

# Влияние свойств почв на процесс вертикальной миграции радионуклидов

*Представлены результаты исследований 1994-2000 гг. по перераспределению  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  по почвенному профилю дерново-подзолистых заболоченных необрабатываемых почв. Установлено, что дерново-подзолистые глеевые почвы характеризуются более интенсивной скоростью вертикальной миграции радионуклидов, чем глееватые. В связи с этим снижение в 2 раза удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  верхнего 5-сантиметрового слоя глеевых почв происходит через 9-11 лет, в глееватых – через 14-15 ( $^{90}\text{Sr}$ ) и 17-19 лет ( $^{137}\text{Cs}$ ) после выпадения на поверхность почвы. Несмотря на различия в скорости самоочищения верхних слоев почв различной степени заболоченности, радионуклиды продолжают находиться в корнеобитаемой зоне трав.*

*The results of the 1994-2000 research on the vertical movement of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in sod-podzolic soils of different moisture regimes of the non-cultivated lands of Gomel region are provided in the article. It was found that sod-podzolic deeply gleyed soils are characterized by more intensive speed of vertical movement than slightly gleyed soils. In this connection the effective clearance half-time for  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the top five centimeter layer of deeply gleyed soils was observed in 9-11 years, in slightly gleyed soils for  $^{90}\text{Sr}$  – through 14-15, but for  $^{137}\text{Cs}$  is predicted in 17-19 years after deposition. Despite of the difference in speed of clearing of the top layer of soils with various degree of gleying, radio nuclides are still in the root zone of the perennial grasses.*

## Введение

Целью исследований распределения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  по почвенному профилю является анализ доз внешнего облучения и оценка скорости самоочищения от радионуклидов корнеобитаемого слоя. На процесс самоочищения оказывают влияние физико-химические свойства почв и радионуклидов, агрометеорологические условия. Подвижность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в наибольшей степени определяется такими свойствами почв, как кислотность, гранулометрический состав, емкость катионного обмена и содержание органического вещества [1, 2, 3, 4, 5].

Вклад процессов вертикальной миграции в удаление радионуклидов из корнеобитаемого слоя луговых экосистем на дерново-подзолистых почвах, как установлено, является незначительным по сравнению с ролью радиоактивного распада. С течением времени наблюдается перераспределение выпавших радионуклидов по профилю почв, особенно на заболоченных, но и до настоящего времени основная доля радионуклидов находится в корнеобитаемом слое [6, 7, 8, 9, 10, 11]. В немногочисленных исследованиях подчеркивается, что с увеличением гидроморфности почв значительно сокращается период самоочищения от радионуклидов верхнего гумусово-аккумулятивного горизонта почв кормовых угодий [6, 12].

За поставарийный период произошло значительное снижение производства загрязненного радионуклидами молока. Однако на естественных кормовых угодьях на низкоплодородных заболоченных почвах в Гомельской и Брестской областях даже при невысоких плотностях загрязне-

ния по-прежнему существует проблема производства кормов в соответствии с Республиканскими допустимыми уровнями содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в сельскохозяйственном сырье и кормах. В связи с этим детальные исследования поведения радионуклидов в типичных для региона дерново-подзолистых заболоченных почвах в зависимости от режима их увлажнения, уровня плодородия необходимы для достоверного прогноза радиоэкологической обстановки и рационального использования кормовых угодий в зоне загрязнения.

## Материалы и методы

Характер распределения радионуклидов по почвенному профилю изучался в 1994-2000 гг. на трех постоянных площадках наблюдений (ППН) на кормовых угодьях в Брагинском (1), Буда-Косшелевском (2) и Ветковском (3) районах Гомельской области на дерново-подзолистых заболоченных супесчаных почвах, различающихся по плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , агрохимическим показателям, степени гидроморфности (табл.1).

