

Радиоэкология и кормопроизводство

УДК 633.2:581.1:54.027:631.4

doi: 10.15389/agrobiology.2019.4.832rus

БИОВЫНОС ^{137}Cs ИЗ ПОЧВЫ МНОГОЛЕТНИМИ МЯТЛИКОВЫМИ ТРАВАМИ В СВЯЗИ С МИНЕРАЛЬНЫМ ПИТАНИЕМ И ДОСТУПНОСТЬЮ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ**С.М. ПАКШИНА¹, В.Ф. ШАПОВАЛОВ¹, С.Ф. ЧЕСАЛИН¹, Е.В. СМОЛЬСКИЙ¹, В.Б. КОРЕНЕВ²**

Расширение зон антропогенных нарушений агроландшафта и загрязнение почв создают серьезную экологическую угрозу. К наиболее опасным поллютантам относят радионуклиды с большим периодом полураспада, попадающие в почву при антропогенных катастрофах. В мировой литературе накоплены обширные данные о влиянии мелиорантов, органических и минеральных удобрений на урожайность и биовынос ^{137}Cs из почвы сельскохозяйственными культурами. В настоящем исследовании нами впервые представлены данные о влиянии природных и антропогенных факторов на миграцию ^{137}Cs в системе почва—растения на примере разных видов семейства мятликовых кормового назначения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС в зависимости от режимов минерального питания. В условиях радиоактивного загрязнения юго-запада Брянской области в период с 2009 по 2011 годы мы исследовали биологический вынос ^{137}Cs из почвы растениями при разной дозе полного минерального удобрения. Почва опытного участка аллювиальная луговая песчаная, агрохимическая характеристика: pH_{KCl} 5,2-5,6, гумус — 3,08-3,33 %, подвижный фосфор — 620-840 мг/кг, обменный калий — 133-180 мг/кг. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs 493-872 кБк/м². Исследования проводили на однодидовых посевах многолетних мятликовых трав *Dactylis glomerata* L., *Festuca pratensis* Huds. и *Phalaroides arundinacea* L. Схема опыта включала следующие варианты: контроль без удобрения, $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{90}$, $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$; $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{150}$, $\text{N}_{120}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$, $\text{N}_{120}\text{P}_{60}\text{K}_{150}$ и $\text{N}_{120}\text{P}_{60}\text{K}_{180}$ (применяли аммиачную селитру, простой гранулированный суперфосфат, хлористый калий). Удобрения вносили ежегодно: азотные и калийные — в два приема, половина расчетной дозы под 1-й укос, вторая половина под 2-й укос, фосфорные — полной дозой под 1-й укос. Период вегетации культур в 2010 году характеризовался повышенным радиационным балансом по сравнению с другими годами. Оптимальные для роста и развития культур фитоклиматические условия от 1-го укоса до 2-го сложились в 2011 году. Период вегетации от 1-го укоса до 2-го отличался от такового до 1-го укоса повышенным радиационным балансом и, соответственно, повышенной испаряемостью. Дефицит почвенной влаги от возобновления вегетации до 1-го укоса не повлиял на водный режим посевов трав из-за близкого стояния грунтовых вод после периодического затопления поймы. Для обоснования обратной пропорциональной зависимости удельной активности ^{137}Cs фитомассы от урожайности определили транспирационный коэффициент, относительную транспирацию, кратность снижения удельной активности ^{137}Cs в фитомассе трав, оценили процесс биовыноса. Было показано, что интенсивность выноса ^{137}Cs из почвы посевами трав зависит от дозы полного минерального удобрения. Наименьшей интенсивностью биовыноса ^{137}Cs характеризуется *Dactylis glomerata* L., наибольшей — *Phalaroides arundinacea* L. Основным фактором, регулирующим биовынос ^{137}Cs из почвы, служит относительная транспирация, определяющая биодоступность почвенной влаги для корневой системы растений и число Пекле (Pe, соотношение диффузии и конвекции в потоке влаги). При оценке зависимости числа Pe от относительной транспирации коэффициент корреляции (r) у трех изученных видов мятликовых трав составил 0,8-0,9. Выведено уравнение биовыноса ^{137}Cs из почвы фитомассой многолетних мятликовых трав при применении минеральных удобрений, которое отражает закономерное изменение удельной активности ^{137}Cs фитомассы под действием вносимых удобрений и справедливо для исследуемых видов мятликовых трав.

Ключевые слова: аллювиальная луговая песчаная почва, ^{137}Cs , многолетние мятликовые травы, биологический вынос, интенсивность выноса, транспирация, относительная транспирация, НРК удобрения.

Естественные кормовые угодья, которые служат одним из главных источников грубых и сочных кормов для животноводства, также играют многофункциональную роль в формировании устойчивого агроландшафта. Поэтому изучение механизмов повышения их продуктивности и восстановления после антропогенного нарушения вызывает большой интерес (1-5). В условиях радиоактивного загрязнения, наряду с повышением продуктивности сенокосов и пастбищ, важным становится получение кормов, соответ-

ствующих нормативу по допустимому содержанию радионуклидов (6-9).

В литературе накоплен большой объем данных о влиянии мелиорантов, органических и минеральных удобрений на урожайность и биовынос из почвы ^{137}Cs сельскохозяйственными культурами (10-13). Экспериментально доказано, что калийные удобрения снижают удельную активность ^{137}Cs продукции растениеводства (14-18). Внесение калийных удобрений стало основным агрохимическим приемом в условиях радиоактивного загрязнения почв. При исследовании разных доз N, P и K в составе полного минерального удобрения обнаружено, что переход ^{137}Cs из почвы в продукцию растениеводства зависит не только от дозы калия, но и от соотношения доз калия и азота, а также количества азота в составе полного минерального удобрения (19-21).

