

РАДИОЭКОЛОГИЯ И РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЦЕЗИЯ-137 ИЗ ПОЧВЫ ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ ВОДОЙ

С.В. Василенков

Брянская Государственная сельскохозяйственная академия
с. Кокино, Выгоничский район, Брянская область, Россия, 243365

В статье изложены результаты исследований по выщелачиванию цезия-137 из почвы при создании слоя затопления на ее поверхности. Изучались различные нормы полива, число промывных поливов, скорости фильтрации, глубины воды на поверхности, продолжительность поливов, влияние интенсификаторов. Рекомендованы оптимальные режимы поливов.

Ключевые слова: промывные поливы, слой затопления, цезий-137, скорость фильтрации, интенсификаторы.

Выпадение радионуклида цезия-137 после аварии на Чернобыльской АЭС получилось неравномерным по территории и сформировало загрязнение почвы в виде «цезиевых пятен», неоднородных по уровню радиоактивности. Проектируя реабилитационные мероприятия, важно знать закономерности водной миграции радионуклида цезия в почве.

Имитация выщелачивания цезия-137 осуществлялась на приборе Дарси в различных по типу и механическому составу почвах. Создавались разнообразные условия промывки, проверялось влияние различных интенсификаторов на темпы вымывания цезия.

Для выявления закономерностей вымывания отбиралась наиболее распространенная в радиоактивной зоне дерново-подзолистая почва, песчаного или супесчаного механического состава в верхнем 10-сантиметровом слое, где сосредоточено наибольшее количество радиоцезия.

Прибор заполняется мелким щебнем, сверху засыпается слой промываемой почвы 5—10 см, общая площадь впитывания воды равна поперечному сечению колонны прибора. Подача воды осуществляется при постоянном напоре на поверхности, потери напора определяются по показаниям пьезометров, расход фильтрации объемным способом. Интенсивность подачи воды возможно уменьшать во времени за счет автоматического снижения фильтрационного расхода, но подачу поливной нормы можно снижать при производственной промывке цезия и специально.

При промывке непрерывными циклами после каждого цикла определялась радиоактивность грунта. Для этого прекращалась подача воды, и после впитывания слоя воды на поверхности перекрывался фильтрационный сброс. Мокрый верхний слой 1,5—2 см высушивается в термостате, охлаждается, измельчается, просеивается через сито $d = 1$ мм, определяется его радиоактивность на радиометре. Затем начинается новый цикл промывки. Эффективность промывки подсчитывалась по формуле

$$\Theta = \frac{C_H - C_t}{C_H} \cdot 100\%,$$

где C_H — начальная удельная активность почвы перед промывкой, Бк/кг; C_t — текущая удельная активность почвы после цикла промывки, Бк/кг.

Результаты опытов и расчетов для супесчаных почв приведены в табл. 1. Соблюдается довольно строгая обратно пропорциональная зависимость вымывания цезия-137 от продолжительности выщелачивания. С течением времени промывки темп выщелачивания возрастает (рис. 1), хотя объем подачи воды уменьшается.

Таблица 1

Вымывание цезия созданием слоя воды на поверхности супесчаной почвы

№ цикла	C_H , Бк/кг	$t_{\text{пром}}$, сут	W , л	$\Sigma W_{\text{нараст}}$, л	ΔC , Бк/кг	$\Theta_{\text{вым}}$, %	Интенсификаторы
Нач.	2 303						
1	2 288	3	324	324	15	0,65	
2	2 273	3	224,6	548,6	5	1,0	
3	2 206	3	171,9	720,5	67	4,21	
4	2 170	3	149,5	870	36	5,78	
5	2 167	7	304,2	1 174,2	3	5,9	
6	2 139	4	165,9	1 340,1	28	7,12	
7	2 110	3	117,2	1 457,3	28	8,38	
8	2 063	3	95,4	1 552,7	47	10,42	Аммиачная селитра
9	2 033	3	110,4	1 663,1	30	11,72	
10	1 969	3	103,4	1 766,5	64	14,5	
11	1 965	3	95,1	1 861,6	4	14,68	
12	1 911	4	119,2	1 980,8	54	17,02	
13	1 867	3	81,1	2 061,9	44	18,93	
14	1 844	4	66,3	2 128,2	23	19,93	Аммиачная селитра
15	1 804	4	90,9	2 219,1	40	21,67	
16	1 837	3	57,5	2 276,6	33	20,23	
17	1 756	4	69,1	2 345,7	81	23,75	
18	1 748	—					Испарен.
19	1 689	5	24,2	2 369,9	59	26,67	NaCl
20	1 654	—					Испарен.
21	1 703	3	35,0	2 404,9	49	26,05	
22	1 609	4	37,2	2 442,1	94	30,1	Замочка
23	1 603	4	38,9	2 481	6	30,39	
Σ		76					

