

ЗАКОНОМЕРНОСТИ МИГРАЦИИ ^{137}Cs В АЛЛЮВИАЛЬНОЙ ПОЧВЕ

© 2019 г. С. М. Пакшина, Л. П. Харкевич*, Н. М. Белоус,
Е. В. Смольский**

Брянский ГАУ, Россия,
243365, Брянская обл., с. Кокино, ул. Советская 2а,

*<https://orcid.org/0000-0003-2547-0239>,

**e-mail: sev_84@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2019, после доработки 08.04.2019,
принята к публикации 28.05.2019

В данной работе рассмотрены закономерности миграции ^{137}Cs в аллювиальной почве центральной поймы реки Ипуть (Новозыбковский район, Брянская область). Исследовано влияние фильтрации воды во время паводка, биовыноса и радиоактивного распада ^{137}Cs на процесс миграции в почве. Вклад радиоактивного распада, фильтрации воды и биовыноса в общий вынос ^{137}Cs из почвы составил за период с 1994 г. по 2007 г. соответственно 50–79, 20–50, 0.3–2.2 % в зависимости от способа обработки, дозы минерального удобрения и соотношения в ней элементов питания. Установлено, что повышенный вынос ^{137}Cs из слоя почвы поймы при проведении двухъярусной вспашки, по сравнению с дискованием и естественным травостоем, определяется более низким значением числа Пекле, что свидетельствует о преобладании конвективного переноса ^{137}Cs , по сравнению с диффузионным, в общем потоке раствора.

Ключевые слова: ^{137}Cs , миграция, закономерность, радиоактивный распад, биовынос, фильтрация воды.

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-165-180

ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуется влияние радиоактивного распада, фильтрации воды во время паводка, биовыноса на процесс миграции ^{137}Cs в корнеобитаемом слое аллювиальной почвы естественного луга, а также при поверхностном и коренном его улучшении.

В настоящее время известны закономерности движения и распределения макроэлементов в почве при отсутствии растительного покрова. В работе ([Волобуев, 1975](#)) описаны две закономер-

ности миграции солей в почве, которые были получены на основе обобщения и анализа многочисленных данных экспериментально-полевых и лабораторных опытов по промывкам засоленных почв.

Первая закономерность связывает массу солей со временем в процессах засоления – рассоления почв и имеет следующий вид:

$$S_t = S_0 \exp(\pm \beta t), \quad (1)$$

где t – время, необходимое для изменения содержания солей в почве от начального значения S_0 до значения S_t , β – постоянная для определенных условий протекания процесса миграции, знаки “ $\pm$ ” относятся соответственно к процессам засоления и рассоления почвы.

Вторая закономерность связывает массу солей с пространством, в котором протекает процесс рассоления почвы и имеет вид:

$$h = \mu \lg(S_i/S_0), \quad (2)$$

где h – толщина почвы, разделенная на i слоев, S_i – запас солей в слоях $i = 0 - h$, S_0 – запас солей в поверхностном слое, μ – параметр, характеризующий фильтрационную способность и степень дренированности почвогрунта. Величина h зависит от количества профильтровавшейся влаги (Q). Поэтому значение μ определяется по графику функции $\lg(S_i/S_0) = f(Q)$, который имеет линейный прямопропорциональный вид. Параметры β и μ представляют собой постоянные для конкретной почвы величины, поскольку величины S_0 , S_t , S_i , S_h имеют конечное значение ([Волобуев, 1975](#)). В работе ([Борздыко, 2000](#)) впервые было показано, что уравнение (2) соблюдается также при описании распределения активности ^{137}Cs по глубине почвы при отсутствии растительного покрова.

В работах ([Пакшина, 1985; 1989](#)) дано теоретическое обоснование зависимостей (1), (2). Для этого была построена модель, включающая не только диффузионные и конвективные потоки ионов по порам почвы вдоль движения раствора, но и диффузионный поток ионов в электростатическом поле вокруг заряженных стенок пор, направленный перпендикулярно стенкам пор, который описывает ионный обмен на почвенно-поглолительном комплексе (ППК). При решении уравнения для случаев нисходящего ([Пакшина, 1985](#)) и восходящего ([Пакшина, 1989](#)) потоков ионов было получено следующее выражение:

$$C_t = C_0 \exp(-\lambda v t), \quad (3)$$

где C_0 , C_t – соответственно начальная и конечная концентрация ионов в почве, t – время, необходимое для снижения содержания иона от C_0 до C_t , v – скорость потока, λ – параметр массопереноса для определенных условий протекания процесса.