Нами впервые в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС исследована роль природных и антропогенных факторов на процесс миграции ^{137}Cs в системе почва—растения (на примере разных видов *Poaеae* кормового назначения) и предложен механизм, регулирующий биовынос ^{137}Cs из почвы через относительную транспирацию, определяющую доступность почвенной влаги для растений.

Цель работы заключалась в изучении влияния разных доз полного минерального удобрения на доступность почвенной влаги для корневой системы и интенсивность процесса биовыноса ^{137}Cs из почвы одновидовыми посевами многолетних мятликовых трав.

Методика. Исследования проводили в юго-западной части Брянской области на луговом участке центральной поймы реки Ипуть. Почва опытного участка аллювиальная луговая маломощная среднегумусная, песчаная на супесчаном аллювии со следующим разделением профиля на генетические горизонты: A_d (0-4 см), A_1 (4-18 см); B_1 (18-40 см); B_g (40-60 см), C_g (60-90 см). Агрохимическая характеристика почвы: pH_{KCl} 5,2-5,6, гидролитическая кислотность — 2,6-2,8 мг-экв/100 г почвы, сумма поглощенных оснований — 11,3-13,1 мг-экв/100 г почвы, емкость катионного обмена — 12,9-15,9 мг-экв/100 г почвы, насыщенность основаниями 81-82 %; содержание гумуса — 3,08-3,33 % (по Тюрину), подвижного фосфора — 620-840 мг/кг, обменного калия — 133-180 мг/кг (по Кирсанову). Плотность загрязнения опытного участка ^{137}Cs в период проведения работ составляла 493-872 кБк/м².

Интенсивность биовыноса ^{137}Cs из почвы при разных дозах полного минерального удобрения изучали на одновидовых посевах многолетних мятликовых трав. По фону двухъярусной вспашки высевали ежу сборную (*Dactylis glomerata* L., сорт ВИК 61), овсяницу луговую (*Festuca pratensis* Huds., сорт Дединовска) и двукосточник тростниковидный (*Phalaroides arundinacea* L., сорт Припятский); нормы посева всех семян — 15 кг/га. Схема опыта: I вариант — контроль без удобрений, II — $N_{90}P_{60}K_{90}$, III — $N_{90}P_{60}K_{120}$, IV — $N_{90}P_{60}K_{150}$, V — $N_{120}P_{60}K_{120}$, VI — $N_{120}P_{60}K_{150}$, VII — $N_{120}P_{60}K_{180}$. Применяли аммиачную селитру, простой гранулированный суперфосфат, хлористый калий. Удобрения вносили ежегодно: азотные и калийные в два приема (половина расчетной дозы под 1-й укос, вторая половина — под 2-й укос), фосфорные — полной дозой в один прием под 1-й укос. Площадь посевной делянки составляла 63 м², уборочной — 24 м², повторность опыта 3-кратная.

Урожайность трав учитывали методом сплошной поделяночной уборки и отбора пробного снопа. В год проводили два укоса (1-й укос — с 1 по 10 июня, 2-й — с 23 августа по 1 сентября).

Величину транспирации определяли по формуле X. Пенмана (22),

испаряемость — по М.И. Будыко (23). Транспирационный коэффициент вычисляли как $K_t = \Sigma_v E_T / Y$ [1], где $\Sigma_v E_T$ — суммарная транспирация за период вегетации, мм; Y — урожайность воздушно-сухой фитомассы трав, т/га. Относительную транспирацию рассчитывали по формуле: $\alpha = \Sigma_v E_T / \Sigma_v E_0$ [2], где $\Sigma_v E_T$ и $\Sigma_v E_0$ — соответственно суммарная транспирация и испаряемость за период вегетации.

Удельную активность ^{137}Cs в исследуемых растительных образцах определяли на универсальном спектрометрическом комплексе Гамма Плюс (НПП «Доза», Россия), установленная ошибка измерений не более 10 %.

Расчет среднесуточных значений коротковолновой части радиационного баланса проводился по данным срочных наблюдений по методу трапещий (24). Для вычисления среднесуточных значений суммарного радиационного баланса использовались эмпирические коэффициенты (25, 26). Среднесуточные значения фотосинтетически активной радиации (ФАР) рассчитывали в соответствии с описанием (27).

Полученные данные подвергали дисперсионному анализу с использованием программного обеспечения Excel 7.0 и Statistic 7.0 («StatSoft, Inc.», США). Представлены средние (M). Достоверность различий с контролем и между вариантами оценивали по наименьшей существенной разности (НСР_{05}). Различия считали статистически значимыми при выходе за границы НСР.

Результаты. В таблице 1 приведены фитоклиматические и метеорологические показатели за время проведения опытов. Сезон вегетации 2010 года по сравнению с другими годами характеризовался повышенным радиационным балансом. Оптимальные для роста и развития культур фитоклиматические условия от 1-го до 2-го укоса сложились в 2011 году. Период от 1-го укоса до 2-го отличался от такового до 1-го укоса повышенным радиационным балансом и, соответственно, большей испаряемостью.

1. Фитоклиматические условия весенне-летней вегетации посевов мятликовых трав по укосам и годам наблюдения (Брянская обл.)

Показатель	2009		2010		2011	
	1	2	1	2	1	2
Сумма среднесуточных значений радиационного баланса в период вегетации, МДж/м ²	394	569	439	688	432	485
Сумма среднесуточных значений фотосинтетически активной радиации в течение вегетации, МДж/м ²	266	460	268	426	256	336
Температура воздуха, °С	13,9	19,4	16,2	25,0	16,3	21,1
Удельная теплота парообразования, МДж/кг	2,47	2,46	2,47	2,45	2,47	2,45
Испаряемость за период вегетации, мм	160	231	178	281	175	198
Сумма осадков за период вегетации, мм	75,8	155,3	86,7	200,7	84,1	169,1
Дефицит влаги в период вегетации, мм	-84	-76	-91	-80	-91	-29
Коэффициент увлажнения	0,47	0,67	0,49	0,71	0,48	0,85

Примечание. 1 — до 1-го укоса; 2 — от 1-го до 2-го укоса.

