

Ю. А. Иванов, С. Е. Левчук, Ю. В. Хомутигин,
А. М. Кадыгроб, Л. В. Йошенко, В. В. Павлюченко

Український НІІІ сільськогосподарської радіології НУБіП України, Чабани

ПОДВИЖНОСТЬ ^{90}Sr и ^{137}Cs В КОНТРАСТНЫХ ПО СВОЙСТВАМ ПОЧВАХ

Проанализированы и обобщены результаты изучения миграционной подвижности ^{90}Sr и ^{137}Cs , внесенных в исходной водорастворимой форме в почвы, характеризующихся контрастными физико-химическими свойствами и механическим составом. Оценены значения экологических и эффективных периодов полураспада пахотных горизонтов почв. Средние геометрические значения экологических периодов полураспада 20-см горизонтов почв от ^{90}Sr варьируют в пределах 3,7 - 84 года, ^{137}Cs - от 61 года до 265 лет, для конкретных почв значения $T_{\text{экол}}^{137}\text{Cs}$ превышают значения $T_{\text{экол}}^{90}\text{Sr}$ в 1,1 - 22,4 раза. Средние геометрические значения эффективных периодов полураспада 20-см горизонтов почв от ^{137}Cs варьируют в пределах от 20,2 до 27,1 года, от ^{90}Sr - в пределах 3,3 - 21,3 года, т. е. для конкретных почв значения $T_{\text{эф}}^{137}\text{Cs}$ превышают значения $T_{\text{эф}}^{90}\text{Sr}$ в 1,1 - 6,8 раза. Проанализированы корреляционные связи экологических периодов полураспада от ^{90}Sr и ^{137}Cs разновидностей дерново-подзолистых почв с физико-химическими характеристиками и механическим составом последних. Отмечено наличие сильной корреляционной связи $T_{\text{экол}}^{90}\text{Sr}$ и средней корреляционной связи $T_{\text{экол}}^{137}\text{Cs}$ с указанными показателями (содержание гумуса, $\text{Ca}_{\text{обм}}$, $\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$ и содержания физической глины).

Ключевые слова: ^{90}Sr , ^{137}Cs , вертикальный перенос радионуклидов, многолетняя динамика переноса, периоды полураспада почвы, физико-химические свойства и механический состав почв.

Введение

Одной из важных радиоэкологических задач на поздней фазе аварии является оценка динамики миграционной подвижности радионуклидов в почве. Изменение или постоянство параметров переноса радионуклидов в почвах предопределяет адекватность прогнозных оценок их миграционной подвижности и биологической доступности.

Ранее были опубликованы результаты оценки миграционной подвижности радионуклидов аварийного выброса ЧАЭС на различных следах выпадений в 1986 - 2011 гг. [1 - 3]. В исследованиях учитывали ландшафтно-геохимические условия территории, тип угодий (старопахотные почвы, почвы с естественным сложением профиля), физико-химические свойства выпадений, плотность загрязнения территории долгоживущими радионуклидами и др. В ряде публикаций показано, что одним из наиболее значимых факторов, определяющих долговременную динамику вертикального переноса радионуклидов в почвах, являются физико-химические формы выпадений и динамика их трансформации в почве [4 - 7].

Целью статьи является обобщение полученных авторами результатов изучения динамики миграционной подвижности ^{90}Sr и ^{137}Cs , внесенных в исходной водорастворимой форме в контрастные по свойствам почвы, при начальном распределении радионуклидов в верхнем 20-см слое почвы.

Материалы и методы

Для оценки вертикального переноса радионуклидов в почве использованы результаты натурных исследований на площадках экспериментального полигона УНИИСХР в зоне отчуждения ЧАЭС [8]. В 1988 г. на указанном полигоне был заложен модельно-полевой эксперимент с использованием металлических ящиков без дна размером 100 × 100 × 50 см. В ящики были помещены почвы, завезенные из разных регионов Украины. Нижележащие горизонты представлены рыхлым песком. Повторность 4-кратная. Радионуклиды в исходной водорастворимой форме были распределены в верхнем 20-см горизонте почв. В течение 1988 - 1998 гг. и в 2010 г. почвы в ящиках перекапывали на глубину 20 см. Оценки характеристик почв приведены в табл. 1. Физико-химические свойства почв определены стандартными методами [9, 10]. Гранулометрический состав почв оценен методом лазерной гранулометрии с использованием анализатора FRITSCHE Analysette 22 COMFORT. Отбор проб по профилю проводили в 1995 и в 2011 г. по горизонтам 0 - 20 см, 20 - 30 см, 30 - 40 см и далее в зависимости от характеристик почв.