Пробы почв отбирались с помощью металлических колец высотой 5 см и диаметром 14 см через 5 см на глубину 30-50 см. Удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  в почвах определяли гамма-спектрометрическим методом на приборах АИ-1024 и ЕЛ-1309 по методике "Активность радионуклидов в объемных образцах. Методические рекомендации по выполнению измерений на сцинтиляционном гамма-спектрометре", 1993 г., удельную активность  $^{90}\text{Sr}$  – радиохимически по "Методическим указаниям по определению содержания  $^{90}\text{Sr}$  в почвах и ра-

**Таблица 1.** Характеристика дерново-подзолистых заболоченных почв постоянных площадок наблюдений

ППН	Почва	Плотность загрязнения, кБк/м <sup>2</sup>		Агрохимические показатели					
		<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	рН <sub>KCl</sub>	гумус, %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
1	Глеевая	1005	24	5,7	1,63	85	62	544	149
2	Глееватая	287	48	4,8	4,06	169	124	503	128
3	Глееватая	820	25	6,4	2,15	167	61	814	160

стениях", ЦИНАО, 1985 г. Образцы почв анализировали на содержание основных агрохимических показателей (рН<sub>KCl</sub>, гумус, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO, MgO) по стандартным методикам.

### Результаты исследований и их обсуждение

В течение 1994-2000 гг. были получены данные по удельной активности радионуклидов в почвенных слоях постоянных площадок наблюдений. На основании результатов спектрометрического анализа рассчитывалось относительное содержание <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в каждом почвенном слое (табл. 2-3).

Расчеты показали, что если в 1994 г. в верхнем 10-сантиметровом слое дерново-подзолистых глееватых почв (ППН 2, 3) содержалось 89-95% <sup>137</sup>Cs, то в 2000 г. – 83-92% от общего его запаса в 30-сантиметровом слое. На глубину ниже 20 см проникло 1-4% радионуклида. На площадке 3 наблюдалось более интенсивное поступление <sup>137</sup>Cs в слой почвы 5-10 см: здесь уже в 1994 г. в 5-сантиметровом слое осталось 80% от общего содержания радионуклида в

10-сантиметровом слое, постепенно снижаясь до 59% к 2000 г., в то время как на площадке 2 эти значения составили 88 и 65% соответственно. За годы исследований на площадке 3 постоянно наблюдались более высокие значения гидротермического коэффициента вегетационного периода, характеризующего степень увлажнения угодий в зависимости от погодных условий. Меньшее содержание обменного калия также является одним из факторов, способствующих большей подвижности радионуклида при продвижении по почвенному профилю.

В дерново-подзолистой глеевой почве (ППН 1) <sup>137</sup>Cs распределился по почвенному профилю на глубину до 25 см. Уже в 1994-1997 гг. в слое 15-20 см содержалось значительно больше <sup>137</sup>Cs, чем в глееватых почвах (7-9% в отличие от 1-2%). Известно, что при избыточном увлажнении повышенную подвижность приобретают микроколичества радиоактивных элементов. В заболоченных почвах наблюдается увеличение содержания доступных <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr, радионуклиды продвигаются по профилю почв в виде водорастворимых форм [12].

В минеральных почвах <sup>90</sup>Sr, как известно, характеризуется более высокой скоростью вертикальной миграции, чем <sup>137</sup>Cs. Это обусловлено низким содержанием фикси-

**Таблица 2.** Распределение <sup>137</sup>Cs по почвенному профилю

ППН	Глубина, см	<sup>137</sup> Cs, % от общего содержания в слое 0-30 см						
		1994 г.	1996 г.	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	% в год
1	0-5	58	53	47	30	27	23	-5,8
	5-10	26	21	21	24	25	20	-1,0
	10-15	7	11	16	20	30	30	+3,8
	15-20	6	9	14	17	14	18	+2,0
	20-25	3	5	2	7	4	5	+0,3
	25-30	-	1	-	2	-	4	+0,7
2	0-5	83	79	73	69	64	60	-3,8
	5-10	12	11	17	20	27	32	+3,3
	10-15	2	3	4	4	5	5	+0,5
	15-20	1	3	3	3	2	1	-
	20-25	1	2	2	2	1	1	-
	25-30	-	2	1	2	1	1	-
3	0-5	71	70	64	62	57	49	-3,7
	5-10	18	21	26	28	32	34	+2,7
	10-15	6	5	5	6	7	10	+0,7
	15-20	3	2	3	2	2	4	+0,2
	20-25	1	1	1	1	1	2	+0,2
	25-30	1	1	1	1	1	1	-