Дефицит почвенной влаги в период от возобновления вегетации до 1-го укоса не повлиял на водный режим посевов трав из-за близкого стояния грунтовых вод после периодического затопления поймы. В период от 1-го до 2-го укоса особенно большой дефицит влаги наблюдался в 2010, минимальный — в 2011 году. Снижение уровня грунтовых вод и дефицит почвенной влаги сказались на водном режиме посевов и, как оказалось, на продуктивности мятликовых трав в период до 2-го укоса.

Транспирационный коэффициент равен транспирационному расходу влаги на формирование 1 т сена мятликовых трав. Как следует из таблицы 2, до 1-го укоса при достатке почвенной влаги значения K_t определялись фитоклиматическими условиями возделывания и не зависели от

видовых особенностей культур. Видовые особенности проявились при недостатке почвенной влаги в 2010 году, вызванном понижением уровня грунтовых вод, повышением радиационного баланса, испаряемости и температуры воздуха в период вегетации от 1-го до 2-го укоса. В этих условиях только двукосточник тростниковидный снижал поглощение ФАР и расход воды на формирование урожая.

2. Транспирационный коэффициент К_т у многолетних мятликовых трав по годам и срокам вегетации (Брянская обл.)

Вид растения	2009	2010	2011
От возобновления вегетации до 1-го укоса			
Ежа сборная	452	500	515
Овсяница луговая	450	500	510
Двукосточник тростниковидный	450	500	510
От 1-го до 2-го укоса			
Ежа сборная	472	490	444
Овсяница луговая	472	497	439
Двукосточник тростниковидный	472	465	442

На опытном участке наблюдалась изначальная неравномерность загрязнения ¹³⁷Cs. На делянках, занятых ежой сборной, овсяницей луговой, двукосточником тростниковидным, плотность загрязнения ¹³⁷Cs пахотного горизонта почвы варьировала в пределах соответственно 725-837, 615-671 и 493-631 кБк/м². Такие значения плотности поверхностного загрязнения ¹³⁷Cs характеризуются как высокие (28).

3. Плотность загрязнения ¹³⁷Cs (кБк/м²) в пахотном горизонте почвы под изученными культурами по вариантам опыта и годам исследования (Брянская обл.)

Вариант	Ежа сборная			Овсяница луговая			Двукосточник тростниковидный		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Контроль	726	726	725	668	669	667	493	493	493
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	842	839	841	650	649	651	629	631	629
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	790	785	785	637	634	633	541	541	539
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀	812	809	809	667	668	671	524	526	522
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	837	840	834	670	670	667	546	542	545
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀	800	794	803	678	679	669	498	496	496
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀	764	766	761	615	609	622	510	502	537

Наибольшую урожайность сена мятликовых трав во всех вариантах опыта в 1-й укос получили в 2010 году при значении ФАР 268 МДж/м² и К_т = 500. В период от 1-го до 2-го укоса наибольшую урожайность культур во всех вариантах отмечали в 2011 году при значении ФАР 336 МДж/м² и К_т = 442. Во всех вариантах в 1-й и 2-й укосы урожайность сена возрастала при увеличении дозы минерального удобрения от 150 до 210 кг д.в. на 1 га. В таблице 5 приведена удельная активность ¹³⁷Cs полученной в опыте воздушно-сухой фитомассы мятликовых трав. Как следует из данных таблиц 4 и 5, между урожайностью и удельной активностью ¹³⁷Cs сена проявилась обратно пропорциональная зависимость: рост урожайности культуры с повышением доз минеральных удобрений приводил к уменьшению удельной активности ¹³⁷Cs в фитомассе.

4. Урожайность (т/га) воздушно-сухой массы многолетних мятликовых трав по вариантам опыта и годам исследования (Брянская обл.)

Вариант	Ежа сборная				Овсяница луговая				Двукосточник тростниковый			
	2009	2010	2011	среднее	2009	2010	2011	среднее	2009	2010	2011	среднее
В 1-й укос												
Контроль	1,12	2,43	1,75	1,77	1,17	2,34	1,9	1,80	1,23	2,48	1,86	1,86
N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅	3,96	8,94	7,8	6,90	4,25	8,91	8,51	7,22	4,37	9,32	8,78	7,49
N ₄₅ P ₆₀ K ₆₀	3,98	9,48	7,87	7,11	4,44	8,42	8,6	7,15	4,51	9,55	8,86	7,64
N ₄₅ P ₆₀ K ₇₅	4,28	9,62	8,06	7,32	4,43	9,72	9,27	7,81	4,69	9,77	9,31	7,92
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	4,55	9,33	8,59	7,49	4,87	9,38	8,9	7,72	4,89	9,41	9,14	7,81
N ₆₀ P ₆₀ K ₇₅	5,02	5,58	8,61	6,40	5,22	9,67	9,16	8,02	5,59	9,72	9,26	8,19