Получена связь между параметрами β , μ , и λ , которая определяется следующими соотношениями:

$$\beta = \lambda v, \quad \mu = 1/\lambda. \quad (4)$$

Модель позволила расшифровать содержание параметра λ и выразить его в виде формулы, включающей только физические величины:

$$\lambda = 1,8 \cdot 10^3 \cdot \text{ЕКО} \cdot \text{Рe} \sqrt{\frac{Z_1 + Z_2}{2}} / S \cdot T, \quad (5)$$

где **ЕКО** – емкость катионного обмена, мг-экв/100 г почвы, **S** – удельная поверхность почвы, м²/г, **T** – абсолютная температура почвы, **Рe** – параметр Пекле, равный D/vr . **D** – коэффициент диффузии иона, **v** – скорость потока раствора, **r** – радиус пор, **Z₁**, **Z₂** – валентность аниона и катиона соли ([Пакшина, 1985](#); [1989](#)).

Учитывая уравнение (1) в работе ([Пакшина, 1994](#)), была выведена формула, связывающая плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs со временем, которая изменяется под действием процессов радиоактивного распада, фильтрации воды через почву, биовыноса, и имеет следующий вид:

$$A_k = A_0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 Q t} - n e^{-\lambda_3 \Sigma v E t}). \quad (6)$$

Где, первый, второй и третий члены относятся к радиоактивному распаду, фильтрации воды и биовыносу; λ_1 , λ_2 , λ_3 – постоянная радиоактивного распада, параметры массопереноса ионов при фильтрации влаги и биовыноса радионуклида корневой системой растений; **Q**, **ΣvEt** – количество профильтровавшейся через почву влаги и транспирация соответственно. **A₀**, **A_k** – начальная и конечная плотность загрязнения слоя почвы, $A_0 e^{-\lambda_1 t}$ – , оставшееся плотность загрязнения слоя после радиоактивного распада ¹³⁷Cs за период **t**, $A_0 e^{-\lambda_2 Q t}$ – вынос ¹³⁷Cs при фильтрации воды, $A_0 n e^{-\lambda_3 \Sigma v E t}$ – биовынос доступного растениям ¹³⁷Cs, **n**-доля доступного ¹³⁷Cs от общей активности.

Модель (6) описывает миграцию ¹³⁷Cs из определенного

слоя почвы тремя механизмами массопереноса во времени.

Целью данной работы является исследование применимости формулы (6) к процессу миграции ^{137}Cs в корнеобитаемом слое при наличии растительного покрова многолетних трав, выращиваемых в затопляемой паводковыми водами пойме.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование закономерностей миграции ^{137}Cs в корнеобитаемом слое многолетних трав проводили на луговом участке центральной поймы реки Ипуть (Новозыбковский район, Брянская область) в течение 14 лет (1994–2007 гг.).

Почва опытного участка представлена аллювиальной луговой, маломощной, среднегумусной, песчаной на супесчаном аллювии и имеет следующее строение профиля: Ah (0–4), A (4–18), B₁ (18–40), B_g (40–60), C_g (60–90).

Агрохимические свойства почвы в период проведения опытов колебались в следующих интервалах значений: pH_{KCl} – 5.2–5.43; гидролитическая кислотность – 2.78–2.43 мг-экв/100г почвы; сумма поглощенных оснований – 10.1–12.24 мг-экв/100г почвы; содержание гумуса – 3.11–3.21 % (по Тюрину); содержание подвижного фосфора и обменного калия соответственно 121–135 и 50–69 мг/кг (по Кирсанову).

Плотность загрязнения опытного участка в среднем составила 1221–1554 кБк/м². Длительность затопления опытного участка во время весеннего паводка составляла 20–22 дня.

Объектами исследований служили естественный травостой и сеяная мятликовая травосмесь при обработке поймы дискованием и двухъярусной вспашкой. Злаковая травосмесь имела следующий состав: овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.), тимopheвка луговая (*Phleum pratense* L.), кострец безостый (*Bromopsis inermis* Holub.), двухкосточник тростниковидный (*Phalaris arundinacea* L.), лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.).

На каждом фоне обработки поймы и естественном травостое использовали 5 вариантов внесения удобрения: 1 – Контроль, 2 – $\text{N}_{120}\text{P}_{90}\text{K}_{120}$, 3 – $\text{N}_{120}\text{P}_{90}\text{K}_{240}$, 4 – $\text{N}_{180}\text{P}_{120}\text{K}_{180}$, 5 – $\text{N}_{180}\text{P}_{120}\text{K}_{360}$.

Азотные (аммиачная селитра) и калийные (хлористый калий) удобрения вносили в два приема: половина расчетной дозы –

под первый укос, вторая половина – под второй укос. Фосфорные удобрения (простой гранулированный суперфосфат) вносили в один прием весной.