Удельную активность радионуклидов в почвах определяли общепринятыми методами: ^{137}Cs - гамма-спектрометрическим, ^{90}Sr - бета-спектрометрическим [11] и радиохимическим [12]. Оценены значения экологических периодов полураспада пахотных горизонтов почв ($T_{\text{экол}}$),

© Ю. А. Иванов, С. Е. Левчук, Ю. В. Хомутигин,
А. М. Кадыгроб, Л. В. Йошенко, В. В. Павлюченко, 2013

Таблица 1. Физико-химические свойства и механический состав почв

Почва		pH _{KCl}	Гумус, %	Ca _{обм} , мг-экв/100 г	K ₂ O _{подв} , мг/кг	Содержа- ние физ. глины, %
П1	Дерново-подзолистая рыхлопесчаная	5,1	1,3	1,6	50	4,9
П2	Слабогумусированный песок (рыхлопесчаная)	5,2	0,6	1,0	23	3,9
П3	Дерново-подзолистая супесчаная	5,4	1,6	2,2	41	11,6
П4	Дерново-подзолистая легкосуглинистая	4,8	2,2	6,8	169	31,6
П5	Светло-серая лесная связнопесчаная	6,8	1,0	2,4	51	5,4
П6	Темно-серая лесная легкосуглинистая	6,9	2,8	8,0	207	20,8
П7	Дерново-подзолистая связнопесчаная	6,8	3,8	6,5	157	8,1
П8	Дерново-подзолистая связнопесчаная	4,8	1,1	2,0	71	5,3
П9	Дерново-подзолистая среднесуглинистая	4,8	2,9	5,7	140	32,9
П10	Чернозем южный тяжелосуглинистый	7,0	2,3	10,7	267	42,7
П11	Лугово-черноземная тяжелосуглинистая	7,0	4,0	12,4	314	43,4
П12	Чернозем реградированный среднесуглинистый	5,7	3,5	11,2	141	33,6
П13	Темно-серая лесная среднесуглинистая	5,2	3,1	12,0	177	37,4
П14	Чернозем типичный тяжелосуглинистый	6,2	3,1	13,6	178	42,8
П15	Чернозем типичный среднесуглинистый	5,2	5,0	12,8	281	32,4

т.е. периода времени, в течение которого активность радионуклида в слое почвы снижается вдвое только за счет вертикального переноса, а также значения эффективных периодов полураспада пахотных горизонтов почв ($T_{эф}$), т.е. периода времени, в течение которого активность радионуклида в слое почвы снижается вдвое за счет вертикального переноса и радиоактивного распада ($T_{эф} = T_{1/2} \cdot T_{экол} / (T_{1/2} + T_{экол})$).

Оценки экологических периодов полураспада ($T_{экол}$) пахотных горизонтов почв рассчитывали с использованием эмпирической модели $Y = 100 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$, где Y – доля радионуклида в пахотном (0 - 20 см) слое почвы; α – константа полураспада слоя почвы, год⁻¹; t – время пребывания радионуклида в почве, лет. Статистическую обработку результатов проводили обще-

принятыми методами с использованием программных средств MS Excel 2007 и Statistica 10 [13, 14].

Результаты и обсуждение

Вертикальный перенос ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в профиле контрастных по свойствам почв оценивали после внесения радионуклидов в водорастворимой форме и их начального равномерного распределения в слое 0 - 20 см. Результаты оценки перераспределения радионуклидов в профиле почв через 7 лет и 23 года после внесения радионуклидов в почву приведены в табл. 2. Полученные результаты показали существенные различия как в динамике переноса каждого радионуклида в профиле различных почв, так и различия в переносе ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs.

