

ОСОБЕННОСТИ ПЕРВИЧНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКСИКАНТОВ
НА ПРОФИЛЬНОМ И АГРЕГАТНОМ УРОВНЯХ
ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ НА ПРИМЕРЕ ^{137}Cs И ^{90}Sr

С.П. ТОРШИН, А.Д. ФОКИН, АН БРУНИН, ЛИ. САМБУРОВА

(Кафедра радиологии)

Показана роль состояния почвенного профиля — нарушенное или ненарушенное сложение, разная биологическая активность — в транспорте радиоцезия и радиостронция с нисходящим током воды при моделировании атмосферных осадков. Показано, что живые растения способствуют более активному перемещению ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве. Изучены особенности локализации радионуклидов в почве на агрегатном уровне. Установлено преимущественное концентрирование радиоактивных токсикантов на их поверхности. Предложен достаточно информативный показатель — коэффициент концентрирования, который хорошо описывает образующиеся в почве градиенты концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Ключевые слова: радиоцезий, радиостронций, почвенные агрегаты, почвенные колонки, коэффициент концентрирования.

Несмотря на то что с история аварии на ЧАЭС насчитывает уже более 20 лет, значительные территории РФ остаются загрязненными осколочными радионуклидами. За постчернобыльский период были проведены обширные научные исследования по изучению поведения загрязнителей в почве с целью возможности прогнозирования их поведения в различных экосистемах [1], но детально распределение загрязнителей в слагающих почву структурах и роль живых растений в их перераспределении недостаточно изучены.

В почве радионуклиды взаимодействуют с ее компонентами, перемещаются в горизонтальном направлении и переносятся в глубь почвенного профиля, включаются в биологические циклы миграции. Большое значение в миграции поллютантов имеет сорбционная способность почв, которая существенно возрастает с увеличением

дисперсности почвенных частиц, что обусловлено как большей удельной поверхностью мелких почвенных фракций, так и различиями в их минералогическом составе. Основная доля радионуклидов в почве обычно связывается мелкими фракциями, содержащими глинистые и илистые частицы и обогащенными вторичными минералами групп монтмориллонита, каолинита и гидрослюд. Заметное влияние на распределение радионуклидов между почвенными компонентами оказывает также количество и состав органического вещества [2].

В условиях агрегированности верхних горизонтов имеет место концентрирование поллютантов на поверхностях агрегатов разного размера, которое обусловлено перемещением почвенной влаги в межагрегатном пространстве и первичными сорбционными взаимодействиями с поверхностью агрега-

тов. Наличие таких эффектов концентрирования и подходы к их исследованию обсуждались ранее [3, 6, 7].

Целью данной работы являлось изучение первичного вертикального распределения радионуклидов в процессе промывания почвенных колонок различного сложения, а также распределения по почвенным агрегатам и корневым остаткам для оценки роли последних в вертикальной миграции ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Методика

В настоящей работе приводятся результаты лабораторных модельных опытов на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, сформированной на покровном суглинке. Образцы ненарушенного сложения отбирали с 10-летней залежи, занятой луговой естественной растительностью. Отбор проб в виде монолитов производили в деревянные ящики сечением 20x20 см и высотой до 30 см. Монолиты отбирали с интервалом 1 год для того, чтобы изготовить колонки с почвой естественного сложения как с живыми корнями (закладка опыта в год отбора), так и с мертвыми (закладка опыта после 3-летнего высушивания и хранения в условиях лаборатории). Модельные опыты проводили в пластиковых колонках-контейнерах сечением 6x6 см и высотой 10 см. Из монолитов вырезали соответствующий размеру колонки образец. Каждую из сторон образца поочередно парафинировали, после чего образец вставляли в колонку, содержащую горячий парафин. Этот прием позволял избежать «пристеночных эффектов» при фильтрации воды и растворов через колонку. Нижний торец колонки также парафинировали, но в нем высверливали отверстия для свободной фильтрации растворов.

Перед началом опыта все растения в колонке из свежей почвы были срезаны на уровне поверхности почвы. Цезий-137 и стронций-90 в виде раство-

ров нитрата объемом 100 мл и общей активностью 80 кБк и 20 кБк соответственно равномерно вносили на поверхность монолита. Эти порции растворов сразу же целиком были поглощены почвой. Добавление воды осуществляли порциями с интервалами в 2-3 сут до появления элюата. При таком способе вся поливная вода полностью впитывалась в почву. Затем монолиты в течение 2—4 недели промывали водой в норме, эквивалентной 200 мм осадков. Опыты проводили в условиях световой комнаты при температуре 22-25°C. За период промывания часть растений в колонке со свежей почвой проросла. В колонке с естественным сложением почвы и мертвыми корнями роста растений не наблюдалось. Параллельно проводили аналогичный эксперимент с почвенной водонасыщенной колонкой нарушенного сложения, в котором использовалась просеянная (фракция 1~2 мм) почва с отобранными корнями. По окончании промывания изучали распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr по длине колонок, а также распределение по агрегатам в колонках почв ненарушенного сложения.