Площадь посевной делянки составляла 63 м², уборочной – 24 м²; повторность опыта была трехкратной. Урожайность многолетних трав учитывали методом сплошной поделяночной уборки и отбора пробного снопа. В год проводили два укоса (первый – с 01 по 10 июня, второй – с 23 по 30 августа). Удельную активность ¹³⁷Cs в образцах почвы и растений измеряли на универсальном спектрометрическом комплексе Гамма Плюс (НПП “Доза”, Россия), ошибка измерений не превышала 10 %.

В год закладки опыта (1994) и в 2007 г. были отобраны образцы из каждого слоя почвы, равного 5 см, до глубины, равной 60 см, на определение плотности загрязнения ¹³⁷Cs ([Харкевич, 2011](#)).

Транспирацию посевов рассчитывали по формуле ([Пенман, 1972](#)), испаряемость – по формуле Иванова ([Иванов, 1954](#)), радиоактивный распад ¹³⁷Cs – по формуле Резерфорда (1903). Для расчета параметра биовыноса λ_3 использовалось уравнение, выведенное из данных полевых опытов, которое имеет следующий вид:

$$\text{Ln}(\text{Ak} / \text{Ai}) = \lambda \Sigma \text{vEt}, \quad (7)$$

где **Ak**, **Ai** – соответственно удельная активность ¹³⁷Cs на контроле и на варианте *i* ([Пакшина и др., 2017](#)). Для расчета параметра массопереноса ¹³⁷Cs в почве при фильтрации воды использовалось уравнение (5), где **ЕКО** = 15.3 мэкв/100г почвы, **S** = 31.3 м²/г, **T** = 279.6 К, **Pe** = 0.4 (естественный травостой), **Pe** = 0.35 (дискование), **Pe** = 0.25 (двухъярусная вспашка). При фильтрации воды из почвы выносятся не только доступные корневой системе растений формы ¹³⁷Cs, но и коллоидные частицы, содержащие труднорастворимые соединения ¹³⁷Cs ([Сковородникова, 2005](#)). При расчетах биовыноса ¹³⁷Cs учитывалось, что активность водорастворимой и обменной форм ¹³⁷Cs в оглеенных почвах составляет 5 % от общей активности ¹³⁷Cs ([Сковородникова, 2005](#)).

Для расчета испаряемости, дефицита атмосферной влаги, фильтрации влаги из слоя почвы, равного 60 см, использовали данные метеостанции “Красная гора”, наиболее близко расположенной к месту проведения опытов.

Каждый год (с 1994 по 2007) был разделен на три периода, включающего месяцы: I–IV, V–IX, X–XII. В каждый период года подсчитывали среднемесячную сумму осадков, испаряемости и дефицита атмосферной влаги. Дефицит атмосферной влаги в течение 14 лет наблюдали только в V–IX месяцы, который составил 1075 мм воды. Сумма выпавших осадков за 14 лет составила 7197 мм воды, испаряемость – 6163 мм, коэффициент увлажнения (КУ) – 1.17, который характеризует промывной тип водного режима почвы. Фильтрация паводковых вод по данным Брянскгипроводхоза составляет 26 % от общей суммы осадков за год, которая составила 134 мм в рассматриваемый период (1994–2007 гг.). Скорость фильтрации паводковых вод составила 0.8×10^{-7} м/с, что свидетельствует о высокой водопроницаемости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 представлены данные урожайности сена (ц/га) и транспирации многолетних трав (мм) в среднем за два укоса и в среднем за периоды вегетации в 1994–2007 гг.

Таблица 1. Урожайность сена и транспирация многолетних трав в среднем за период вегетации 1994–2007 гг.

Table 1. The average hay yield and transpiration of perennial grasses for the growing season from 1994 to 2007

Вариант	Естественный травостой			Сеяный травостой					
				дискование			вспашка		
	У	ΣвЕт	К.т.	У	ΣвЕт	К.т.	У	ΣвЕт	К.т.
Контроль	23.9	183	766	31.2	239	766	32.9	252	766
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀	104.3	798	765	128.4	982	765	139.6	1068	765
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀	94.7	724	764	118.0	903	765	120.8	924	765
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	121.5	929	765	140.0	1071	765	141.4	1082	765
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀	107.0	819	765	121.8	932	765	126.0	964	765

Примечание. У – урожайность сена в сумме за два укоса, ц/га; ΣвЕт – транспирация за вегетационный период, мм; К.т. – транспирационный коэффициент, равный расходу транспирирующей влаги (т) на формирование 1т воздушно-сухой фитомассы.