Продолжение таблицы 4

N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀	5,06	9,82	9,31	8,06	5,47	9,96	9,33	8,25	6,12	10,23	9,45	8,60
НСР ₀₅	4,26	4,35	4,04	4,18	3,98	3,84	4,44	4,12	3,89	4,08	4,26	4,16
Во 2-й укос												
Контроль	0,61	1,14	0,96	0,90	0,64	1,21	0,93	0,93	0,67	1,28	1,02	0,99
N ₄₅ K ₄₅	1,97	3,09	3,7	2,92	2,04	3,15	3,67	2,95	2,10	3,20	4,05	3,12
N ₄₅ K ₆₀	2,06	3,35	3,85	3,09	2,09	3,37	3,77	3,08	2,18	3,40	4,18	3,25
N ₄₅ K ₇₅	2,16	3,49	3,94	3,20	2,33	3,46	3,89	3,23	2,23	3,51	4,25	3,33
N ₆₀ K ₆₀	2,23	3,42	4,22	3,29	2,38	3,54	4,25	3,39	2,45	3,62	4,51	3,53
N ₆₀ K ₇₅	2,59	3,57	4,37	3,51	2,54	3,61	4,59	3,58	2,54	3,69	4,75	3,66
N ₆₀ K ₉₀	2,62	3,76	4,44	3,61	2,59	3,78	4,67	3,68	3,86	3,81	5,21	4,29
НСР ₀₅	1,29	0,98	1,24	1,47	1,26	1,48	1,67	1,51	1,58	1,36	1,72	1,56

5. Удельная активность ¹³⁷Cs (Бк/кг) воздушно-сухой массы многолетних мятликовых трав по вариантам опыта и годам исследования (Брянская обл.)

Вариант	Ежа сборная				Овсяница луговая				Двукосточник тростниковый			
	2009	2010	2011	среднее	2009	2010	2011	среднее	2009	2010	2011	среднее
Во 1-й укос												
Контроль	2990	2866	2952	2936	2880	2796	2877	2851	2325	2296	2378	2333
N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅	1322	1318	1338	1326	1215	1208	1231	1218	1208	1186	1227	1207
N ₄₅ P ₆₀ K ₆₀	845	809	848	834	834	811	842	829	736	698	744	726
N ₄₅ P ₆₀ K ₇₅	479	437	461	459	440	421	456	439	398	363	418	393
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	469	479	492	480	476	422	467	455	426	412	458	432
N ₆₀ P ₆₀ K ₇₅	280	286	313	293	312	285	321	306	259	238	268	255
N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀	275	268	297	280	289	256	286	277	255	231	258	248
НСР ₀₅	56	68	55	50	42	56	55	45	66	59	75	45
Во 2-й укос												
Контроль	2862	2788	2966	2872	2910	2655	2793	2786	2264	2196	2308	2256
N ₄₅ K ₄₅	1308	1285	1301	1298	1290	1213	1262	1255	1309	1195	1210	1238
N ₄₅ K ₆₀	802	776	798	792	754	708	743	735	717	637	698	684
N ₄₅ K ₇₅	347	345	352	348	363	312	342	339	330	308	337	325
N ₆₀ K ₆₀	434	437	452	441	446	409	453	436	436	411	437	428
N ₆₀ K ₇₅	376	381	368	375	352	388	361	367	359	318	385	354
N ₆₀ K ₉₀	305	333	346	328	315	302	352	323	310	296	342	316
НСР ₀₅	84	76	68	63	105	98	87	95	63	57	66	69

6. Коэффициенты накопления ¹³⁷Cs в воздушно-сухой массе многолетних мятликовых трав по вариантам опыта и годам исследования (Брянская обл.)

Вариант	Ежа сборная			Овсяница луговая			Двукосточник тростниковый		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Во 1-й укос									
Контроль	1,03	0,99	1,02	1,08	1,04	1,08	1,18	1,16	1,20
N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅	0,39	0,39	0,40	0,47	0,47	0,47	0,48	0,47	0,49
N ₄₅ P ₆₀ K ₆₀	0,27	0,26	0,27	0,33	0,32	0,33	0,34	0,32	0,34
N ₄₅ P ₆₀ K ₇₅	0,15	0,14	0,14	0,17	0,16	0,15	0,19	0,17	0,20
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0,14	0,14	0,15	0,18	0,16	0,18	0,20	0,19	0,21
N ₆₀ P ₆₀ K ₇₅	0,09	0,09	0,10	0,12	0,11	0,12	0,13	0,12	0,14
N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀	0,09	0,09	0,10	0,12	0,11	0,12	0,13	0,12	0,12
Во 2-й укос									
Контроль	0,87	0,96	1,02	1,09	0,99	1,05	1,15	1,11	1,17
N ₄₅ K ₄₅	0,39	0,38	0,39	0,50	0,47	0,49	0,52	0,48	0,48
N ₄₅ K ₆₀	0,26	0,25	0,25	0,30	0,28	0,29	0,33	0,30	0,32
N ₄₅ K ₇₅	0,11	0,10	0,11	0,14	0,12	0,13	0,16	0,15	0,16
N ₆₀ K ₆₀	0,13	0,13	0,14	0,17	0,16	0,17	0,20	0,19	0,20
N ₆₀ K ₇₅	0,12	0,12	0,12	0,13	0,15	0,14	0,18	0,16	0,19
N ₆₀ K ₉₀	0,10	0,11	0,11	0,13	0,12	0,14	0,18	0,17	0,19

Расчет коэффициентов накопления ¹³⁷Cs в воздушно-сухой массе мятликовых трав по вариантам опыта (табл. 6) позволил установить обратно пропорциональную зависимость между этими коэффициентами и урожайностью, а также дозами минеральных удобрений. Для раскрытия механизма проявления такой зависимости мы рассчитали значения относительной транспирации ($\Sigma_B E_T / \Sigma_B E_0$) по вариантам опыта в 1-й и 2-й укосы в разные годы. Относительная транспирация используется для определения степени водообеспеченности посевов, срока поливов культур. Эта величина характеризует доступность почвенной влаги корневой системе растения. Минеральные удобрения повышают транспирацию посевов (29, 30) и,

соответственно, значение $\Sigma_v E_T / \Sigma_v E_0$. При оптимальных условиях водного режима величина относительной транспирации культур — 0,70-0,85 (31).