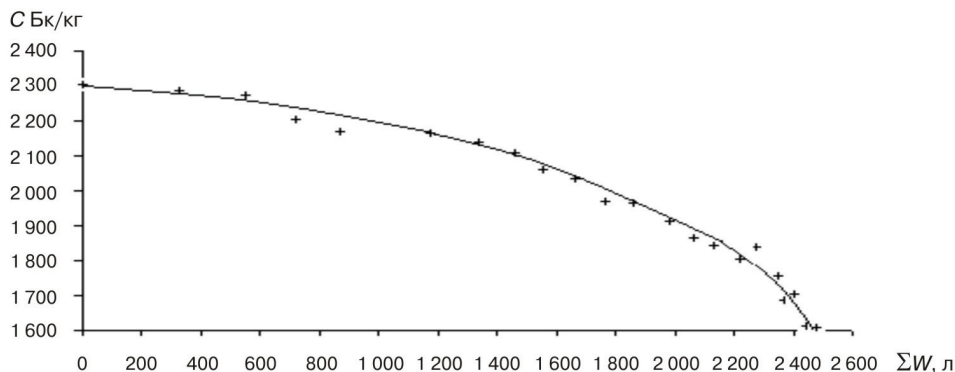


Рис. 1. Зависимость вымывания цезия из почвы от объема поданной воды

Зависимость количества вымытого цезия за цикл от количества поданной воды за этот цикл отсутствует. Промывная норма за каждый отдельный цикл составляла $40\ 548\ \text{м}^3/\text{га}$. Снижение удельной активности почвы на $700\ \text{Бк}/\text{кг}$ было достигнуто за счет промывки нормой $932\ 608\ \text{м}^3/\text{га}$.

В данном опыте была достигнута очень высокая эффективность выщелачивания — $30,39\%$, однако израсходовано большое количество воды — в пересчете на $1\ \text{га}$ — $932\ 608\ \text{м}^3/\text{га}$, что возможно только при промывке «цезиевых пятен» лиманным орошением (рис. 2).

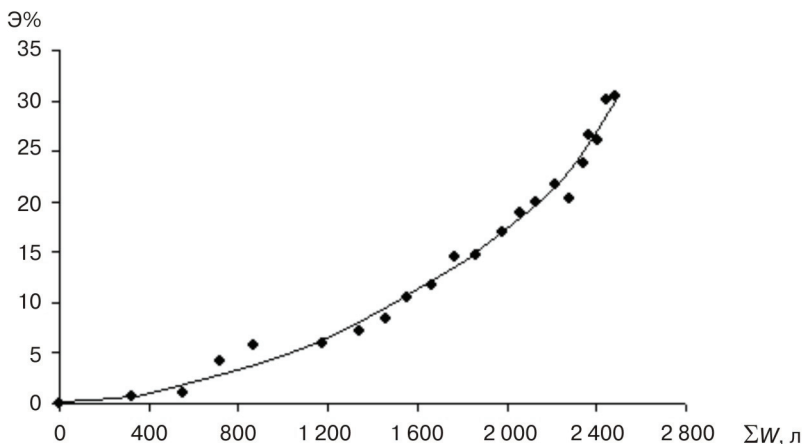


Рис. 2. Зависимость эффективности промывки от количества поданной воды

При использовании интенсификаторов темпы вымывания цезия-137 возрастают, несмотря на то, что объем подачи воды в этих циклах снижается. На снижение удельной активности на $1\ \text{Бк}/\text{кг}$ с интенсификаторами расходуется примерно в 2 раза меньше воды, чем без них ($702,8\ \text{м}^3/\text{га}$ против $1332\ \text{м}^3/\text{га}$). Применение интенсификаторов позволяет существенно снизить затраты воды. Эффективность выщелачивания в обоих случаях остается практически неизменной, меняется только продолжительность промывки и количество расходуемой воды на полив.