Установлено, что при внесении полного минерального удобрения урожайность трав зависит не только от соотношения доз калия к азоту, но и дозы фосфора. Увеличение отношения К : N в два раза при равной дозе фосфора вызывает его недостаток, и приводит к

снижению транспирации и урожайности (табл.1). Транспирационный коэффициент (К.т.) не зависит от дозы удобрения и способа обработки почвы, на всех вариантах опыта составляет равное значение. Независимость величины К.т. от дозы минерального удобрения было отмечено ранее в работе Шатилова ([Шатилов, 1978](#)). Высокие значения К.т. обусловлены использованием грунтовых вод в период вегетации трав при близком их уровне в центральной пойме. В таблице 2 приведены данные плотности загрязнения ^{137}Cs почвы по профилю корнеобитаемого слоя многолетних трав в 1994 г.

Таблица 2. Распределение плотности загрязнения почв ^{137}Cs по профилю корнеобитаемого слоя в 1994 г. (в год закладки опыта)

Table 2. The distribution of soil contamination (^{137}Cs) density in the root zone profile in 1994 (in the year of trial establishment)

Слой почвы, см Вариант	0–20		21–30		31–40	
	Ai	%	Ai	%	Ai	%
Естественный травостой	1 339.0	98.6	14.8	1.1	4.9	0.3
Сеяный травостой (обработка почвы – дискование)	1 311.0	99.0	10.0	0.7	3.7	0.3
Сеяный травостой (обработка почвы – двухъярусная вспашка)	1 323.4	95.4	54.7	4.0	8.9	0.6

Примечание. Ai – плотность загрязнения слоя ^{137}Cs , кБк/м².

По прошествии 8 лет после аварии на ЧАЭС плотность загрязнения ^{137}Cs слоя аллювиальной почвы, равного 0–20 см, на естественном травостое и при проведении поверхностного улучшения (дискование) поймы снизилась только на 1 % от начального загрязнения. После проведения коренного улучшения (двухъярусная вспашка), которое привело к перемешиванию почвы до глубины 45 см, плотность загрязнения ^{137}Cs слоя почвы 0–20 см уменьшилась на 5 %. Выпавший в 1986 г. ^{137}Cs переместился к 1994 г. до глубины 40 см. В таблице 3 представлены данные изменения плотности загрязнения ^{137}Cs корнеобитаемого слоя аллювиальной

Таблица 3. Распределение плотности загрязнения почвы ^{137}Cs по профилю корнеобитаемого слоя по вариантам опыта в 2007 г.

Table 3. The distribution of soil contamination (^{137}Cs) density in the root zone profile in various treatments (2007)

Слой почвы, см Вариант	0–20		21–30		31–40		41–50		51–60	
	Ai	%	Ai	%	Ai	%	Ai	%	Ai	%
Естественный травостой										
Контроль	788.8	97.5	18.4	2.1	2.5	0.3	0.5	0.07	0.32	0.06
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀	784.3	92.8	55.2	6.2	6.8	0.7	1.3	0.14	0.48	0.06
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀	805.9	91.3	70.9	7.5	7.6	0.8	2.9	0.3	0.72	0.07
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	790.4	91.7	56.5	6.2	14.7	1.6	3.9	0.4	0.92	0.1
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀	719.6	86.8	89.7	10.2	20.3	2.1	6.4	0.7	1.52	0.16
Сеяный травостой (обработка почвы – дискование)										
Контроль	803.2	96.6	24.0	3.0	1.6	0.2	1.0	0.14	0.48	0.06
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀	666.9	93.1	46.7	6.2	4.2	0.5	1.1	0.15	0.41	0.05
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀	762.6	94.7	33.6	3.9	9.0	1.0	9.2	0.35	0.56	0.05
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	777.0	97.8	16.9	2.0	1.1	0.1	0.4	0.05	0.32	0.04
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀	631.0	91.5	50.9	6.9	8.1	1.1	2.4	0.3	0.96	0.12
Сеяный травостой (обработка почвы – двухъярусная вспашка)										
Контроль	414.5	61.7	255.8	36.2	15.1	2.0	0.7	0.07	0.46	0.05
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀	311.1	49.6	278.0	42.3	56.1	7.9	0.9	0.14	0.32	0.06
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀	380.4	60.3	258.6	39.1	2.8	0.4	1.0	0.13	0.56	0.07
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	492.1	68.6	223.6	29.6	13.4	1.7	0.8	0.08	0.32	0.02
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀	427.3	68.6	200.9	20.8	3.3	0.4	1.0	0.14	0.36	0.06

Примечание. Ai – плотность загрязнения слоя 0–60 см ^{137}Cs (кБк/м²).

почвы в 2007 г. в зависимости от варианта опыта, заложенного в 1994 г. На контроле в слое аллювиальной почвы, равном 0–20 см, остается около 98 % ^{137}Cs от слоя, равного 0–60 см. Внесение минерального удобрения ускорило процесс десорбции ^{137}Cs из дернины и вынос его из слоя, равного 0–20 см. В этом слое активность ^{137}Cs составила в среднем 91 % от активности слоя 0–60 см.