7. Относительная транспирация посевов многолетних мятликовых трав по вариантам опыта и годам исследования (Брянская обл.)

Вариант	2009			2010			2011 год		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	От возобновления вегетации до 1-го укоса								
N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅	1,12	1,21	1,24	2,51	2,51	2,62	2,29	2,50	2,58
N ₄₅ P ₆₀ K ₆₀	1,12	1,26	1,27	2,66	2,36	2,68	2,31	2,50	2,61
N ₄₅ P ₆₀ K ₇₅	1,21	1,26	1,32	2,7	2,73	2,74	2,37	2,73	2,74
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	1,29	1,50	1,38	2,62	2,63	2,65	2,53	2,62	2,69
N ₆₀ P ₆₀ K ₇₅	1,42	1,47	1,58	1,57	2,71	2,73	2,53	2,68	2,73
N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀	1,43	1,55	1,73	2,76	2,8	2,88	2,74	2,74	2,78
	От 1-го до 2-го укоса								
N ₄₅ K ₄₅	0,40	0,42	0,43	0,55	0,55	0,56	0,83	0,55	0,91
N ₄₅ K ₆₀	0,42	0,43	0,45	0,59	0,59	0,6	0,86	0,59	0,93
N ₄₅ K ₇₅	0,44	0,48	0,45	0,62	0,61	0,62	0,88	0,61	0,93
N ₆₀ K ₆₀	0,45	0,48	0,50	0,60	0,62	0,64	0,94	0,62	1,01
N ₆₀ K ₇₅	0,53	0,52	0,52	0,63	0,64	0,65	0,98	0,64	1,07
N ₆₀ K ₉₀	0,54	0,53	0,79	0,66	0,67	0,67	1,00	0,67	1,17

Примечание. 1 — ежа сборная, 2 — овсяница луговая, 3 — двукосточник тростниковидный.

В период вегетации до 1-го укоса, величина относительной транспирации во всех вариантах превышала 1,0 (табл. 7). Эти данные указывают на то, что посевы испытывали избыток влаги, вызванный близким залеганием грунтовых вод после затопления поймы в апреле. От 1-го до 2-го укоса этот показатель превысил 1,0 только в 2011 году. В 2009 и 2010 годах при большом дефиците влаги, равном 76-80 мм, относительная транспирация не достигала оптимального значения ни в одном варианте посевов. Оптимальными для роста и развития культур метеорологическими и фитоклиматическими условиями характеризовался 2011 год, когда посевы развивались при достатке почвенной влаги.

Результаты расчетов (см. табл. 7) показывают, что с повышением дозы полного минерального удобрения возрастает величина относительной транспирации при недостатке и избытке почвенной влаги. Электролиты, входящие в состав минеральных удобрений, вызывая сжатие двойных электрических слоев на стенках капилляров почвы, уменьшают долю адсорбированных ионов ^{137}Cs в потоке раствора к корневой системе растения (24). Увеличение дозы минерального удобрения повышает доступность почвенной влаги для корней растения, уменьшает число Pe и приводит к уменьшению удельной активности ^{137}Cs в фитомассе трав. Относительная транспирация, определяющая биодоступность почвенной влаги и число Pe при разном уровне минерального питания, — одна из основных причин проявления обратно пропорциональной зависимости между удельной активностью ^{137}Cs и урожайностью фитомассы у мятликовых трав.

Данные по удельной активности ^{137}Cs в фитомассе мятликовых трав (см. табл. 5) отражают связь между удельной активностью в контроле и при применении разных доз минеральных удобрений. Эта связь описывается следующей формулой: $A_i = A_k \times \exp(-\lambda \Sigma_b E_T)$ [3], где A_i и A_k — удельная активность ^{137}Cs в фитомассе соответственно в варианте i и в контроле, Бк/кг; $\Sigma_b E_T$ — транспирация в период вегетации, мм; λ — относительная интенсивность биовыноса (постоянная величина для определенных условий; чем больше значение λ , тем меньше удельная активность фитомассы в варианте i по сравнению с контролем). При увеличении дозы полного минерального удобрений выше 195 кг д.в. на 1 га разность в значениях λ равна 0 или очень мала. Эти данные подтверждают экспоненциальную зависимость удельной активности фитомассы трав в варианте i от транспирации и адекватность формулы [3] реальному процессу биовыноса.

Следует отметить, что при равных условиях возделывания в каждом из шести опытных вариантов в 1-й и 2-й укосы отмечали изменения в интенсивности биовыноса ^{137}Cs культурами в зависимости от вида, о чем сообщают другие авторы (5, 32-35). В нашем эксперименте наименьшей интенсивностью биовыноса ^{137}Cs из почвы характеризуется ежа сборная, наибольшей — двукисточник тростниковидный.

8. Относительная интенсивность (λ) биовыноса ^{137}Cs из почвы фитомассой многолетних мятликовых трав по вариантам опыта и годам исследования (Брянская обл.)