Промывка почвы в зимний период ведется в условиях замерзшего верхнего слоя почвы. Особенности выщелачивания цезия-137 из замороженного образца почвы после 15 циклов промывки также изучались на приборе Дарси. Результаты расчетов в приведенных опытах показаны в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Вымывание цезия созданием слоя воды на поверхности песчаной почвы

№ цикла	C_{μ} , Бк/кг	$t_{\text{пром}}$, сут	W , л	$\Sigma W_{\text{нараст}}$, л	ΔC , Бк/кг	$\text{Э}_{\text{вым}}$, %	Интенсификаторы
Начало	11 916						
1	11 283	4	202,5	202,5	633	5,3	
2	11 181	4	428,5	631,0	102	6,17	
3	11 154	3	881,3	1 512,5	27	6,4	
4	10 799	4	559,9	2 072,4	355	9,4	
5	10 721	4	223,6	2 296	78	10,03	
6	10 671	4	380,5	2 676,5	50	10,45	
7	10 549	4	357,7	3 034,2	122	11,5	ультразвук
8	10 454	4	319,0	3 353,2	95	12,27	ультразвук
9	10 363	4	317,9	3 671,1	91	13,03	компрессор
10	10 162	4	292,4	3 963,5	201	14,72	компрессор
11	10 027	4	275,8	4 239,3	135	15,85	компрессор
12	9 855	4	194,6	4 433,9	172	17,3	KCl
13	9 650	4	230,9	4 664,8	205	19,02	KCl
14	9 443	4	215,6	4 880,4	207	20,07	KCl
15	9 166	4	260,9	5 141,3	277	23,08	
Σ		59					

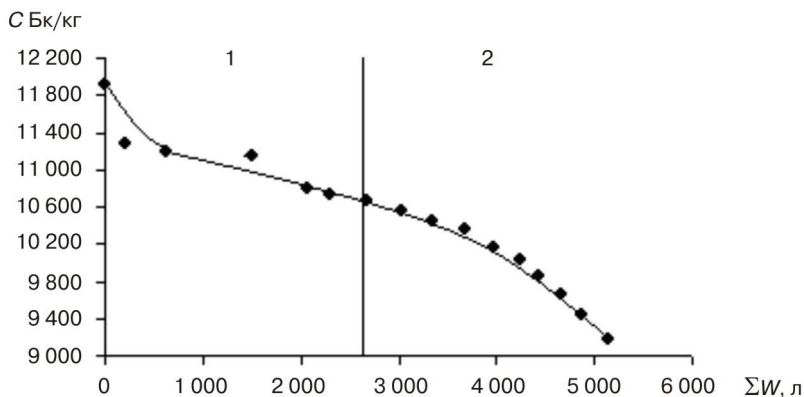


Рис. 3. Снижение удельной активности почвы в зависимости от объема поданной воды на приборе Дарси:

- 1 — промывка почвы водопроводной водой;
- 2 — промывка водой с интенсификаторами

Приведенные данные показывают, что промывная норма за все циклы промывки составила 1 932 819 м³/га, удельная активность почвы снизилась на 2750 Бк/кг, эффективность выщелачивания равна 23,1%, но и продолжительность промывки на 59 суток меньше, чем в первом варианте (76 суток).

В периодических циклах были рассмотрены процессы оттаивания, фильтрации, снижения радиоактивности за счет выщелачивания цезия-137 (табл. 3).