Измельчение дернины при дисковании и оставление ее на поверхности не оказало существенного влияния на вынос ^{137}Cs , по сравнению с естественным травостоем. Активность ^{137}Cs в слое почвы 0–20 см на контроле и с внесением NPK составила соответственно 97 % и 94 % от активности слоя 0–60 см.

Измельчение дернины и перемешивание ее остатков с другими горизонтами при проведении двухъярусной вспашки на глубину 45 см повысило вынос ^{137}Cs из слоя 0–20 см на контроле и вариантах с внесением NPK. Активность ^{137}Cs в этом слое в среднем составила 62 % от активности ^{137}Cs в слое 0–60 см. На всех вариантах при разных обработках почвы ^{137}Cs присутствует в слое 50–60 см, на границе с оглеенной материнской породой Cg (60–90).

В таблице 4 представлена сравнительная оценка рассчитанных по уравнению (6) значений A_t ($t = 14$ лет) с экспериментальными значениями. Экспериментальные значения включали плотность загрязнения слоя почвы 0–60 см в 1994 г. и 2007 г., снижение плотности загрязнения за 14 лет, экспериментальные значения биовыноса фитомассы трав. Биовынос ^{137}Cs из почвы определялся путем умножения урожайности сена за 14 лет на удельную активность в нем ^{137}Cs . При расчете биовыноса ^{137}Cs из почвы фитомассой трав использовал значение $\lambda_3 \Sigma \text{ВЕТ}$, полученное по формуле (7).

Для расчета выноса ^{137}Cs из почвы во время паводков находились значения λ_2 по формуле (5) и значение P_e для разных способов обработки почвы. В работе ([Pakshina et al., 2018](#)) было показано, что между значениями P_e и относительной транспирацией имеет место линейная обратнопропорциональная зависимость. На рисунке представлены зависимости значений P_e от относительной транспирации трех мятликовых культур. Как следует из рисунка, число P_e уменьшается с увеличением потерь воды из почвы.

Таблица 4. Количественная оценка процессов выноса ^{137}Cs из слоя почвы 0–60 см за период с 1994 по 2007 гг.
Table 4. Quantitative assessment of ^{137}Cs removal from 0–60 cm soil layer for the period from 1994 to 2007

Вариант	1994	2007	Вынос ¹³⁷ Cs Ao- Ak		Процесс выноса ¹³⁷ Cs из почвы, экспериментальные и рассчитанные значения					
	Ao	Ak	Экс.	Рас.	Радиоактивный распад		Биовынос		Фильтрация воды	
					A ₁	Ao-At	Экс.	Рас.	Экс.	Рас.
Естественный травостой										
Контроль	1 359	810	549		985	374	13.2		161	
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀		848	511	526			22.1	26	115	128
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀		888	471				5.6	7.2	91	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀		856	503				16.8	17	112	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀		847	512				3.5	4	134	
Сеяный травостой (обработка почвы – дискование)										
Контроль	1 325	830	495		961	364	13.7		117	
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀		719	606	511			20.3	23.8	221	169
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀		809	516				4.2	5.6	147	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀		796	529				9.1	9.8	155	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀		693	632				2.5	3.1	265	
Сеяный травостой (обработка почвы – двухъярусная вспашка)										
Контроль	1 387	687	700		1006	381	9.1		310	
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀		646	741	724			13.2	23.6	347	319
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀		643	744				2.9	6.2	360	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀		730	357				7.4	13.2	269	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀		633	754				1.7	3.4	371	

Примечание: А₀, А_к (экс.), А_к (рас.) – соответственно начальная (1994 г.) и конечная экспериментальная и рассчитанная по формуле (6) для слоя 0–60 см плотность загрязнения почвы кБк/м².

При значениях относительной транспирации, равных 2 и 2,5, число Pe соответственно равно 0,4 и 0,25. Испаряемость в апреле во время паводков в среднем за 14 лет составила 53,9 мм. Отсюда $Q/\Sigma E_0 = 2,5$, здесь $Q = 134$ мм. При максимальных потерях воды на фильтрацию число Pe составляет 0,25, при минимальных – 0,4.

На рисунке представлена корреляционная зависимость между числом Pe и относительной транспирацией посевов мятликовых трав.

