

В. В. ГОЛОВЕШКИН, С. А. КАЛИНИЧЕНКО,
Р. А. НЕНАШЕВ, В. Л. БОРИСЕНКО, А. Н. ЧУДИНОВ

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА И ИНТЕНСИВНОСТИ
АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ
НА ПАРАМЕТРЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ
В ПОЧВАХ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС**

*Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,
г. Хойники, Республика Беларусь,
goloveshkin.victor@yandex.ru*

Результаты наших исследований подтвердили наличие взаимосвязи между параметрами вертикальной миграции радионуклидов в почвах и метеорологическими показателями (суммой и интенсивностью атмосферных осадков). Определили, что скорость вертикальной миграции радионуклидов составила для ^{137}Cs 0,19 – 0,48 см/год; ^{90}Sr 0,31 – 0,60 см/год и ^{241}Am 0,16 – 0,33 см/год.

Ключевые слова: почва, вертикальная миграция, радионуклиды, осадки, режим увлажнения.

Почва является сложной и многокомпонентной системой депонирующей различные токсиканты, в частности, радиоактивные изотопы, которые могут по пищевым цепочкам попадать в организм человека [5, 6]. Распределение радионуклидов в почве во многом определяет их биологическую доступность, накопление в растениях, а также радиационную обстановку в наземных экосистемах. Миграционные способности радионуклидов в почве и их включения в биологические циклы определяются большим количеством свойств самих радионуклидов, почвы, различными факторами окружающей среды [1]. Среди факторов, определяющих поведения радионуклидов в почве, особый интерес представляют погодно-климатические условия. На процессы, протекающие в почве, определенным образом влияют как количество, так и распределение атмосферных осадков. Атмосферные осадки играют значительную роль при конвективном переносе радионуклидов в почве и диффузии свободных и адсорбированных ионов. Атмосферные осадки, поступающие в почву, растворяют минеральные и органические соединения, перемещают их в нижние горизонты. Под воздействием атмосферных осадков происходят процессы гидролиза первичных минералов и формирование вторичных глинистых минералов. Атмосферные осадки прямо и опосредованно влияют на процессы гумификации и формирования генетических горизонтов почвы. Характер атмосферных осадков на данной территории влияет на термический режим почв [2].

Целью исследований в 2021 году являлось изучение особенностей вертикального распределения радионуклидов в почвах зоны отчуждения в зависимости от режима увлажнения.

Исследования проводились на пяти пунктах наблюдения (ПН) Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, характеризующихся различной степенью увлажнения и уровнем радиоактивного загрязнения. ПН-1 – березняк: расположен в закрытой ложбине, где в весенний период грунтовые воды находятся на уровне 15 см от поверхности почвы. Почва дерново-подзолистая с расположенным под подстилкой оторфованным гумусовым горизонтом (5-15 см). ПН-2 – черноольшаник: расположен на берегу ручья. Почва торфянисто-подзолисто-глеевая. В черноольшанике в весенний период уровень грунтовых вод составляет 25 см. ПН 3 – дубрава: расположена на берегу искусственного затопления, образованного в результате перекрытия Погонянского канала. Уровень стояния грунтовых вод в дубраве составляет 40 см. Почва дерново-подзолистая глеевая. ПН 4 – залежь: представлена суходольным лугом. Почва дерново-подзолистая, супесчаная, слабоподзоленная, пахотная. Глубина залегания грунтовых вод около 150 см. ПН 5 – сосняк: почва дерново-подзолистая, песчаная. Глубина залегания грунтовых вод – 250 см.

По условиям увлажнения почвы березняка и черноольшаника – гидроморфные, дубравы – полугидроморфные, залежи и сосняка – автоморфные.

Отбор проб почвы проводился по почвенному разрезу послойно: верхний слой 0-10 см с интервалом 1 см, далее – с интервалом 5 см (10-30 см) и 10 см (30-100 см). Образцы подстилки отбирались по схеме 50x50 см. Образцы почвы отбирались на глубину 100 см.

В лабораторных условиях пробы подстилочного слоя, дернины и почвы высушивались при температуре 20-25 °С. По окончании пробоподготовки образцы помещались в сосуды «Маринелли» (объем 1 л), или "денты" (0,1 л) для последующего определения радионуклидов. Определение удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах проводили инструментальным методом на γ -спектрометре "МКС-АТ1315" (Атомтех, Беларусь) с блоком детектирования для регистрации γ -излучения на основе сцинтилляционного кристалла NaI (ТI) размерами $\varnothing 63 \times 63$ мм с погрешностью измерений не более 20 %. Для регистрации β -излучения использовался органический сцинтиллятор на основе полистирола, активированного паратерфинилом, размерами $\varnothing 128 \times 9$ мм [3]. Измерения ^{241}Am проводили на γ -спектрометре "Canberra" (Canberra Industries, Inc., USA) с детектором из особо чистого германия с композитным углеродным окном с регистрацией. γ -излучения в диапазоне энергий 20 – 2000 кэВ с погрешностью не более 25 % [4].