Таблица 2. Динамика перераспределения ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в профиле контрастных по свойствам почв

Почва	⁹⁰ Sr				¹³⁷ Cs			
	Горизонт, см	1988 г.	1995 г.	2011 г.	Горизонт, см	1988 г.	1995 г.	2011 г.
П1	0 - 20	100	16,2*	7,2	0 - 20	100	92,8	85,7
	20 - 40	<0,01	11,3	5,2	20 - 30	<0,01	5,3	10,4
	40 - 60	<0,01	8,6	2,1	30 - 40	<0,01	0,8	2,4
	60 - 160	<0,01	63,9	85,5	40 - 60	<0,01	1,1	1,5
П2	0 - 20	100	20,7	3,2	0 - 20	100	93,6	84,6
	20 - 40	<0,01	6,3	1,0	20 - 30	<0,01	1,8	11,5
	40 - 60	<0,01	7,0	2,2	30 - 40	<0,01	3,1	3,1
	60 - 160	<0,01	66,0	93,6	40 - 60	<0,01	1,5	0,8
П3	0 - 20	100	86,7	64,0	0 - 20	100	96,5	83,7
	20 - 30	<0,01	11,7	29,5	20 - 30	<0,01	1,9	14,3
	30 - 40	<0,01	0,9	6,0	30 - 40	<0,01	0,4	1,9
	40 - 60	<0,01	0,7	0,6	40 - 60	<0,01	1,2	0,1
П4	0 - 20	100	89,3	63,8	0 - 20	100	95,2	86,0
	20 - 30	<0,01	8,0	30,9	20 - 30	<0,01	3,2	9,9
	30 - 40	<0,01	1,8	2,4	30 - 40	<0,01	1,5	3,7
	40 - 60	<0,01	0,9	2,9	40 - 60	<0,01	0,1	0,4

Почва	⁹⁰ Sr				¹³⁷ Cs			
	Горизонт, см	1988 г.	1995 г.	2011 г.	Горизонт, см	1988 г.	1995 г.	2011 г.
П5	0 - 20	100	68,9	27,3	0 - 20	100	98,0	82,0
	20 - 30	<0,01	12,4	15,7	20 - 30	<0,01	0,6	15,6
	30 - 40	<0,01	18,0	18,5	30 - 40	<0,01	1,3	2,3
	40 - 70	<0,01	0,7	38,5	40 - 60	<0,01	0,1	0,1
П6	0 - 20	100	96,5	67,7	0 - 20	100	96,4	80,6
	20 - 30	<0,01	3,0	28,0	20 - 30	<0,01	3,1	15,6
	30 - 40	<0,01	0,3	3,3	30 - 40	<0,01	0,4	3,6
	40 - 60	<0,01	0,2	1,0	40 - 60	<0,01	0,1	0,2
П7	0 - 20	100	96,9	58,1	0 - 20	100	94,9	81,7
	20 - 30	<0,01	2,5	34,0	20 - 30	<0,01	4,1	17,5
	30 - 40	<0,01	0,3	7,1	30 - 40	<0,01	0,8	0,3
	40 - 60	<0,01	0,3	0,8	40 - 60	<0,01	0,2	0,5
П8	0 - 20	100	78,4	31,6	0 - 20	100	90,3	90,1
	20 - 30	<0,01	20,8	34,9	20 - 30	<0,01	8,7	5,2
	30 - 40	<0,01	0,5	27,4	30 - 40	<0,01	0,8	2,3
	40 - 60	<0,01	0,8	6,1	40 - 60	<0,01	0,2	2,4
П9	0 - 20	100	95,4	82,0	0 - 20	100	98,3	90,4
	20 - 30	<0,01	4,2	15,8	20 - 30	<0,01	1,1	8,5
	30 - 40	<0,01	0,4	1,3	30 - 40	<0,01	0,5	0,8
	40 - 60	<0,01	<0,1	0,9	40 - 60	<0,01	0,1	0,3
П10	0 - 20	100	76,8	53,6	0 - 20	100	94,9	80,7
	20 - 30	<0,01	15,8	33,1	20 - 30	<0,01	4,0	17,6
	30 - 40	<0,01	7,1	10,4	30 - 40	<0,01	1,0	1,2
	40 - 60	<0,01	0,3	2,9	40 - 60	<0,01	0,1	0,5
П11	0 - 20	100	94,1	69,7	0 - 20	100	93,1	75,2
	20 - 30	<0,01	4,6	26,2	20 - 30	<0,01	6,1	22,8
	30 - 40	<0,01	0,5	3,7	30 - 40	<0,01	0,7	1,8
	40 - 60	<0,01	0,8	0,4	40 - 60	<0,01	0,1	0,2
П12	0 - 20	100	-	69,7	0 - 20	100	92,8	91,0
	20 - 30	<0,01	-	26,2	20 - 30	<0,01	4,8	4,6
	30 - 40	<0,01	-	3,7	30 - 40	<0,01	1,9	2,5
	40 - 60	<0,01	-	0,4	40 - 60	<0,01	0,5	1,9
П13	0 - 20	100	90,2	71,0	0 - 20	100	98,1	78,7
	20 - 30	<0,01	7,5	26,5	20 - 30	<0,01	1,1	20,2
	30 - 40	<0,01	1,8	1,5	30 - 40	<0,01	0,7	0,7
	40 - 60	<0,01	0,5	1,0	40 - 60	<0,01	0,1	0,4
П14	0 - 20	100	84,7	54,4	0 - 20	100	97,6	96,0
	20 - 30	<0,01	13,1	26,4	20 - 30	<0,01	1,3	1,7
	30 - 40	<0,01	1,7	18,5	30 - 40	<0,01	0,8	1,2
	40 - 60	<0,01	0,5	0,7	40 - 50	<0,01	0,3	1,1
П15	0 - 20	100	90,0	84,3	0 - 20	100	97,4	93,0
	20 - 30	<0,01	7,9	15,0	20 - 30	<0,01	1,7	4,8
	30 - 40	<0,01	1,7	0,4	30 - 40	<0,01	0,4	1,0
	40 - 60	<0,01	0,4	0,3	40 - 60	<0,01	0,5	1,2