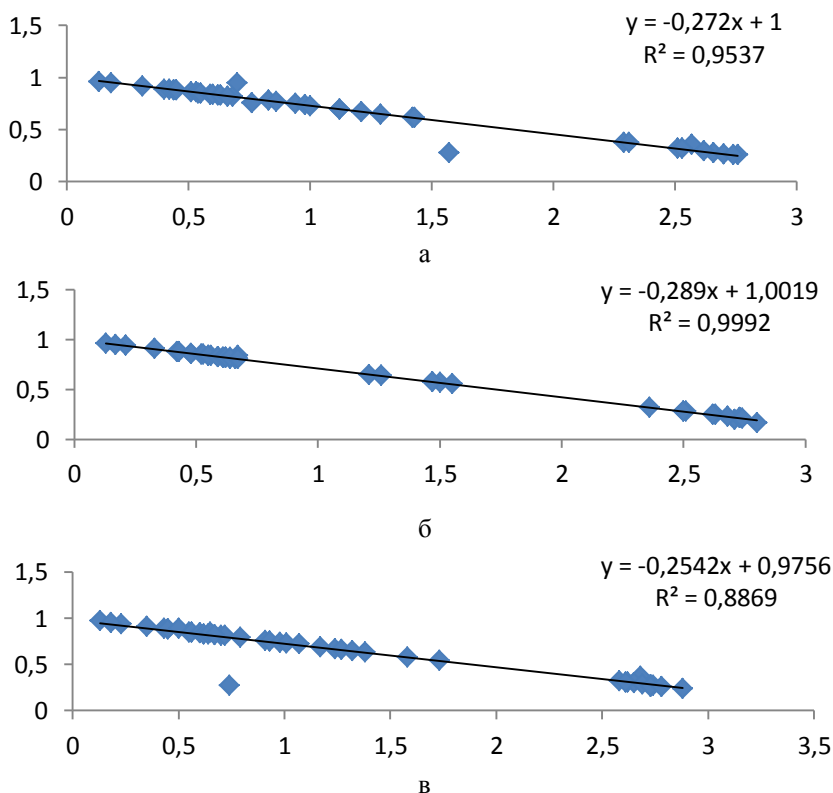


Рисунок. Корреляционная связь между числом Pe потоков почвенной влаги и относительной транспирацией посевов мятликовых трав: а – ежа сборная, б – овсяница луговая, в – двукосточник тростниковидный.

Figure. Correlation communication between Peclet's number of streams of soil moisture and a relative transpiration of crops of bluegrass herbs: а –

Dactylis glomerata, б – *Festuca pratensis*, в – *Phalaris arundinacea*.

Как следует из рисунка, с увеличением расхода почвенной влаги на транспирацию посевов трав или влажностью почвы, увеличивается конвективный поток ионов и снижается число Pe . С уменьшением расхода влаги посевами трав на транспирацию увеличивается диффузионный поток ионов с потоком жидкости и возрастает число Pe .

Как следует из таблицы 4, экспериментальные значения биовыноса ^{137}Cs из почвы фитомассой трав и выноса ^{137}Cs при фильтрации паводковых вод через слой почвы, равный 0–60 см, совпали.

Количественная оценка процессов выноса ^{137}Cs из корнеобитаемого слоя трав за период 1994–2007 гг. выявила, что вклад биовыноса в общий вынос ^{137}Cs невелик и на всех вариантах не превышает 4 %. Минеральные удобрения оказывают существенное влияние на биовынос ^{137}Cs из почвы. Особенно низкий биовынос ^{137}Cs наблюдается при внесении NPK при отношении доз $K : N = 2$.

Вынос ^{137}Cs при фильтрации воды через слой почвы в несколько раз превышает биовынос. Особенно высокий фильтрационный вынос ^{137}Cs наблюдается при проведении двухъярусной вспашки поймы.

Двухъярусная вспашка, увеличивая пористость и размер пор почвы, скорость потока влаги и уменьшая число Pe , повышает вынос ^{137}Cs в нижние слои почвы во время паводков, по сравнению с дискованием и естественным травостоем в 1.9 и 2.5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментально-полевых данных изменения плотности загрязнения ^{137}Cs почвы корнеобитаемого слоя многолетних трав со временем позволяет выявить следующее:

– Убывание плотности активности ^{137}Cs корнеобитаемого слоя зависит от вклада каждого процесса. Вклад радиоактивного распада, инфильтрации воды, биовыноса ^{137}Cs из почвы за 14 лет соответственно составил: 50–79 %; 20–50 %; 0.3–2.2 %.

– Двухъярусная вспашка повышает вынос ^{137}Cs из верхнего слоя почвы, равного 0–60 см, по сравнению с естественным травостоем.

стоим во время поводка и дискованием, соответственно в 2.5 и 1.9 раза.

– Экспериментально подтверждена формула, связывающая активность ^{137}Cs в корнеобитаемом слое со временем, которая имеет следующий вид: $\text{At} = \text{A0}(\text{e}^{-\lambda_1 t} \times \text{e}^{-\lambda_2 Q} \times \text{ne}^{-\lambda_3 \Sigma \text{вет}})$, где первый, второй, третий члены относятся соответственно к радиоактивному распаду, инфильтрации воды и биовыносу ^{137}Cs из почвы.