Для оценки параметров вертикальной миграции радионуклидов в почвах использовался расчетный показатель центра запаса радионуклида, который рассчитывался по следующей формуле:

$$\text{Центр запаса радионуклида (см)} = \frac{\sum (A_i \times L_i)}{\sum (A_i)},$$

где A_i – плотность загрязнения i -го слоя почвы, кБк/м²;

L_i – глубина залегания i -го слоя почвы от поверхности, см.

Измерения количества осадков и определение их интенсивности производилось в соответствии с ТКП (техническим кодексом установившейся практики) – «Правила проведения приземных метеорологических наблюдений и работ на станциях» [7].

Математическая и статистическая обработка результатов исследования осуществлялась на персональном компьютере с помощью программы Microsoft Excel.

Общей особенностью вертикального перемещения радионуклидов в лесных почвах является то, что в их органогенном слое (подстилке) и минеральной толще перераспределение радионуклидов протекает с различной интенсивностью и определяется доминированием различных процессов. Органогенный слой лесных почв является своего рода биогеохимическим барьером на пути вертикальной миграции радионуклидов, от удерживающей способности которого зависит содержание нуклидов в минеральной части почвы. В подстилке перемещение радиоактивных элементов вглубь почвенного профиля происходит, в основном, за счет ежегодного поступления на поверхность почвы относительно более чистого растительного опада, в то время как в минеральной толще только в результате протекания миграционных процессов. По полученным нами данным, в настоящее время в органогенном слое лесных почв сосредоточено 2,8 – 15,1 % ^{137}Cs , 1,3 – 11,8 % ^{90}Sr и 1,9 – 11,0 % ^{241}Am . На залежи естественно вся активность сосредоточена в гумусово-подзолистом горизонте.

Максимальное содержание радионуклидов минеральной части почв лесных биоценозов наблюдается в верхнем слое. 0-1 см: 9,2 – 26,4 % ^{137}Cs , 7,7 – 24,4 % ^{90}Sr и 14,4 – 27,9 % ^{241}Am . В почве залежи наибольшая плотность загрязнения находится в слое 1-2 см: 18,0 % ^{137}Cs , 16,9 % ^{241}Am и 16,3 % ^{90}Sr .

В верхнем 5-сантиметровом слое минеральной части почвы сосредоточена основная доля ^{137}Cs (43,5 – 66,8 %) и ^{241}Am (58,7 – 64,9 %), а в десятисантиметровом слое содержится от 68,5 до 83,5 % ^{90}Sr .

В полугидроморфных и гидроморфных почвах в слое 10-15 см содержится 3,7 – 6,2 % ^{137}Cs , 5,2 – 5,8 % ^{90}Sr , 3,2 – 3,8 % ^{241}Am . Для автоморфных почв эти данные составляют 1,7 – 4,3 %, 4,3 – 5,0 %, 4,4 – 4,8 % соответственно. В слой 15-20 см мигрировало в почвах с избыточным увлажнением до 3,3 % ^{137}Cs , 4,6 % ^{90}Sr , 3,5 % ^{241}Am . Для почв с автоморфным режимом увлажнения эти показатели имели значения 2,4 %, 3,7 и 3,5 % соответственно. В 20-25-сантиметровом слое полугидроморфных и гидроморфных почв фитоценозов сосредоточено 2,1 – 2,5 % ^{137}Cs , 2,8 – 4,3 % ^{90}Sr и 2,6 – 3,3 % ^{241}Am . Для автоморфных почв процентное содержание радионуклидов в данном почвенном слое было 0,9 – 2,0 %, 2,5 – 2,6 % и 2,4 % соответственно. В слое 25-30 см находилось до 2,2 % ^{137}Cs , 3,9 % ^{90}Sr и 2,9 % ^{241}Am .

Во всех почвах пунктов наблюдения в слой 30-100 см мигрировало не более 6,9 % ^{137}Cs и 11,5 % ^{90}Sr . ^{241}Am в этих слоях почвы не обнаружен.

Результаты расчета центров запаса радионуклидов в почвах пунктов наблюдения с различным режимом увлажнения представлены ниже (таблице 1).