**Таблица 3.** Распределение  $^{90}\text{Sr}$  по почвенному профилю

ППН	Глубина, см	$^{90}\text{Sr}$ , % от общего содержания в слое 0-30 см						
		1994 г.	1996 г.	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	% в год
1	0-5	47	42	24	23	16	14	-5,5
	5-10	35	25	20	19	16	16	-3,2
	10-15	13	14	24	24	21	22	+1,5
	15-20	3	10	16	17	28	22	+3,2
	20-25	1	6	11	13	14	16	+2,5
	25-30	1	3	5	4	5	10	+1,5
2	0-5	70	64	56	52	46	42	-4,7
	5-10	22	21	32	30	27	26	+0,7
	10-15	3	10	8	12	18	20	+2,8
	15-20	3	3	2	3	6	8	-0,8
	20-25	1	1	1	2	2	2	-0,2
	25-30	1	1	1	1	1	2	-0,2
3	0-5	68	58	55	54	42	38	-5,0
	5-10	22	27	30	31	39	34	+2,0
	10-15	6	7	9	9	12	17	+1,8
	15-20	2	5	2	3	5	7	+0,8
	20-25	1	2	2	2	1	3	+0,3
	25-30	1	1	2	1	1	1	-

**Таблица 4.** Формулы экспоненциальной зависимости концентрации радионуклида в почвенном слое от времени нахождения

ППН	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$
1	$v_2 = 60,99e^{-0,693 \cdot v_1/3,59}$	$v_2 = 48,46e^{-0,693 \cdot v_1/2,62}$
2	$v_2 = 83,43e^{-0,693 \cdot v_1/23,81}$	$v_2 = 70,16e^{-0,693 \cdot v_1/6,69}$
3	$v_2 = 73,20e^{-0,693 \cdot v_1/10,20}$	$v_2 = 67,54e^{-0,693 \cdot v_1/6,45}$

рованной фракции  $^{90}\text{Sr}$  в почвах [11]. В дерново-подзолистых глееватых почвах в 2000 г. значительная доля радионуклида была в слое 0-15 см – 88-89% от общего запаса в слое 0-30 см.

Наибольшая глубина проникновения  $^{90}\text{Sr}$  в дерново-подзолистой глееватой почве к 2000 г. составила 20 см, в то время как в глеевой – 35 см.

Для прогноза радиологической обстановки было использовано значение эффективного периода полуочищения почвы ( $T_{\text{эф}}$ ).  $T_{\text{эф}}$  – время, за которое количество выпавшего радионуклида в слое почвы снизится в 2 раза за счет естественного радиоактивного распада и процесса вертикальной миграции. Периоды полуочищения верхнего 5-сантиметрового слоя дерново-подзолистых заболоченных почв были рассчитаны с учетом полученных данных по содержанию радионуклидов в почвенном слое, характера миграции в течение 6 лет и естественного распада радионуклидов. Формула экспоненциальной зависимости концентрации радионуклида в почвенном слое от времени нахождения в этом слое имеет следующий вид:

где  $v_2$  – относительное содержание радионуклида в слое почвы, %;

$v_1$  – количество лет от начала наблюдений;

$b$  – период полуочищения слоя ( для конкретной почвы), лет;

0,693 – постоянная распада;

$a$  – относительное содержание радионуклида в слое почвы в год начала наблюдений, % .

Формулы для каждого радионуклида на отдельных ППН приведены в таблице 4.

Если считать параметры миграции подчиняющимися со времени выпадения экспоненциальным зависимостям, то значения  $T_{\text{эф}}$  с учетом радиоактивного распада составили для глееватых почв:  $^{137}\text{Cs}$  – 19,5±1,5 лет,  $^{90}\text{Sr}$  – 14,5±0,5 лет после выпадения на поверхность почвы. Период полуочищения для глеевых почв меньше:  $^{137}\text{Cs}$  – 10,5±0,5 лет,  $^{90}\text{Sr}$  – 9,5±0,5 лет.

## Выводы

1. Вертикальная миграция  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  по профилю необрабатываемых дерново-подзолистых глееватых супесча-

ных почв проходит медленно: через 14 лет после аварии более 90% от общего содержания  $^{137}\text{Cs}$  и более 80%  $^{90}\text{Sr}$  сосредоточено в верхнем 10-сантиметровом слое и будет доступно для корневого поглощения многолетними травами длительное время.