Вариант	2009 год			2010 год			2011 год		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	От возобновления вегетации до 1-го укоса								
N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅	5,7	5,0	4,7	2,3	2,3	1,8	2,4	2,1	1,8
N ₄₅ P ₆₀ K ₆₀	8,3	7,4	6,6	3,2	3,4	3,0	3,6	3,1	3,0
N ₄₅ P ₆₀ K ₇₅	10,8	10,8	9,7	4,4	4,3	3,9	4,7	4,2	3,7
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	9,7	8,5	9,0	4,5	4,4	4,1	4,5	4,2	3,8
N ₆₀ P ₆₀ K ₇₅	11,4	10,5	9,4	9,3	5,2	4,7	5,6	5,1	4,3
N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀	11,4	10,3	10,0	5,3	5,2	4,8	5,2	5,2	4,5
	От 1-го до 2-го укоса								
N ₄₅ K ₄₅	12,8	12,0	9,8	7,7	7,7	6,8	7,5	7,1	5,4
N ₄₅ K ₆₀	14,9	14,7	12,9	8,4	8,4	7,7	7,8	7,9	6,7
N ₄₅ K ₇₅	20,3	18,9	21,3	11,6	11,6	12,3	11,6	11,0	10,3
N ₆₀ K ₆₀	18,8	15,9	14,8	11,3	11,2	10,0	9,6	9,4	7,8
N ₆₀ K ₇₅	21,6	21,1	22,0	13,5	13,8	12,2	11,3	10,7	9,0
N ₆₀ K ₉₀	21,8	21,9	15,3	13,3	13,9	12,3	12,2	10,6	8,7

Примечание. 1 — ежа сборная, 2 — овсяница луговая, 3 — двукисточник тростниковидный

Следовательно, формулу [3] можно использовать для сравнительной оценки биовыноса ^{137}Cs из почвы разными видами мятликовых трав при применении минеральных удобрений.

Таким образом, анализ результатов полевых экспериментов, проведенных на одновидовых посевах мятликовых кормовых трав, позволил выявить следующие особенности процесса биовыноса ^{137}Cs из почвы. Транспирационный коэффициент исследуемых видов трав при достаточной влагообеспеченности не зависит от дозы и вида удобрений, но при недостатке влаги зависит от радиационного баланса и вида растения. Одной из основных причин обратно пропорциональной зависимости между удельной активностью ^{137}Cs и урожайностью фитомассы трав служит увеличение относительной транспирации при повышении дозы полного минерального удобрения и уменьшении доли адсорбированных ионов ^{137}Cs в потоке почвенной влаги к корневой системе, вызванном сжатием двойных электрических слоев на стенках пор и уменьшением числа Pe при усилении конвекции в потоке. Нами выведено уравнение биовыноса ^{137}Cs из почвы фитомассой многолетних мятликовых трав при применении минеральных удобрений, которое выражает закономерность изменения удельной активности ^{137}Cs фитомассы под действием вносимых удобрений и справедливо для исследованных видов мятликовых трав. Выявлено, что интенсивность биовыноса ^{137}Cs из почвы до 1-го укоса отличается от таковой в период от 1-го до 2-го укоса, который характеризуется значительно большим снижением биовыноса ^{137}Cs посевами трав, обусловленным низкой относительной транспирацией и малой биодоступностью влаги, что сопровождается уменьшением интенсивности конвективного потока влаги к корневой системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Losvik M.H. Phytosociology and ecology of old hay meadows in Hordaland, western Norway in relation to management. *Vegetatio*, 1988, 78: 157-187 (doi: 10.1007/BF00033425).
2. Wallin L., Svensson B.M. Reinforced traditional management is needed to save a declining meadow species. A demographic analysis. *Folia Geobotanica*, 2012, 47: 231-247 (doi: 10.1007/s12224-