Таблица 1 – Глубина проникновения 50 % запаса радионуклидов в почвах с различным режимом увлажнения

Тип почвы	Глубина слоя, см		
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am
Гидроморфные	8,50 – 11,49	13,74 – 18,67	6,79 – 7,02
Полугидроморфные	7,86	9,72	6,57
Автоморфные	6,30 – 6,99	8,00 – 8,50	6,26 – 6,33

В автоморфных почвах (сосняк, залежь) максимум концентрации ^{137}Cs находится на глубинах 6,30 – 6,99 см, а в полугидроморфных и гидроморфных почвах на глубине 7,86 см и 8,50 – 11,49 см соответственно.

Большой подвижностью обладает ^{90}Sr , что усиливается в условиях избыточного увлажнения почв. Глубина проникновения 50 % ^{90}Sr в почвах с избыточным увлажнением составляет 9,72 – 18,67 см, тогда как в автоморфных почвах 8,00 – 8,50 см. Положение центров запаса ^{241}Am варьировало в пределах от 6,26 до 7,02 см.

Данные по скорости вертикальной миграции радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am) по профилю почв пунктов наблюдения отображены ниже (таблице 2).

Таблица 2 – Скорость вертикальной миграции радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am) по профилю почв, см/год

Тип почвы	Скорость миграции, см/год		
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am
Гидроморфные	0,45 – 0,48	0,58 – 0,60	0,27 – 0,33
Полугидроморфные	0,35	0,45	0,25
Автоморфные	0,19 – 0,25	0,31 – 0,38	0,16 – 0,20

Скорость миграции медианного содержания ^{137}Cs составила для автоморфных почв 0,19 – 0,25 см/год, для полугидроморфных – 0,35 см/год и гидроморфных почв 0,45 – 0,48 см/год. Следует отметить, что скорость вертикальной миграции ^{90}Sr в 1,2 – 1,6 раз превышает скорость миграции ^{137}Cs и составляет 0,31 – 0,38 см/год, 0,45 и 0,58 – 0,60 см/год соответственно. Скорость миграции ^{241}Am находится на уровне 0,16 – 0,20 см/год, 0,25 и 0,27 – 0,33 см/год соответственно. Это объясняется более низкими мобильными свойствами ^{241}Am и высокой способностью образовывать комплексы с веществами почвенного комплекса. В дальнейшем также необходимо учитывать постоянное увеличение со временем

содержания ^{241}Am в почве вследствие физического распада ^{241}Pu , что может отразиться на характеристиках вертикального распределения.

Для исследования влияния атмосферных осадков на параметры вертикальной миграции были использованы два расчетных показателя – сумма осадков и их интенсивность. В качестве климатической характеристики интенсивности осадков применялась плотность осадков. Она вычисляется как среднее количество осадков, выпавшее в день с осадками. Сумма осадков в текущем году составила 505,7 мм, а их плотность 0,19 мм. В ходе проведенного корреляционного анализа данных доказано, что величина скорости вертикальной миграции радионуклидов в почвах зависит от суммы атмосферных осадков: расчетный коэффициент линейной корреляции Пирсона составлял 0,66 для ^{137}Cs и 0,61 для ^{90}Sr при уровне значимости менее 0,05 и критическом значении корреляции Пирсона 0,58 для ^{137}Cs и ^{90}Sr . Для ^{241}Am коэффициент линейной корреляции Пирсона составлял 0,59 при уровне значимости менее 0,05 и критическом значении корреляции Пирсона 0,50. Степень корреляционной связи для всех радионуклидов средняя ($r > 0,50 - 0,69$).

Результаты корреляционного анализа показали, что плотность осадков также оказывала определенное влияние на параметры миграции радионуклидов в почве. Коэффициент линейной корреляции Пирсона составлял 0,87 для ^{137}Cs , 0,75 для ^{90}Sr и 0,55 для ^{241}Am при уровне значимости менее 0,05 и критических значениях корреляции Пирсона 0,81, 0,71 и 0,63 соответственно. Степень корреляции для ^{137}Cs и ^{90}Sr ($r > 0,70$), а для ^{241}Am средняя ($r > 0,50 - 0,69$).

Таким образом, на особенности вертикального распределения и параметры миграции радионуклидов по профилю почв существенное влияние оказывает режим увлажнения почв. В почвах с избыточным увлажнением глубина проникновения радионуклидов более высокая и зависит от степени насыщенности влагой, что усиливает процессы диффузионного и конвективного переноса. Определено, что наиболее интенсивно мигрирует вглубь по профилю почв ^{90}Sr (0,35–0,64 см/год) и значительно слабее ^{241}Am (0,18–0,35 см/год), и ^{137}Cs (0,21–0,51 см/год). Это объясняется тем, что основное количество ^{241}Am и ^{137}Cs в почвах находится в прочнофиксированном состоянии. Корреляционным анализом данных подтверждено наличие взаимосвязи между параметрами вертикальной миграции радионуклидов в почвах пунктов наблюдения и погодно-климатическими условиями (суммой и интенсивностью атмосферных осадков).