– Доказано, что причиной повышенного выноса ^{137}Cs из алювиальных почв, по сравнению с другими почвами Брянской области, является интенсивная миграция ^{137}Cs в период ежегодных паводков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борздыко И.А. Разработка системы автоматизированного мониторинга последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС в юго-западных районах Брянской области: Автореф. дис. ... канд. т. наук. Брянск. 2000. 19 с.
2. Волобуев В.Р. Расчет промывки засоленных почв. М.: Колос, 1975. 71 с.
3. Иванов Н.Н. Об определении величины испаряемости // Известия Всес. Географического общества. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–195.
4. Исаков А.Н., Володченков А.Н. Динамика содержания радионуклидов в почвах Калужской области // Агрохимический вестник. 2010. № 2. С. 11–14.
5. Маркина З.Н. Радиоэкологическое состояние агроландшафтов Юго-Запада России и их реабилитация: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. Брянск. 1999. 42 с.
6. Пакишина С.М. Исследование закономерности вертикального распределения солей по профилю почвы и ее частных случаев // Почвоведение. 1989. № 2. С. 86–93.
7. Пакишина С.М. Модель для долгосрочного прогноза загрязнения пахотных почв ^{137}Cs // Тезисы докладов XXXI Межвузовской научно-практической конференции “Наука и передовой опыт в производстве и учебном процессе”. Великие Луки. 1994. С. 24–26.
8. Пакишина С.М. Физическая интерпретация параметра солеотдачи почв и метод его расчета при проведении промывок засоленных почв // Доклады ВАСХНИЛ. 1985. № 12. С. 34–36.
9. Пакишина С.М., Белоус Н.М., Силаев А.Л., Смольский Е.В. Количественная оценка биологического выноса ^{137}Cs из почвы наземной

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

массой мятликовых трав при внесении минеральных удобрений // Радиация и риск. 2017. Т. 26. № 4. С. 99–110.

10. Пенман Х. Круговорот воды. Биосфера. М.: Мир, 1972. С. 60–72.

11. Харкевич Л.П. Эффективность способов обработки почвы и агрохимических приемов при производстве кормов на радиоактивных угодьях Юго-Запада России: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. Брянск. 2011. 45 с.

12. Шатилов И.С. Водопотребление и транспирация растений в полевых условиях. Научные основы программирования урожаев культур. М.: Колос, 1978. С. 53–66.

13. Сковородникова Н.А. Миграция цезия-137 в почвах различных биосистем Брянского Полесья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Брянск. 2005. 20 с.

14. Pakshina S.M., Belous N.M., Shapovalov V.F., Chesalin S.F., Smolsky E.V., Silaev A.L. Calculation of ^{137}Cs accumulation by phytomass of motley herbs // International Journal of Green Pharmacy. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 704–711.

REGULARITIES OF MIGRATION ^{137}CS IN THE ALLUVIAL SOIL

**S. M. Pakshina, L. P. Harkevich^{*}, N. M. Belous,
E. V. Smolsky^{**}**

Bryansk State Agrarian University

Russia, 243365, Bryansk region, s. Kokino, Sovetskaya str., 2a

^{}<https://orcid.org/0000-0003-2547-0239>,*

*^{**}e-mail: sev_84@mail.ru*

Received 28.02.2019, Revised 08.04.2019, Accepted 28.05.2019

This paper examines the patterns of ^{137}Cs migration in the alluvial soil of the central floodplain of the Iput River (Novozybkovsky district, Bryansk region). The effect of water filtration during flooding, bioremoval by plants and ^{137}Cs radioactive decay on the migration process of Cs ions in the soil was studied. The contribution of radioactive decay, filtration of water and bioremoval to the total removal of ^{137}Cs from the soil during the period from 1994 to 2007 was 50–79, 20–50, 0.3–2.2 % corespondingly, depending on the treatment method, the dose of mineral fertilizers and the ratio of nutrients. It was found that the increased removal of ^{137}Cs from the soil layer of the floodplain during double-depth plowing, compared with disking and natural grass stands, is determined by a lower Peclet number, which indicates the prevalence of convective ^{137}Cs transfer in contrast to diffusion in the total solution flow.

Keywords: ^{137}Cs , migration, regularity, radioactive decay, biocarrying out, water filtration.