Таким образом, из образцов почвы были сформированы три почвенные колонки: 1-я — почва естественного сложения с живыми корнями; 2-я — почва естественного сложения после длительного хранения в сухом состоянии; 3-я — насыпная, без корней.

После пропускания через колонки заданной нормы дистиллированной воды почву из колонок извлекали, просушивали и содержимое колонки разрезали на слои толщиной 1 см, каждый слой разделен на фракции методом сухого рассеивания на системе сит размером: 10; 5; 3; 2; 1 и 0,5 мм. Таким образом, почву разделяли на фракции: 10; 5—10; 3~5; 2~3; 1~2; 0,5-1 и <0,5 мм, образцы элюата после отбора выпаривали и в сухом остатке также определяли активность ^{137}Cs и ^{90}Sr . Содержание радиоцезия определяли на спектрометре Compuamma-

1285 (LKB, Швеция), радиостронций измеряли на радиометре «Бета», используя специальную подложку, позволяющую проводить измерения с одинаковой геометрией. Для пересчета скорость счета в единицы активности использовали стандартные образцы с известной активностью.

Статистическую обработку результатов проводили стандартными методами, используя стандартный пакет программ STATGRAF.

Результаты и их обсуждение

Основное количество ^{137}Cs и ^{90}Sr было обнаружено в верхних частях профиля, несмотря на различия в поглощении этих радионуклидов почвой разных по состоянию колонок (см. табл. 1, 2). Для колонок естественного сложения это слой почвы 0–3 см, для насыпных немного меньше — 0–2 см. Для образца естественного сложения с живыми корнями оказалась характерной большая растянутость активности по профилю по сравнению с колонками с мертвыми корнями, тогда как в почвах нарушенного сложения она отсутствовала вовсе и практически вся активность (более 99%) была обнаружена в самых верхних слоях. Такое распределение может быть обусловлено влиянием биологических факторов: наличием живых корней в колонке и проводящих каналов по ходам отмерших корней. В первом случае живые корни, расположенные в самом верхнем слое почвы, поглощают часть радионуклидов. В дальнейшем происходит их перераспределение по глубине в результате передвижения токсикантов по проводящим системам корней.

Общая картина профильного распределения радионуклидов логично дополняется данными о содержании их в элюате. На выходе из колонок активность элюатов была различная. Колонка, наполненная почвой ненарушенного сложения с живыми корнями, характеризовалась наибольшими концентрациями двух радионуклидов в

элюате. Биологически активные компоненты почвы, способствующие передвижению поллютантов, отсутствовали в других колонках, поэтому в них сорбция была выше.

Таким образом, в миграции радионуклидов главную роль играет сложение почвы и структура порового пространства, а также корневые системы живых растений, которые способствуют переносу радионуклида вниз по профилю почвы. В колонках с живыми корнями около 3% от общей активности ^{137}Cs обнаружено в растительных остатках и около 6% — ^{90}Sr . Очевидно, что растянутость активности по профилю почвы появляется во многом благодаря передвижению по корням растений (см. табл. 1, 2).

Второй по интенсивности миграции ^{137}Cs оказалась колонка с почвой нарушенного сложения. Мы предполагаем, что в данном случае повышенный уровень миграции по сравнению с почвой естественного сложения, но с мертвыми корнями, обусловлен передвижением ^{137}Cs в составе илистой фракции почвы, которая обычно имеет место в насыпных колонках на начальных этапах фильтрации и сопровождается появлением видимой взвеси почвенных частиц в элюате.

Эффект первичного концентрирования поллютанта на поверхности агрегатов почвы оценивали по величине коэффициента концентрирования (K_k). Коэффициент концентрирования представляет собой отношение концентрации токсиканта (или удельной активности радионуклида) в любой выделяемой компоненте почвы (поверхностный слой агрегата, фракция агрегатов определенного размера, корневые остатки и пр.) к средневзвешенной концентрации (или удельной активности) в той части почвы, из которой выделена данная компонента [5]. Эффект концентрирования по отношению к средневзвешенному содержанию вещества наблюдается, когда величина коэффициента концентрирования превышает 1.