- 012-9123-3).
3. Vogl C.R., Vogl-Lukasser B., Walkenhorst M. Local knowledge held by farmers in Eastern Tyrol (Austria) about the use of plants to maintain and improve animal health and welfare. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 2016, 12(1): 40 (doi: 10.1186/s13002-016-0104-0).
 4. Zhu Y.G., Shaw G. Soil contamination with radionuclides and potential remediation. *Chemosphere*, 2000, 41(1-2): 121-128 (doi: 10.1016/S0045-6535(99)00398-7).
 5. Uchida S., Tagami K. Comparison of radiocesium concentration changes in leguminous and non-leguminous herbaceous plants observed after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, 186: 3-8 (doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.08.016).
 6. Alexakhin R., Geras'kin S. 25 years after the accident at the Chernobyl nuclear power plant: radioecological lessons. *Radioprotection*, 2011, 46: 595-600 (doi: 10.1051/radiopro/20116516s).
 7. Fesenko S., Jacob P., Ulanovsky A., Chupov A., Bogdevich I., Sanzharova N., Kashparov V., Panov A., Zhuchenko Yu. Justification strategies in the long term after the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, 119: 39-47 (doi: 10.1016/j.jenvrad.2010.08.012).
 8. Prosyannikov E.V., Silaev A.L., Koshelev I.A. Specific ecological features of ¹³⁷Cs behavior in river floodplains. *Russian Journal of Ecology*, 2000, 31(2): 132-135 (doi: 10.1007/BF02828370).
 9. Penrose B., Beresford N.A., Crout N.M.J., Lovatt J.A., Thomson R., Broadley M.R. Forage grasses with lower uptake of caesium and strontium could provide 'safer' crops for radiologically contaminated areas. *PLoS ONE*, 2017, 12(5): e0176040 (doi: 10.1371/journal.pone.0176040).
 10. Jacob P., Ulanovsky A., Fesenko S., Bogdevitch I., Kashparov V., Lazarev N., Zhurba M., Sanzharova N., Isamov N., Panov A., Grebenshikova N., Zhuchenko Y. Rural areas affected by Chernobyl accident: Radiation exposure and remediation strategies. *The Science of the Total Environment*, 2009, 408(1): 14-25 (doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.09.006).
 11. Сычев В.Г., Лунёв В.И., Орлов П.М., Белоус Н.М. *Чернобыль: радиационный мониторинг сельскохозяйственных угодий и агрохимические аспекты снижения последствий радиоактивного загрязнения почв (к 30-летию техногенной аварии на Чернобыльской АЭС)*. М., 2016.
 12. Подоляк А.Г., Тимофеев С.Ф., Гребенщикова Н.В. *Рекомендации по использованию загрязнённых радионуклидами пойменных земель Белорусского Полесья*. Гомель, 2001.
 13. Hirayama T., Takeuchi M., Keitoku S. Relationship between radiocesium concentrations of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) seeds and shoots at early growth stages. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 61(1): 152-155 (doi: 10.1080/00380768.2014.976534).
 14. Tsukada H., Hasegawa H., Hisamatsu S., Yamasaki S. Transfer of ¹³⁷Cs and stable Cs from paddy soil to polished rice in Aomori, Japan. *J. Environ. Radioact.*, 2002, 59: 351-363 (doi: 10.1016/S0265-931X(01)00083-2).
 15. Сычев В.Г., Белоус Н.М., Смольский Е.В. Влияние калийных удобрений на содержание цезия-137 в зеленой массе природных кормовых угодий при поверхностном улучшении. *Плодородие*, 2012, 1: 2-4.
 16. Корнев В.Б., Воробьева Л.А., Белоус И.Н. Урожайность кормовых и зерновых культур, и накопление ¹³⁷Cs в зависимости от внесения возрастающих доз калийных удобрений. *Вестник Брянской ГСХА*, 2013, 5: 3-6.
 17. Белоус Н.М., Смольский Е.В., Чесалин С.Ф., Шаповалов В.Ф. Роль минерального калия в снижении поступления ¹³⁷Cs в кормовые травы и повышении их урожайности на радиоактивно загрязнённых угодьях. *Сельскохозяйственная биология*, 2016, 51(4): 543-552 (doi: 10.15389/agrobiology.2016.4.543rus).
 18. Kang D.J., Tazoe H., Ishii Y., Isobe K., Higo M., Yamada M. Effect of fertilizer with low levels of potassium on radiocesium-137 decontamination. *J. Crop Sci. Biotechnol.*, 2018, 21(2): 113-119 (doi: 10.1007/s12892-018-0054-0).
 19. Белоус И.Н., Кротова Е.А., Смольский Е.В. Эффективность агрохимических приемов при поверхностном улучшении естественных кормовых угодий, загрязнённых ¹³⁷Cs. *Агрохимия*, 2012, 8: 18-24.
 20. Подоляк А.Г., Богdevич И.М., Агеец В.Ю., Тимофеев С.Ф. Радиологическая оценка защитных мероприятий применяемых в агропромышленном комплексе Республики Беларусь в 2000-2005 гг. *Радиационная биология. Радиоэкология*, 2007, 47(3): 356-370.
 21. Харкевич Л.П., Белоус И.Н., Анишина Ю.А. *Реабилитации радиоактивно загрязнённых сенокосов и пастбищ*. Брянск, 2011.
 22. Пенман Х. *Круговорот воды*. Биосфера. М., 1972.
 23. Будыко М.И. *Тепловой баланс земной поверхности*. Л., 1956.
 24. *Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям*. Л., 1973.
 25. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. *Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона*. М., 2012.
 26. Пивоварова З.И. *Радиационная характеристика климата СССР*. Л., 1977.
 27. Молдау Х., Росс Ю., Тооминг Х., Ундла Н. *Географическое распределение фотосинтетически активной радиации (ФАР) на территории Европейской части СССР*. М., 1963: 149-158.
 28. Takeyasu M., Nakano M., Fujita H., Nakada A., Watanabe H., Sumiya S., Furuta S. Results of environmental radiation monitoring at the Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, JAEA, following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2012, 49(3): 281-286 (doi: 10.1080/00223131.2012.660014).

29. Cramer M.D., Hoffmann V., Verboom G.A. Nutrient availability moderates transpiration in *Ehrharta calycina*. *New Phytologist*, 2008, 179: 1048-1057 (doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02510.x).
30. Matimati I., Verboom G.A., Cramer M.D. Nitrogen regulation of transpiration controls mass-flow acquisition of nutrients. *J. Exp. Bot.*, 2014, 65(1): 159-168 (doi: 10.1093/jxb/ert367).
31. Генкель П.А. *Физиология растений*. М., 1975.
32. Fuhrmann M., Lasat M.M., Ebbs S.D., Kochian L.V., Cornish J. Uptake of cesium-137 and strontium-90 from contaminated soil by three plant species; application to phytoremediation. *J. Environ. Qual.*, 2002, 31(3): 904-909.
33. Fuhrmann M., Lasat M., Ebbs S., Cornish J., Kochian L. Uptake and release of cesium-137 by five plant species as influenced by soil amendments in field experiments. *J. Environ. Qual.*, 2003, 32(6): 2272-2279.
34. Fesenko S.V., Balonov M.I., Voigt G., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Panov A.V., Bogdevitch I.M., Howard B.J., Kashparov V.A., Zhuchenko Y.M. An extended critical review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident. *The Science of the Total Environment*, 2007, 383(1-3): 1-24 (doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.05.011).
35. Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Spiridonov S.I., Panov A.V., Fesenko S.V. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts. *Health Physics*, 2007, 93(5): 418-426 (doi: 10.1097/01.HP.0000285093.63814.b7).