Таблица 3

Промывка цезия-137 на приборе Дарси после замораживания песчаной почвы

№ цикла	$C_{ц}$, Бк/кг	t , сут	$Q_{ср}$, см ³ /с	W , л	ΣW , л	$\Theta_{вым}$, %
Начало	9 166					
16	8 870	4	1,358	469,3	469,3	3,2
17	8 638	4	1,322	456,9	926,2	5,8
18	8 508	4	1,182	408,5	1 334,7	7,2
19	8 140	5	1,135	490,3	1 825	11,2
20	8 123	1	1,089	94,1	1 919,1	11,4
21	8 069	1	0,980	84,7	2 003,8	12,0
22	7 926	1	1,0896	94,1	2 097,9	13,5
23	7 919	0,5	1,247	53,7	2 151,6	13,6
24	7 803	0,5	0,893	38,6	2 190,2	14,9
25	7 465	0,5	1,204	52,0	2 242,2	18,6

Примечание. В 22-м, 23-м и 25-м циклах — предварительное замачивание.

В брикете из почвы, исследованной на действие интенсификаторов создавались условия выщелачивания за 4-суточные циклы промывки, затем суточные циклы и полусуточные. Размеры $14 \times 19 \times 4,5$ см выдерживались в образце для каждого цикла промывки соответствуя размерам фильтрационной колонны прибора.

Полученные данные дают представление об интенсивности выщелачивания в зимний период. В четырех суточных циклах промывная норма составляет $M = 686\ 017$ м³/га, средняя поливная норма — $m_{ср} = 171\ 504$ м³/га. Удельная активность почвы снижается на 1026 Бк/кг, на 1 Бк/кг требуется 668 м³/га воды.

В суточных циклах промывная норма составляет $M = 156\ 825$ м³/га, средняя промывная норма за цикл — $26\ 137,5$ м³/га. В течение установленных циклов удельная активность почвы снижается на 675 Бк/кг, на 1 Бк/кг снижения расходуется 232 м³/га. При промывной норме в 4,4 раза большей вымывается в 1,5 раза больше цезия.

В условиях экономии воды более выгодными являются короткие циклы промывки — 0,5—1 сут. Сразу после замораживания в течение четырех циклов снижение удельной активности цезия в зависимости от количества поданной воды подчиняется обратно пропорциональному закону, но при переходе на укороченные 0,5—1-суточные циклы темп снижения активности сохраняется высокими при меньших затратах воды (рис. 4). Прослеживается высокая эффективность использования воды при укороченных циклах выщелачивания. При продолжительности промывки 21,5 суток эффективность составляет 18,6%.

По затратам воды, продолжительности промывки, уровню снижения удельной активности почвы вариант с укороченными циклами промывки предпочтительнее.

Следующий опыт промывки рассмотрен для коротких поливных циклов продолжительностью до 9 ч. Почва, используемая в опыте, дерново-подзолистая, супесчаная, пылеватая с растительными остатками, является трудносмачиваемой. Слой почвы толщиной 5,5 см помещается в прибор Дарси и промывается короткими по 9 ч непрерывными циклами с созданием слоя воды на поверхности 5 см.

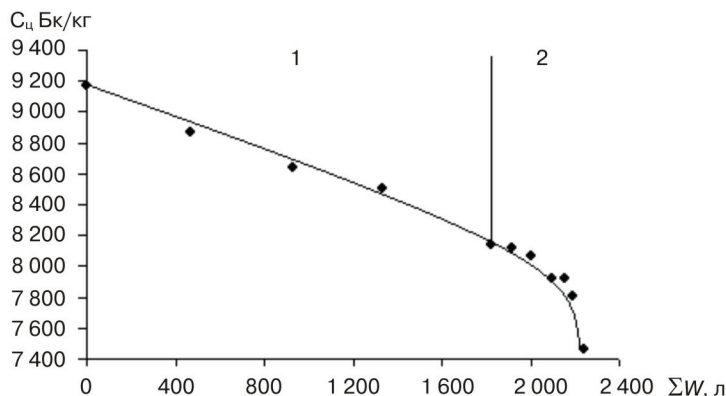


Рис. 4. Промывка цезия на приборе Дарси после замораживания:

- 1 — продолжительность цикла 4—5 сут.;
- 2 — продолжительность цикла 0,5—1 сут.