Миграция ^{137}Cs в почвенных колонках различного сложения

Слой, см	Почва естественного сложения с живыми корнями			Почва естественного сложения после длительного хранения в сухом состоянии			Насыпная колонка (из просеянного образца, фракция 1–2 мм)		
	А, Бк	% от общей активности	удельная ак- тивность, Бк/г	А, Бк	% от общей активности	удельная активность, Бк/г	А, Бк	% от общей активности	удельная активность, Бк/г
0–1	61650±7400	79,4	1480±480	76340±9160	94,3	1520±328	59450±4760	75,5	1620±190
1–2	1660±610	6,0	110±20	760±80	1,0	20±4,8	17620±1590	22,4	410±50
2–3	3000±240	3,9	80±6	83,5±7	0,1	2±1	220±20	0,3	6±1
3–10	799±100	1,0	4±0,5	113±21	0,1	0,4±0,1	370±50	0,5	1,3±0,3
<i>Распределение по слоям в почвенной массе с отобранными корневыми остатками</i>									
0–1	4970±450	6,4	4760±430	3600±390	4,4	5125±50	0	0	0
1–2	310±45	0,4	270±25	80±11	0,1	40,6±3,8	0	0	0
2–4	78±10	0,1	30±3	0	0	0	0	0	0
–	2200	2,8	–	Содержание в элюате			1040	1,3	–
Σ	77667	100	–	80897	100	–	78700	100	–

Миграция ^{90}Sr в почвенных колонках различного сложения

Слой, см	Почва естественного сложения с живыми корнями			Почва естественного сложения после длительного хранения в сухом состоянии			Насыпная колонка (из просеянного образца, фракция 1–2 мм)		
	А, Бк	% от общей активности	удельная активность, Бк/г	А, Бк	% от общей активности	удельная активность, Бк/г	А, Бк	% от общей активности	удельная активность, Бк/г
0–1	9370±850	45,7	223±37	14590	73,2	400±44	16010±1700	76,5	380±41
1–2	4210±510	20,6	100±13,5	3170	15,9	90±9	3700±240	17,7	105±15
2–3	1270±150	6,2	30±3	430	2,2	14±3	280±35	1,3	7±2
3–10	1770±130	8,7	6±1	680	3,4	4±0,4	750±83	3,5	2,7±1
<i>Распределение в почвенной массе с отобранными корневыми остатками</i>									
0–1	1870±200	9,2	2050±220	420	2,1	1050±100	0	0	0
1–2	656±71	3,2	250±20	400	2,0	580±65	0	0	0
2–4	96±15	0,5	80±8	80	0,4		0	0	0
<i>Распределение в корневых остатках</i>									
–	1200±135	5,9	–	160	0,8	–	200	1,0	–
Σ	20442	100	–	19930	100	–	20940	100	–

Содержание в элюате

Для оценки концентрирования радионуклидов в поверхности агрегатов необходимо экспериментальное определение удельной активности почвы на поверхности и внутри структурных отделенностей. Существуют различные способы отделения поверхностных слоев почвенных агрегатов от внутренней массы. Это механическое отделение поверхности [6], размывание агрегатов водой на сите с заморозкой в жидком азоте [7] или без заморозки [5], отделение слоев при помощи липкой ленты [4], радиоавтография [5] и сухой рассев на ситах. В данном исследовании мы остановились на последнем спо-

собе как наиболее простом и показательном. Для изучения распределения поллютантов на агрегатном уровне почвенные агрегаты из различных слоев почвенных колонок разделяли методом сухого рассеивания на соответствующих ситах. Исходя из ранее проведенных исследований [5], можно предположить, что поллютанты при свежем загрязнении будут концентрироваться в поверхностных слоях почвенных агрегатов, вне зависимости от их размеров. В таблицах 3, 4, 5, 6 представлены данные о распределении ^{137}Cs и ^{90}Sr в слоях 0-1 и 1-2 см почвенных колонок на агрегатном уровне, так как эти

Т а б л и ц а 3

Содержание ^{137}Cs в различных по размеру почвенных агрегатах.
Колонка с почвой естественного сложения с живыми корнями

Фракция агрегатов, мм	Глубина отбора образца в колонке			
	0 – 1 см		1 – 2 см	
	удельная активность, Бк/г, a_i	K_k^*	удельная активность, Бк/г, a_i	K_k
>10	510±62	0,35	58±6	0,53
5 – 10	405±35	0,27	73±4	0,66
3 – 5	885±68	0,60	74±9	0,67
2 – 3	1070±83	0,72	96±8	0,87
1 – 2	1310±140	0,89	111±17	1,01
0,5 – 1	2090±250	1,41	148±29	1,35
< 0,5	4090±270	2,76	210±33	1,91
a_{cp} .	1480±480	–	110±20	–

* в таблицах 3 – 6 $K_k = a_i / a_{cp}$.