* Относительные ошибки процентного содержания радионуклидов в горизонтах профилей почв варьируют в пределах 10 - 40 % в зависимости от удельной активности радионуклидов в почвенных пробах.

В целом через 7 лет депонирования ⁹⁰Sr в почве из 20-см горизонта почв было вынесено 3,1 - 87,8 % радионуклида. Максимальная интенсивность переноса ⁹⁰Sr отмечена для легких по механическому составу почв – дерново-подзолистой рыхлопесчаной и слабогумусированном песке. Из 20-см горизонта указанных почв было

вынесено соответственно 83,8 и 79,3 % радионуклида; около 31 % ⁹⁰Sr было вынесено из 20-см горизонта светло-серой лесной связнопесчаной почвы. Для остальных почв из 20-см горизонта было вынесено от 3,1 до 23,2 % радионуклида. Через 23 года депонирования в почве максимальным выносом ⁹⁰Sr из 20-см горизонта почв

характеризовались слабогумусированный песок, дерново-подзолистая рыхлопесчаная, светло-серая лесная связнопесчаная и дерново-подзолистая связнопесчаная почвы – 96,8, 92,8, 72,7 и 68,4 % соответственно. Минимальное количество радионуклида вынесено в темно-серой лесной среднесуглинистой (29 %) и дерново-подзолистой среднесуглинистой (18 %) почвах, а также в черноземе типичном среднесуглинистом (15,7 %). В остальных почвах вынос ⁹⁰Sr из 20-см горизонта варьировал от 30,3 до 46,4 %.

Существенно меньшей интенсивностью переноса характеризуется ¹³⁷Cs. Через 7 лет после внесения в почву из 20-см горизонта почв было вынесено 1,7 - 9,7 % радионуклида, через 23 года – 4,0 - 24,8 %.

Через 7 лет депонирования в почве максимальный вынос ¹³⁷Cs из 20-см горизонта почв отмечен для дерново-подзолистой связнопесчаной (9,7 %) и дерново-подзолистой рыхлопесчаной (7,2 %) почв, а также чернозема реградированного среднесуглинистого (7,2 %). Для остальных почв из 20-см горизонта за это время было

вынесено от 1,7 до 9,7 % радионуклида.

Через 23 года депонирования в почве максимальным выносом ¹³⁷Cs из 20-см горизонта почв характеризовались лугово-черноземная тяжелосуглинистая (24,8 %), темно-серая лесная среднесуглинистая (21,3 %) и темно-серая лесная легкосуглинистая (19,4 %) почвы, чернозем южный тяжелосуглинистый (19,1 %), дерново-подзолистая связнопесчаная (18,3 %), светло-серая лесная связнопесчаная (18 %) и дерново-подзолистая супесчаная (16,3 %) почвы, слабогумусированный песок (15,4 %). В черноземе типичном тяжелосуглинистом и черноземе типичном среднесуглинистом за пределы 20-см слоя было вынесено 4 и 7 % радионуклида соответственно.