Список литературы

1 Василенко, И. Я. Радиоактивный цезий / И. Я. Василенко // Природа. – 1999. – № 3. – С. 70–76.

2 Марчик, Т. П. Почвоведение с основами растениеводства : учеб. пособие / Т. П. Марчик, А. Л. Ефремов. – Гродно : ГрГУ, 2006. – 249 с.

3 МВИ. МН 1181-2011. Методика измерений объемной и удельной активности ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{40}K на гамма-бета-спектрометре типа МКС-АТ1315, объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов ^{137}Cs , ^{40}K на гамма-спектрометре типа EL 1309 (МКГ-1309) в пищевых продуктах, питьевой воде, почве, сельскохозяйственном сырье и кормах, продукции лесного хозяйства, других объектах окружающей среды. – Минск: «Атомтех», 2011. – 31 с.

4 МВИ. МН 3151-2009. Методика выполнения измерений удельной активности гамма-излучающих радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am в почве, донных отложениях и других объектах окружающей среды на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами с бериллиевым или композитным углеродным окном. – Хойники: «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник», 2009. – 14 с.

5 Паницкий, А. В. Особенности вертикального распределения радионуклидов в почвах бывшего семипалатинского испытательного полигона / А. В. Паницкий, С. Н. Лукашенко, Р. Ю. Магашева // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10. – С. 2231–2236.

6 Почвоведение : учеб. для ун-тов : в 2 ч. / Г. Д. Белицина [и др.]; под ред. В. А. Ковды, Б. Г. Розанова. – М. : Высшая школа, 1988. – Ч. 1. – 402 с.

7 Правила проведения приземных метеорологических наблюдений и работ на станциях = Правілы правядзення прыземных метэаралагічных назіранняў і работ на станцыях: ТКП 17. 10-12-2009 (02120). № 4-Т – Введ. 09. 03. 09 (с отменой РБ НГСП-85). – Минск : Минприроды, 2009. – 182 с.

V. V. Goloveshkin, S. A. Kalinichenko, R. A. Nenashev, V. L. Borisenko, A. N. Chudinov

STUDIES OF THE INFLUENCE OF THE AMOUNT AND INTENSITY OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION ON THE PARAMETERS OF VERTICAL MIGRATION OF RADIONUCLIDES IN THE SOILS OF THE EXCLUSION ZONE OF THE CHERNOBYL NPP

*State Nature Protective Scientific Research Establishment
“Polesye State Radiation-Ecological Reserve”,
Khoyniki, Republic of Belarus,
goloveshkin.victor@yandex.ru*

Abstract. The results of our studies confirmed the presence of a correlation between the parameters of vertical migration of radionuclides in soils and meteorological indicators (the amount and intensity of atmospheric precipitation). It was determined that the rate of vertical migration of radionuclides was 0.19 – 0.48 cm/year for ^{137}Cs , 0.31 – 0.60 cm/year for ^{90}Sr , and 0.16 – 0.33 cm/year for ^{241}Am .

Keywords: the soil, vertical migration, radionuclides, precipitation, moisture regime.

УДК 535. 231. 16:546. 36*137:546. 42*90:599. 6/. 73(476. 2)

А. В. ГУЛАКОВ, Д. Н. ДРОЗДОВ

ВЛИЯНИЕ СЕЗОНА ГОДА НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ОТ ИНКОРПОРИРОВАННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ^{137}Cs И ^{90}Sr В ОРГАНИЗМЕ ДИКИХ КОПЫТНЫХ, ОБИТАЮЩИХ НА ТЕРРИТОРИИ ПОЛЕССКОГО РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
г. Гомель, Республика Беларусь,
Gulakov@gsu.by, Drozdov@gsu.by*

В статье представлена оценка влияния фактора сезонности на динамику дозы внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr ; результаты анализа показали, что фактор сезонности оказывает 16 % ($p > 0,5$) влияния на дисперсию дозы внутреннего облучения от инкорпорированного ^{137}Cs и 10 % от инкорпорированного ^{90}Sr ($p > 0,5$). Таким образом, фактор сезонности способен оказывать влияние на динамику дозы внутреннего облучения диких копытных, однако вклад этого фактора в объяснение вариации дозы внутреннего облучения и низкая достоверность оценки позволяют использовать его только в сочетании с другими факторами образования дозы внутреннего облучения.

Ключевые слова: дикий кабан, косуля европейская, лось, сезон, доза внутреннего облучения, ^{137}Cs , ^{90}Sr , мышечная ткань, костная ткань.