2. Процесс самоочищения верхнего слоя почв происходит за счет вертикальной миграции радионуклидов вглубь почвенного профиля и естественного радиоактивного распада. Более интенсивно миграция  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  протекает в условиях повышенного увлажнения дерново-подзолистых глеевых почв в отличие от глееватых.

3. Удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем 5-сантиметровом слое дерново-подзолистой глеевой почвы снизилась вдвое через 9 и 11 лет соответственно. Полуочищение от  $^{90}\text{Sr}$  этого слоя глееватых почв наблюдалось через 14-15 лет, а от  $^{137}\text{Cs}$  – прогнозируется через 17-19 лет после выпадения на поверхность дернины.

### *Литература*

1. Анненков Б.Н., Юдинцева Е.В. Основы сельскохозяйственной радиологии. – Москва: Агропромиздат, 1991. – 287 с.

2. Граковский В.Г., Фрид А.С. Проблемы изучения вертикальной миграции техногенных загрязнителей в почвах на примере Южного Урала // XV Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. – Минск, 1993. – Т.1. – С. 197.

3. Иванов С.Н., Шагалова Э.Д. Физико-географические условия и распределение стронция-90 на земной поверхности // Почвоведение и агрохимия. – 1972. – Вып.9. – С. 208-212.

4. Иванов С.Н., Шагалова Э.Д., Шифрина С.С. Стронций-90 в почвах юго-восточной части Белорусского Полесья // Почвоведение и агрохимия. – 1974. – Вып.11. – С. 136-138.

5. Моисеев А.А., Рамзаев П.В. Цезий-137 в биосфере. – Москва: Атомиздат, 1975. – 184 с.

6. Богдевич И.М., Шмигельская И.Д., Шмигельский А.А., Тарасюк С.В., Арастович Т.В. Зависимость периода полуочищения верхнего слоя почв (0-5 см), загрязненных

Cs-137, от степени их увлажнения // Сельскохозяйственная деятельность в условиях радиоактивного загрязнения: Материалы междунаучно-практ. конф./ Белор.с/х акад.-Горки, 1998. – С. 21-25.

7. Гвоздев А.А., Голикова Н.Б., Катанаев А.О. и др. Исследование миграции радионуклидов на природных ландшафтах Могилевской области // XV Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. – Минск, 1999. – Т.1. – С. 240.

8. Гребенщикова Н.В., Фирсакова С.К., Жученко Ю.М. и др. Исследование закономерностей вертикальной миграции Cs-137 и Sr-90 в почвах естественных суходольных лугов Белорусского Полесья // Итоги научных исследований в области радиоэкологии: Сб. научн. тр./ Под ред. С.К.Фирсаковой. – Гомель, 1996. – С. 34.

9. Дыскин К. М., Ганина П. В., Шукан А. М. и др. Оценка ландшафтов Гомельской области по способности к самоочищению от тяжелых металлов и радионуклидов // Результаты научных исследований, выполненных в соответствии с Госпрограммой по ликвидации в Республике Беларусь последствий катастрофы: Тез. докл. респ. науч.-практ. конф. – Гомель, 1992. – С.19.

10. Масловский И.В., Шмигельский А.А., Файзулин В.Ф. Изучение миграционных особенностей радионуклидов как основы для адаптивного земледелия на загрязненных сельскохозяйственных землях // Роль адаптивной интенсификации земледелия в повышении эффективности аграрного производства: Тез. докл. – Жодино, 1998. – С. 94.

11. О формах нахождения и вертикальном распределении  $^{137}\text{Cs}$  в почвах в зоне аварии на Чернобыльской АЭС / В.С.Анисимов, Н.И.Санжарова, Р.М.Алексахин // Почвоведение. – 1991. – № 9. – С. 31-40.

12. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н. Влияние режима увлажнения на миграцию радионуклидов в почве аварийной зоны Чернобыльской АЭС // Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере: Тез. докл. IV конф. научн. Совета при ГЕОХИ АН СССР по программе "АЭС-ВО". – Гомель, 1990. – С. 36-37.