Анализ динамики перераспределения ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в профиле почв через 7 лет и 23 года после внесения позволил охарактеризовать отмеченные выше различия в интенсивности переноса в профиле почв ⁹⁰Sr по сравнению с ¹³⁷Cs периодами полураспада пахотных горизонтов почв от указанных радионуклидов и оценить их значения (табл. 3).

Таблица 3. Оценки экологических и эффективных периодов полураспада пахотных горизонтов контрастных по свойствам почв от ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs

Почва	T _{экол} (20 см), лет		T _{эф} (20 см), лет	
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Дерново-подзолистая рыхлопесчаная	3,7* (2,5 - 7,1)**	80 (64 - 107)	3,3*	21,9*
Слабогумусированный песок (рыхлопесчаная почва)	3,7 (3,0 - 4,7)	83 (73 - 96)	3,3	22,1
Дерново-подзолистая супесчаная	34,8 (34 - 36)	108 (88 - 137)	15,7	23,6
Дерново-подзолистая легкосуглинистая	39 (35 - 43)	102 (98 - 106)	16,5	23,3
Светло-серая лесная связнопесчаная	12,6 (12,3 - 13)	120 (78 - 258)	8,7	24,1
Темно-серая лесная легкосуглинистая	63 (40 - 151)	95 (73 - 138)	19,7	22,9
Дерново-подзолистая связнопесчаная	49 (29 - 181)	85 (78 - 94)	18,1	22,3
Дерново-подзолистая связнопесчаная	16,3 (13,7 - 20,3)	77 (46 - 223)	10,4	21,7
Дерново-подзолистая среднесуглинистая	84 (75 - 955)	185 (149 - 245)	21,3	25,9
Чернозем южный тяжелосуглинистый	21,3 (18,2 - 26)	83 (74 - 94)	12,2	22,1
Лугово-черноземная тяжелосуглинистая	57 (43 - 82)	61 (56 - 69)	19,0	20,2
Чернозем реградированный среднесуглинистый	-	116 (63 - 698)		23,9
Темно-серая лесная среднесуглинистая	50 (47 - 53)	106 (65 - 286)	18,2	23,5
Чернозем типичный тяжелосуглинистый	28 (26 - 29)	265 (155 - 880)	14,1	27,1
Чернозем типичный среднесуглинистый	62 (45 - 97)	164 (159 - 169)	19,6	25,5

* Среднее геометрическое значение.

** Минимальное и максимальное значения.

Отмечена существенно более высокая интенсивность переноса в профиле почв ⁹⁰Sr по сравнению с ¹³⁷Cs. Средние геометрические значения экологических периодов полураспада 20-см горизонтов почв от ¹³⁷Cs варьируют в пределах

от 61 года до 265 лет, от ⁹⁰Sr – в пределах 3,7 - 84 года, т.е. для конкретных почв значения T_{экол} ¹³⁷Cs превышают значения T_{экол} ⁹⁰Sr в 1,1 - 22,4 раза. Средние геометрические значения эффективных периодов полураспада 20-см горизон-

тов почв от ^{137}Cs варьируют в пределах от 20,2 до 27,1 года, от ^{90}Sr – в пределах 3,3 - 21,3 года, т.е. для конкретных почв значения $T_{\text{экол}}^{137}\text{Cs}$ превышают значения $T_{\text{экол}}^{90}\text{Sr}$ в 1,1 - 6,8 раза.

Показана существенная роль свойств почв в интенсивности переноса радионуклидов в их профиле. Максимальные значения экологических периодов полуочищения 20-см горизонтов почв от ^{90}Sr отмечены для почв тяжелого механического состава. Экстремально высокая интенсивность переноса ^{90}Sr отмечена в почвах легкого механического состава (дерново-подзолистая рыхлопесчаная, слабогумусированный песок). Аналогичная картина наблюдается при оценке переноса ^{137}Cs . Максимальные различия $T_{\text{экол}}^{137}\text{Cs}$ и $T_{\text{экол}}^{90}\text{Sr}$ для конкретных почв (22,4 - 9,5 раза) отмечены для почв легкого механического состава (слабогумусированный песок, дерново-подзолистая рыхлопесчаная, светло-серая лесная связнопесчаная). Минимальные различия $T_{\text{экол}}^{137}\text{Cs}$ и $T_{\text{экол}}^{90}\text{Sr}$ для конкретных почв (1,1 - 1,5 раза) отмечены для лугово-черноземной тяжелосуглинистой и темно-серой лесной легко-

суглинистой почв. В ряду дерново-подзолистых почв миграционная подвижность ^{90}Sr и ^{137}Cs увеличивается от почв легкого механического состава к почвам тяжелого механического состава.