REFERENCES

1. Borzdyko I.A., *Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo monitoringa posledstviy katastrofy na Chernobyl'skoi AES v yugo-zapadnykh raionakh Bryanskoi oblasti: Avtoref. dis. ... kand. t. nauk* (Development of a system for automated monitoring of the consequences of the disaster at the Chernobyl nuclear power plant in the south-western districts of the Bryansk region, Extended abstract of Cand. Tech. sci. thesis), Bryansk, 2000, 19 p.
2. Volobuev V.R., *Raschet promyvki zasolennykh pochv* (Calculation of desalinization of saline soils), Moscow: Kolos, 1975, 71 p.
3. Ivanov N.N., Ob opredelenii velichiny isparyaemosti (On determining the value of evaporation), *Izvestiya Vses. Geograficheskogo obshchestva*, 1954, Vol. 86, No. 2, pp. 189–195.
4. Isakov A.N., Volodchenkov A.N., *Dinamika sodержaniya radionuklidov v pochvakh Kaluzhskoi oblasti* (Dynamics of radionuclide content in the soils of the Kaluga region), *Agrokhimicheskiy vestnik*, 2010, No. 2, pp. 11–14.
5. Markina Z.N., *Radioekologicheskoe sostoyaniye agrolandshaftov Yugo-Zapada Rossii i ikh reabilitatsiya: Avtoref. dis. ... dokt. s.-kh. nauk* (Radioecological state of agricultural landscapes of South-West Russia and their rehabilitation, Extended abstract of Dr. Agric. sci. thesis), Bryansk, 1999, 42 p.
6. Pakshina S.M., *Issledovanie zakonornosti vertikal'nogo raspredeleniya soley po profilu pochvy i ee chastichnykh sluchaev* (Study of the regularity of the vertical distribution of salts in the soil profile and its partial cases), *Pochvovedenie*, 1989, No. 2, pp. 86–93.
7. Pakshina S.M., *Model' dlya dolgosrochnogo prognoza zagryazneniya pakhotnykh pochv ^{137}Cs* (Model for a long-term forecast of ^{137}Cs contamination of arable soil), *Tezisy dokladov XXXI Mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauka i peredovoy opyt v proizvodstve i uchebnom protsesse"* (Proc. of the XXXI Inter-University Scientific-Practical Conf. "Science and Advanced Experience in Production and the Educational Process"), Velikie Luki, 1994, pp. 24–26.
8. Pakshina S.M., *Fizicheskaya interpretatsiya parametra soleotdachi pochv i metod ego rascheta pri provedenii promyvok zasolennykh pochv* (Physical interpretation of the soil salt transfer parameter and the method of its calculation during the desalinization of saline soils), *Doklady VASKhNIL*, 1985, No. 12, pp. 34–36.
9. Pakshina S.M., Belous N.M., Silaev A.L., Smol'skii E.V., *Kolichestvennaya otsenka biologicheskogo vynosа ^{137}Cs iz pochvy nazemnoi*

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

massoi myatlikovykh trav pri vnesenii mineral'nykh udobrenii (Quantitative assessment of ^{137}Cs biological removal from the soil by above the ground mass of bluegrass when mineral fertilizers are applied), *Radiatsiya i risk*, 2017, Vol. 26, No. 4, pp. 99–110.

10. Penman Kh., *Krugovorot vody. Biosfera* (The water cycle. Biosphere), Moscow: Mir, 1972, pp. 60–72.

11. Kharkevich L.P., *Effektivnost' sposobov obrabotki pochvy i agrokhimicheskikh priemov pri proizvodstve kormov na radioaktivnykh ugod'yakh Yugo-Zapada Rossii: Avtoref. dis. ... dokt. s.-kh. nauk* (The effectiveness of methods of tillage and agrochemical methods in the production of feed on radioactive lands of South-West Russia, Extended abstract of Dr. Agric. sci. thesis), Bryansk, 2011, 45 p.

12. Shatilov I.S., *Vodopotreblenie i transpiratsiya rastenii v polevykh usloviyakh. Nauchnye osnovy programmirovaniya urozhaev kul'tur* (Water consumption and transpiration of plants in the field. Scientific basis for programming crop yields), Moscow: Kolos, 1978, pp. 53–66.

13. Skovorodnikova N.A., *Migratsiya tseziya-137 v pochvakh razlichnykh biosistem Bryanskogo Poles'ya: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Migration of cesium-137 in the soils of various biosystems of the Bryansk Polesie, Extended abstract of Cand. Agric. sci. thesis), Bryansk, 2005, 20 p.

14. Pakshina S.M., Belous N.M., Shapovalov V.F., Chesalin S.F., Smolsky E.V., Silaev A.L., Calculation of ^{137}Cs accumulation by phytomass of MOTLEY herbs, *International Journal of Green Pharmacy*, 2018, Vol. 12, No. 3, pp. 704–711.

Ссылки для цитирования:

Пакшина С.М., Харкевич Л.П., Белоус Н.М., Смольский Е.В. Закономерности миграции ^{137}Cs в аллювиальной почве // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97. С. 165-180. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-165-180

For citation:

Pakshina S.M., Harkevich L.P., Belous N.M., Smolsky E.V. Regularities of migration ^{137}Cs in the alluvial soil, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, V. 97, pp. 165-180, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-165-180