обшивки стен жилых зданий, при плотности загрязнения 555 Бк/м² заготовку древесины сосны можно проводить через 33 года после аварии, т.е. не ранее 2019 года;

б) для норматива допустимой концентрации ^{137}Cs 1480 Бк/кг, применяемого для древесного технологического сырья, сосну (при той же плотности загрязнения) можно использовать для заготовки начиная уже с 2003 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николайкин, Н.И. Экология : учебник для вузов / Н.И. Николайкин, Н.Е. Николайкина, О.П. Мелехова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2003. – 624 с.
2. Дворник, А.А. Динамика миграции радионуклидов в компонентах лесного биогеоценоза / А.А. Дворник // Творчество молодых 2008 : сб. науч. работ студентов и аспирантов УО «ГГУ им. Ф. Скорины» // М-во образования РБ, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины : в 2 ч. / редкол.: О.М. Демиденко (отв. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ имени Ф. Скорины, 2008. – С. 7–9.
3. Вильдфлуш, И.Р. Практикум по агрохимии : учеб. пособие для с.-х. вузов / И.Р. Вильдфлуш, С.П. Кукреш, С.Ф. Ходянкова; под ред. И.Р. Вильдфлуша. – Минск : Ураджай, 1998. – 270 с.
4. Голубев, Б.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений / Б.П. Голубев. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 336 с.
5. Инструкция по проведению обследования участков заготовки продукции лесного хозяйства или сырья, отбору и подготовке проб для контроля радиоактивного загрязнения. – Минск : Минлесхоз РБ, 1998. – 48 с.
6. Алексахин, Р.М. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах / Р.М. Алексахин, М.А. Нарышкин. – М. : Наука, 1977. – 144 с.
7. Behaviour of radionuclides in natural and seminatural environments / M. Belli [et.al.]. – Brussels – Luxemburg : ECSC-EC-EAEC, 1996. – 147 p.
8. Дворник, А.А. Накопление радиоцезия в фитомассе сосновых насаждений / А.А. Дворник // Студенческая наука – 2008 : регион. науч.-практ. конф., Могилев, Беларусь, 15 апреля 2008. – Могилев, МГУ им. А.А. Кулешова, 2008. – 20 с.
9. Министерство здравоохранения Республики Беларусь. Республиканские допустимые уровни содержания цезия-137 в древесине, продукции из древесины и древесных материалов и прочей непищевой продукции лесного хозяйства : РДУ/ЛХ-2001. – Введ. 11.01.01. – Минск : М-во здравоохранения Респ. Беларусь, 2001. – 5 с.

Dvornik A.A. Usage of Mathematical Apparatus in Estimation of the Inflow of Caesium-137 in Pine Wood

A mathematical model based on the consideration of a woody plant as a living and growing organism was created. Predictions of the dynamics of contamination levels in the compartments of the phytocoenosis were calculated. The transfer activity of radionuclide reaches its theoretical maximum in 4–14 years. The value of biological transfer factor is reduced by half in comparison to the maximum within 15–20 years.

Рукапіс паступіў у рэдкалегію 20.09.2011