Оценена зависимость экологических периодов полуочищения 20-см слоя почвы от ^{137}Cs и ^{90}Sr в зависимости от физико-химических свойств почвы (pH_{KCl} , содержание гумуса обменного кальция ($\text{Ca}_{\text{обм}}$), подвижного калия ($\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$) и гранулометрического состава почвы (содержания физической глины).

Статистический анализ показал существенную взаимную корреляцию некоторых физико-химических свойств и гранулометрического состава почвы на рассматриваемых 15 экспериментальных площадках. В табл. 4 приведены коэффициенты взаимной корреляции характеристик почвы (pH_{KCl} , гумус, $\text{Ca}_{\text{обм}}$, $\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$ и содержания физической глины), а также коэффициенты корреляции между экологическими периодами полуочищения 20-см пахотного слоя почвы от ^{137}Cs и ^{90}Sr и указанными характеристиками почв.

Таблица 4. Корреляционная матрица характеристик почвы и периодов полуочищения

Характеристика	$T_{\text{экол}}^{137}\text{Cs}$	$T_{\text{экол}}^{90}\text{Sr}$	pH_{KCl}	Гумус	$\text{Ca}_{\text{обм}}$	$\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$	Физ. глина
$T_{\text{экол}}^{137}\text{Cs}$	1						
$T_{\text{экол}}^{90}\text{Sr}$	0,25	1					
pH_{KCl}	-0,13	0,04	1				
Гумус	0,30	0,76	0,23	1			
$\text{Ca}_{\text{обм}}$	0,38	0,51	0,32	0,83	1		
$\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$	0,09	0,59	0,43	0,81	0,86	1	
Физ. глина	0,39	0,51	0,17	0,65	0,90	0,81	1

Представленные в таблице данные показывают отсутствие значимой корреляционной связи между pH_{KCl} и другими характеристиками почвы, а также отсутствие этой связи между pH_{KCl} и экологическими периодами полуочищения 20-см пахотного слоя почвы от ^{90}Sr и ^{137}Cs ($T_{\text{экол}}^{90}\text{Sr}$, $T_{\text{экол}}^{137}\text{Cs}$).

Известно, что гуминовые и фульвокислоты, а также их соли, содержащиеся в органическом веществе почв, оказывают противоположное действие на миграционную подвижность ^{90}Sr [12, 15]. В рамках проводимой работы состав гумуса почв не изучали, а набор почв в эксперименте был достаточно разнороден (разновидности дерново-подзолистых почв, серые лесные, черноземы). В связи с этим корреляционные связи между экологическими периодами полуочищения 20-см горизонта почв, с одной стороны, их физико-химическими свойствами и гранулометриче-

ским составом, с другой стороны, оценивались только для разновидностей дерново-подзолистых почв (П1-П5, П7-П9). Зависимость экологического периода полуочищения 20-см горизонта ^{90}Sr и ^{137}Cs от значений физико-химических показателей и гранулометрического состава почв аппроксимировали функцией вида $T_{\text{экол}} = A \times \ln(X) + B$, где A и B – константы, X – оценки соответствующих характеристик почв. Полученные параметры зависимости и значения коэффициентов корреляции приведены в табл. 5.

Приведенные в таблице значения коэффициентов корреляции показывают наличие сильной корреляционной связи $T_{\text{экол}}^{90}\text{Sr}$ с физико-химическими показателями и гранулометрическим составом почв, средней корреляционной связи $T_{\text{экол}}^{137}\text{Cs}$ с физико-химическими показателями и гранулометрическим составом почв.

Таблица 5. Параметры уравнения регрессии и значения коэффициентов корреляции экологического периода полуочищения 20-см горизонта ^{90}Sr и ^{137}Cs с физико-химическими показателями и гранулометрическим составом почв

Характеристика почвы	^{137}Cs			^{90}Sr		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>r</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>r</i>
$\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$	17,5	30,4	0,35	27,6	-88,3	0,73
$\text{Ca}_{\text{обм}}$	22,8	81,2	0,45	30,9	-1,9	0,81
Гумус	23,6	94,7	0,40	37,6	16,9	0,83
Содержание физической глины	29,2	40,0	0,68	27,2	-30,1	0,83

Выводы

1. В условиях многолетнего модельно-полевого эксперимента оценены параметры миграционной подвижности ^{90}Sr и ^{137}Cs , внесенных в исходной водорастворимой форме в 15 контрастных по свойствам почв, и исходным распределением радионуклидов в верхнем 20-см горизонте почвы.