Промачивание почвы неполное, девяти часов не хватало, чтобы смочить всю толщу слоя, и даже при дополнительном промачивании небольшими порциями воды обнаруживаются прослойки и линзы абсолютно сухой почвы, что снижает показатели вымывания цезия. Результаты опытов и расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Вымыв цезия из почвы на приборе Дарси короткими циклами

№ цикла	C _ц , Бк/кг	t, сут	Q _{ср} , см ³ /с	W, л	ΣW, л	Э _{вым} , %
Начало	13 565					
1	12 940	9	2,726	88,3	88,3	4,6
2	12 861	9	1,10	35,6	123,9	5,2
3	12 953	9	0,76	24,6	148,5	4,5
4	12 226	9	3,07	99,5	248,0	9,9
5	11 678	9	2,35	76,1	324,1	13,9
6	11 754	9	1,43	46,3	370,4	13,3
7	11 662	9	0,95	30,8	401,2	14,0
Σ		63				

Промывная норма составляет $M = 150\,811\text{ м}^3/\text{га}$, поливная норма за цикл — $m_{\text{ср}} = 21\,544\text{ м}^3/\text{га}$. Удельная активность почвы снижается на 1903 Бк/кг. Чтобы снизить активность почвы на 1 Бк/кг требуется в среднем $79\text{ м}^3/\text{га}$. Этот показатель в 2,9 раза меньше, чем при промывках 0,5—1-суточными циклами, причем затраты воды в этих двух вариантах выщелачивания одинаковы.

Снижение удельной активности почвы со временем промывки замедляется. То же наблюдается и в зависимости от количества поданной воды.

Общая эффективность вымывания составила 14%. Из всех рассмотренных вариантов промывка 9-часовыми циклами оказывается наиболее экономичной при поливах созданием сплошного слоя затопления почвы.

В последнем варианте опытов используется почва, прошедшая длительный период выщелачивания (25 циклов) в условиях воздействия интенсификаторов и периодического замораживания, с оставшейся удельной активностью 7465 Бк/кг. Данная почва промывается на приборе Дарси с увеличенным до 30 см напором воды на поверхности. В слое почвы 3 см проводятся циклы промывки продол-

жительностью 0,5 сут. и один непрерывный цикл — 23 сут. Фильтрационный расход в полусуточных циклах колеблется в пределах 3—8,7 см³/с, для 23-суточного цикла 2—4,5 см³/с. Промывная норма за три полусуточных цикла составляет 218 322 м³/га, средняя поливная норма за цикл 72 774 м³/га. Удельная активность почвы снижается на 315 Бк/кг. Результаты опытов и расчетов приведены в табл. 5.

Снижение удельной активности почвы на 1 Бк/кг в полусуточных циклах требует воды 693 м³/га, в последнем длительном цикле — 4026 м³/га.

Из таблицы видно, что в 29 цикле за 23 суток при затратах воды 1 807 703 м³/га вымылось 449 Бк/кг цезия, хотя был создан большой напор 30 см и высокая скорость фильтрации, высокий фильтрационный расход — $Q_{\text{ср}} = 2,42 \text{ см}^3/\text{с}$.

Таблица 5

Промывка цезия-137 из почвы с увеличенным до 30 см напором воды на поверхности почвы

№ цикла	$C_{\text{ц}}^{\text{в}}$, Бк/кг	t , сут	$Q_{\text{ср}}$, см ³ /с	W , л	ΣW , л	$\Theta_{\text{вым}}^1$ %
Начало	7 465					
26	7 386	0,5	5,422	234,2	234,2	1,0
27	7 294	0,5	3,865	167,0	401,2	2,3
28	7 150	0,5	4,158	179,6	580,8	4,2
29	6 701	23	2,42	4 809		

Примечание. В 29-м цикле $Q_{\text{max}}^{1\text{-й день}} = 4,444 \text{ см}^3/\text{с}$; $Q_{\text{max}}^{\text{последний день}} = 2,0 \text{ см}^3/\text{с}$.

Что касается поливов 26—28 с короткими циклами по 0,5 сут., то при больших затратах воды (218 322 > 156 825 м³/га) по сравнению с циклами 20—25 (см. табл. 3) вымылось меньше (315 < 675) радионуклида цезия, т.е. высокий напор и расход фильтрации здесь оказались не самыми важными факторами вымывания.