¹ФГБОУ ВО Брянский государственный аграрный университет,

243365 Россия, Брянская обл., Выгоничский р-н, п. Кокино, ул. Советская, 2а,
e-mail: pakshina_s_m@mail.ru ✉, sch.vf@yandex.ru, chesalinsf@icloud.com, sev_84@mail.ru;

²Новозыбковская сельскохозяйственная опытная станция — филиал ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса,

243020 Россия, Брянская обл., г. Новозыбков, Опытная станция, 6,
e-mail: korenevb@yandex.ru

Поступила в редакцию
15 июля 2018 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2019, V. 54, № 4, pp. 832-841

¹³⁷Cs REMOVAL FROM CONTAMINATED SOIL BY PERENNIAL BLUEGRASS HERBS DEPENDING ON MINERAL NUTRITION AND SOIL WATER AVAILABILITY

S.M. Pakshina¹, V.F. Shapovalov¹, S.F. Chesalin¹, E.V. Smolskiy¹, V.B. Korenev²

¹Bryansk State Agrarian University, 2a, ul. Sovetskaya, p. Kokino, Vygonicheskii Region, Bryansk Province, 243365 Russia, e-mail pakshina_s_m@mail.ru (✉ corresponding author), sch.vf@yandex.ru, chesalinsf@icloud.com, sev_84@mail.ru;

²Novozybkovskaya Agricultural Experimental Station — Branch of Federal Williams Research Center for Fodder Production and Agroecology, 6, Experimental Station, Novozybkov, Bryansk Province, 243020 Russia, e-mail korenevb@yandex.ru

ORCID:

Pakshina S.M. orcid.org/0000-0002-4911-4653

Smolskiy E.V. orcid.org/0000-0002-7534-5893

Shapovalov V.F. orcid.org/0000-0003-2050-7768

Korenev V.B. orcid.org/0000-0003-1272-6469

Chesalin S.F. orcid.org/0000-0001-5668-2301

The authors declare no conflict of interests

Received July 15, 2018

doi: 10.15389/agrobiology.2019.4.832eng

Abstract

The expansion of zones of anthropogenically affected agricultural lands and soil pollution pose a serious environmental threat. Radionuclides with long half-lives of fallout from the anthropogenic nuclear disasters are among the most dangerous pollutants. At present, the world scientific literature has accumulated extensive data on the effect of ameliorants, organic and mineral fertilizers on the yield and biological removal of ¹³⁷Cs from the soil by crops. This paper is our first report on the influence of natural and anthropogenic factors on ¹³⁷Cs migration from the contaminated soil to bluegrass forage plants many years following the Chernobyl accident (South-West of the Bryansk region, 2009–2011). Our subjective was to study ¹³⁷Cs removal from the soil depending on plant species and doses of full fertilizers. The soil of the site was alluvial meadow sandy, with pH_{KCl} = 5.2–5.6, 3.08–3.33 % humus, 620–840 mg/kg mobile phosphorus, 133–180 mg/kg exchangeable potassium, and ¹³⁷Cs contamination of 493–872 kBq/m². Effects of N₉₀P₆₀K₉₀, N₉₀P₆₀K₁₂₀, N₉₀P₆₀K₁₅₀, N₁₂₀P₆₀K₁₂₀, N₁₂₀P₆₀K₁₅₀, and N₁₂₀P₆₀K₁₈₀ used as ammonium nitrate, granulated superphosphate, and potassium chloride on monospecies crops of perennial bluegrasses *Dactylis glomerata* L.,

Festuca pratensis Huds., and *Phalaroides arundinacea* L. were compared. Fertilizers were used annually, with N and K applied in equal amounts at the first and second mowing and P full dose applied at the first mowing and P full dose applied at the first mowing. The period of vegetation in 2010 was characterized by increased radiation balance. In 2011, bioclimatic conditions were optimal for plant growth and development. The period between the first and the second mowing differed from that before the first mowing in the increased radiation balance and evaporability. The deficiency of soil moisture during the time from beginning of plant growth to the first mowing did not affect water supply of plants because of close groundwater after periodic flooding of the plain. We determined transpiration, transpiration coefficient, a relative transpiration, the rate of decrease in ^{137}Cs specific activity of the biomass, intensity of ^{137}Cs removal from the soil to justify an inverse relationship of ^{137}Cs specific activity in the biomass from a dose of full mineral fertilizer. It has been shown that the intensity of ^{137}Cs bio-removal depends on a dose of full mineral fertilizer. The intensity of ^{137}Cs removal is the smallest in *Dactylis glomerata* and the greatest in *Phalaroides arundinacea*. The main mechanism of biological removing ^{137}Cs from the soil is relative transpiration which determines the availability of soil moisture for plant roots and Pe value reflecting the ratio of diffusion and convection in the moisture flow. The relationship between Pe and relative transpiration in the three studied bluegrass species is high ($r = 0.8-0.9$). We propose the equation of ^{137}Cs bio-removal by perennial bluegrass with the use of mineral fertilizers, which expresses essential pattern of ^{137}Cs activity in the biomass as influenced by the fertilizers and is fair for the studied species of bluegrass herbs.

Keywords: alluvial meadow sandy soil, ^{137}Cs , removal rate, perennial bluegrass herbs, transpiration, relative transpiration, NPK fertilizers.

Научные собрания

12th INTERNATIONAL CONFERENCE ON FOOD CHEMISTRY AND FOOD MICROBIOLOGY

(October 17-18, 2019, Abu Dhabi, UAE)

Tracks:

- food processing and biotechnology
- food biochemistry and nutrition
- livestock nutrition
- food toxicology and microbiology
- industrial biotechnology in food industry
- food safety, security and control
- microbial aspects of food quality and spoilage
- biocatalysts and agricultural biotechnology
- food engineering
- nutrition and health
- food additives
- fermentation technology

Information: <https://foodchemistry-microbiology.conferenceseries.com/>

INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUNCTIONAL FOOD & ADVANCED NUTRACEUTICALS

(November 27-28, 2019, Madrid, Spain)

Tracks:

- recent trends in food science & nutraceutical research
- food biotechnology & food processing
- food microbiology and food safety
- food regulations, safety and quality

Information: <https://functionalfood.conferenceseries.com/>

15th INTERNATIONAL VETERINARY CONGRESS

(March 18-19, 2020, Berlin, Germany)

Sections:

- veterinary epidemiology
- animal welfare
- veterinary toxicology
- veterinary microbiology and microbial diseases
- veterinary vaccines
- wildlife management
- animal reproduction
- animal nutrition

Information: <https://veterinary.expertconferences.org/>