2. Отмечена существенно более высокая интенсивность переноса в профиле почв ^{90}Sr по сравнению с ^{137}Cs . Средние геометрические значения экологических периодов полуочищения 20-см горизонтов почв от ^{90}Sr варьируют в пределах 3,7 - 84 года, ^{137}Cs – от 61 года до 265 лет, для конкретных почв значения $T_{\text{экол}}^{137}\text{Cs}$ превышают значения $T_{\text{экол}}^{90}\text{Sr}$ в 1,1 - 22,4 раза. Средние геометрические значения эффективных периодов полуочищения 20-см горизонтов почв от ^{137}Cs варьируют в пределах от 20,2 до 27,1 года, от ^{90}Sr – в пределах 3,3 - 21,3 года, для конкретных почв значения $T_{\text{эф}}^{137}\text{Cs}$ превышают значения

$T_{\text{эф}}^{90}\text{Sr}$ в 1,1 - 6,8 раза.

3. Показана существенная роль свойств почв в интенсивности переноса радионуклидов в их профиле. Максимальные значения экологических периодов полуочищения 20-см горизонтов почв от ^{90}Sr отмечены для почв тяжелого механического состава. Экстремально высокая интенсивность переноса ^{90}Sr отмечена в почвах легко-механического состава (дерново-подзолистая рыхлопесчаная, слабогумусированный песок). Аналогичная картина наблюдается при оценке переноса ^{137}Cs .

4. Оценены статистически значимые корреляционные связи между периодами полуочищения 20-см горизонта почв, с одной стороны, их физико-химическими свойствами и гранулометрическим составом, с другой стороны, для разновидностей дерново-подзолистых почв. Отмечено наличие сильной корреляционной связи $T_{\text{экол}}^{90}\text{Sr}$ и средней корреляционной связи $T_{\text{экол}}^{137}\text{Cs}$ с указанными показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Ю.А., Кашпаров В.А., Левчук С.Е. и др. Вертикальный перенос радионуклидов выброса ЧАЭС в почвах. 1. Долговременная динамика перераспределения радионуклидов в профиле почв in situ // Радиохимия. - 1996. - Т. 38, вып. 3. - С. 264 - 271.
2. Ivanov Yu. Migration of fuel particles of CHNPP fallout and leached radionuclides in soils and soil-to-plant system // Radioactive Particles in the Environment. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security / Ed. by D.H. Oughton and V. Kashparov. - Netherlands: Springer, 2009. - P. 123 - 137.
3. Иванов Ю.А., Левчук С.Е., Куреев С.И. и др. Подвижность радионуклидов выброса ЧАЭС в почвах отчужденных территорий // Ядерная физика та енергетика. - 2011. - Т. 12, № 4. - С. 375 - 384.
4. Kashparov V.A., Protsak V.P., Ahamdach N. et al. Dissolution kinetics of particles of irradiated Chernobyl nuclear fuel: influence of pH and oxidation state on the release of radionuclides in contaminated soil of Chernobyl // J. of Nuclear Materials. - 2000. - Vol. 279. - P. 225 - 233.
5. Kashparov V.A., Lundin S.M., Khomutinin Yu.V. et al. Soil contamination with ^{90}Sr in the near zone of the Chernobyl accident // J. of Environment Radioactivity. - 2001. - Vol. 56, No. 3. - P. 285 - 298.
6. Kashparov V.A., Ahamdach N., Zvarich S.I. et al. Kinetics of dissolution of Chernobyl fuel particles in soil in natural conditions // J. of Environmental Radioactivity. - 2004. - Vol. 72, Issue 3. - P. 335 - 353.
7. Kashparov V.A., Lundin S.M., Zvarich S.I. et al. Territory contamination with the radionuclides representing the fuel component of Chernobyl fallout // The Science of the Total Environment. - 2003. - Vol. 317, Issues 1 - 3. - P. 105 - 119.
8. Бондарь П.Ф., Лоцилов Н.А., Дутов А.И. и др. Общие закономерности загрязнения продукции растениеводства на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС // Проблемы сельскохозяйственной радиологии: Сб. науч. тр. / Под ред. Н. А. Лоцилова. - К., 1991. - С. 88 - 105.
9. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Изд-во МГУ. - 487 с.
10. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Агропромиздат, 1986. - 16 с.
11. Активность, удельная активность и объемная ак-