В первом цикле (см. табл. 1) при фильтрационном расходе $Q_{\text{ф}} = 1,22 \text{ см}^3/\text{с}$ вымылось 15 Бк/кг, а в 17-м цикле при $Q_{\text{ф}} = 0,184 \text{ см}^3/\text{с}$ — 81 Бк/кг. Скорость фильтрации последовательно уменьшается от цикла к циклу, а темп вымывания цезия, в среднем, остается постоянным. Так как продолжительность циклов тоже постоянна, напрашивается вывод, что должна играть роль продолжительность контакта цезия в почве с водой. Перед 22-м циклом почву замачивали дождевой водой на 7 сут. и затем снова промывали водопроводной водой на приборе Дарси. Вымыв цезия в 22-м цикле оказался самым высоким за все 23 цикла выщелачивания — 94 Бк/кг (см. табл. 1). Однако предварительно увлажнять почву на 7 сут. оказалось необязательным. Замачивание на 1—2 сут. также дает превосходные результаты.

В цикле 26 без замачивания (см. табл. 5) удельная активность цезия в почве снизилась за 0,5 сут. промывки на 79 Бк/кг, в цикле 27 с предварительной суточным замачиванием почвы — на 92 Бк/кг, в цикле 28 с двухсуточным замачиванием — на 144 Бк/кг.

В другом варианте промывки с такой же продолжительностью цикла — 0,5 суток без предварительного замачивания почвы, вымыв в цикле 24 (см. табл. 3) составил 116 Бк/кг, с предварительным суточным замачиванием удельная активность цезия снизилась на 338 Бк/кг. Увеличение продолжительности вымывания

этой же почвы до 1 сут. эффекта не дало. Без предварительного увлажнения почвы снижение удельной активности составило в цикле 21 (см. табл. 3) 54 Бк/кг, а с суточным предварительным увлажнением (22 цикл) — 143 Бк/кг. Эти результаты свидетельствуют в пользу коротких и частых поливов.

Выводы

1. В весенне-зимний период весьма эффективным мероприятием по выщелачиванию радионуклида цезия-137 из почвы является создание микролиманов.

2. Главной задачей проведения мероприятий по организации поверхностного стока нужно считать ликвидацию застоя воды в замкнутых понижениях и заболачивания ложбин стока, в почвах которых, как правило, наблюдается повышенное содержание цезия. Необходимо сместить акцент на перераспределение весенней влаги по территории в соответствии с границами участков с разным уровнем радиации.

3. Целесообразно так организовать весенний сток, чтобы в замкнутых понижениях и искусственно созданных лиманах слой воды возникал только в период интенсивного дневного снеготаяния, а за вечерние часы вода успевала впитаться в почву. В ночные часы с отрицательными температурами поверхность почвы должна быть без слоя воды и подмерзать. При таком режиме достигается наибольший эффект вымывания.

4. На «цезиевых пятнах» нужно делать перемычки и в летний период для задержания и рассредоточения поверхностного стока в период ливневых дождей.

5. Промывку следует проводить выборочно, учитывая большую пестроту радиоактивного загрязнения на полях, выделяя делянки соразмерные с пятнами загрязнения. Особенно загрязненные участки необходимо поливать дополнительными нормами.

6. Предварительное замачивание почвы на 1 сутки коротким разовым поливом увеличивает в 2—3 раза вымывание цезия за 0,5—1 сутки поливом затопления.

7. Необходимо учитывать, что ни длительные поливы затоплением, ни увеличенный напор воды на поверхности почвы не создают условий для ускоренной промывки цезия.

CESIUM (CS-137) LEACHING FROM THE SOIL UNDER SURFACE FLOODING

S.V. Vasilenkov

*Bryansk State Agricultural Academy
Kokino, Bryansk region, Russia, 243365*

The results of investigations of Cesium (Cs-137) leaching from the soil under the creation of flooding layer at its surface are given here. It was studied: different norms, number of washing irrigation, filtration velocities, water depth at the surface, duration of watering, influence of intensifiers. The optimal regimes of watering are recommended here.

Key words: Cesium (Cs-137) leaching, washing irrigation, flooding layer, filtration velocities, intensifiers.