тивность бета-излучающих радионуклидов в счетных образцах объектов технологических и природных сред. Методика выполнения измерений с использованием спектрометра энергий бета-излучения сцинтиляционного типа СЕБ-01. -МИ-12-05-99. - Разработчики: Н.И. Кравченко, Г.Д. Коваленко, И.А. Лихтарев - ГНПО "Метрология". Украинский НИИ экологических проблем. Ин-т радиационной защиты АТН Украины. - 69 с.

12. Павлоцкая Ф.И. Миграция радиоактивных продук-

тов глобальных выпадений в почвах. - М.: Атомиздат, 1974. - 216 с.

13. McLain D.H. Drawing contours from arbitrary data points // The Computer Journal. - 1974. - Vol. 17. - P. 318 - 324.

14. STATISTICA Help // <http://documentation.statsoft.com/>

15. Анненков Б.Н., Юдинцева Е.В. Основы сельскохозяйственной радиологии. - М.: Агропромиздат, 1991. - 297 с.

Ю. О. Иванов, С. Е. Левчук, Ю. В. Хомутинін, О. М. Кадигрїб, Л. В. Йощенко, В. В. Павлюченко

РУХЛИВІСТЬ ^{90}Sr І ^{137}Cs В КОНТРАСТНИХ ЗА ВЛАСТИВОСТЯМИ ҐРУНТАХ

Проаналізовано та узагальнено деякі результати вивчення міграційної рухливості ^{90}Sr і ^{137}Cs , внесених у початковій водорозчинній формі в ґрунти, що характеризуються контрастними фізико-хімічними властивостями та механічним складом. Оцінено значення екологічних та ефективних періодів напівочищення орних горизонтів ґрунтів. Середні значення екологічних періодів напівочищення 20-см горизонтів ґрунтів від ^{90}Sr варіюють у межах 3,7 - 84 роки, ^{137}Cs - від 61 року до 265 років. Проаналізовано кореляційні зв'язки екологічних періодів напівочищення від ^{90}Sr і ^{137}Cs різновидів дерново-підзолистих ґрунтів із фізико-хімічними властивостями та механічним складом останніх. Відзначено наявність сильного кореляційного зв'язку $T_{\text{еколог}}^{90}\text{Sr}$ і середнього кореляційного зв'язку $T_{\text{еколог}}^{137}\text{Cs}$ із зазначеними показниками.

Ключові слова: ^{90}Sr , ^{137}Cs , вертикальний перенос радіонуклідів, багатолітня динаміка переносу, періоди напівочищення ґрунту, фізико-хімічні властивості та механічний склад ґрунтів.

Yu. O. Ivanov, S. E. Levchuk, Yu. V. Khomutinin, O. M. Kadygrib, L. V. Yoschenko, V. V. Pavliuchenko

MOBILITY OF ^{90}Sr AND ^{137}Cs IN SOILS CHARACTERIZED WITH CONTRASTING PROPERTIES

Results of the study of ^{90}Sr and ^{137}Cs migration mobility in soils characterized with contrasting physical-chemical properties and granulometric composition has been analyzed. The mentioned radionuclides were introduced in soils in initial water-soluble form. Ecological and effective half-time of cleaning of soils 20-cm horizons (T_{ecol}) has estimated. Mean values of $T_{\text{ecol}}^{90}\text{Sr}$ varies in limits 3.7 - 84 years. $T_{\text{ecol}}^{137}\text{Cs}$ varies in limits 61 - 265 years. Correlation of ecological half-time cleaning of soddy-podsolic soils species from radionuclide and physical-chemical properties and granulometric composition of these ones has been analyzed, strong correlation of $T_{\text{ecol}}^{90}\text{Sr}$ as well, as mean correlation of $T_{\text{ecol}}^{137}\text{Cs}$ with mentioned soils characteristics has been noted.

Keywords: ^{90}Sr , ^{137}Cs , vertical transport of radionuclides, perennial dynamics of transport, periods of half-time of cleaning, physical-chemical properties and granulometric composition if soils.

Надійшла 12.08.2013

Received 12.08.2013