Т а б л и ц а 4

Удельная активность ^{137}Cs в различных по размеру почвенных агрегатах.
Колонка с почвой естественного сложения после длительного хранения

Фракция агрегатов, мм	Глубина отбора образца в колонке			
	0 – 1 см		1 – 2 см	
	удельная активность, Бк/г, a_i	K_k^*	удельная активность, Бк/г, a_i	K_k
>10	240±23	0,16	3±1	0,15
5 – 10	790±90	0,52	13±2	0,65
3 – 5	1270±140	0,84	15±1	0,75
2 – 3	1500±170	0,99	20±3	1,00
1 – 2	1730±200	1,14	21±4	1,05
0,5 – 1	2320±230	1,53	24±2	1,20
< 0,5	2790±280	1,84	44±5	2,20
a_{cp} .	1520±328	–	20±4,8	–

Таблица 5

Содержание ^{90}Sr в различных по размеру почвенных агрегатах.
Колонка с почвой естественного сложения с живыми корнями

Фракция агрегатов, мм	Глубина отбора образца в колонке			
	0 – 1 см		1 – 2 см	
	удельная активность, Бк/г, a_i	K_k^*	удельная активность, Бк/г, a_i	K_k
>10	88±10	0,40	30±3	0,30
5 – 10	116±9	0,52	77±8	0,77
3 – 5	196±25	0,88	105±9	1,05
2 – 3	241±21	1,08	112±13	1,12
1 – 2	252±19	1,13	130±15	1,30
0,5 – 1	320±27	1,44	116±15	1,16
< 0,5	348±43	1,56	130±10	1,30
$a_{\text{ср.}}$	223±36,7	–	100±13,5	–

Таблица 6

Удельная активность ^{90}Sr в различных по размеру почвенных агрегатах.
Колонка с почвой естественного сложения после длительного хранения

Фракция агрегатов, мм	Глубина отбора образца в колонке			
	0 – 1 см		1 – 2 см	
	удельная активность, Бк/г, a_i	K_k^*	удельная активность, Бк/г, a_i	K_k
>10	325±38	0,81	75±7	0,83
5 – 10	233±32	0,58	58±4	0,64
3 – 5	383±24	0,96	67±7	0,74
2 – 3	392±29	0,98	92±15	1,02
1 – 2	383±43	0,96	100±12	1,11
0,5 – 1	476±53	1,19	113±12	1,26
< 0,5	608±71	1,52	125±20	1,39
$a_{\text{ср.}}$	400±44	–	90±9	–

слои почвы оказались наиболее активными. В почвенной колонке с мертвыми корнями разница в активности ^{137}Cs в слое 0~1 и 1~2 см примерно 100 раз, в то время как для колонки с живыми корнями эта разница составляет 37 раз, что указывает на существенную роль живой части почвы в перемещении поллютанта по профилю почвы.

Наибольшая удельная активность радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs у самой мелкой фракции <0,5 мм, что объясняется относительно большей удельной поверхностью этой фракции. Цезий в большей степени фиксируется мелкими фракциями почвы по сравнению с ^{90}Sr , так как имеет необменный тип поглощения (см. табл. 3, 4, 5, 6).

Удельная поверхность мелких фракций значительно выше, чем у остальных, и коэффициенты концентрирования выше по всем опытам. Это обстоятельство свидетельствует о поверхностном концентрировании радионуклидов почвенными фракциями.

Выводы

1. Подвижность ^{137}Cs и ^{90}Sr в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве определяется ее состоянием. Миграция этих радионуклидов в низлежащие слои почвенного профиля выше в ненарушенной почве с живыми корнями, следовательно, именно корни растений способствуют миграции радионуклидов вниз по профилю почвы. Несмотря на

это основная часть поллютантов остается в самом верхнем слое почв 0—1 см в зависимости от их сложения и наличия живых корней растений.

2. Мелкая фракция почвенных агрегатов <0,5 мм благодаря наибольшей удельной поверхности обладает самой большой удельной активностью по сравнению с другими более крупными фракциями, что подтверждает первичное поглощение радионуклидов поверхностью почвенных агрегатов.

Библиографический список

1. *Алексаосин В.М.* Проблемы радиэкологии: Эволюция идей. Итоги. М.: Россельхозакадемия — ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2006. — 2. *Круглов С.В., Васильева Н.А., Куриное А.Д., Алексахин Р.М.* Распределение радионуклидов чернобыльских выпадений по фракциям гранулометрического состава дерново-подзолистых почв. //Почвоведение. 1995. №5. С. 551 — 557. — 3. *Таргульян В.О., Соколова Т.А., Бирина А.Г., Куликов А.В., Целищева Л.К.*

Организация, состав и генезис дерново-палево-подзолистой почвы на покровных суглинках. Аналитическое исследование. X Международный конгресс почвоведов. М. 1974. — 4. *Фокин А.Д., Торшин С.П.* Первичные градиенты концентраций и динамика состояния радионуклидов в почвах (на примере ^{137}Cs). Межд. научн. семинар «Радиэкология чернобыльской зоны». Тез. докл. Славутич, 27-29 сент. 2006. С. 144-147. — 5. *Фокин А.Д., Торшин С.П., Каупенйоханн М.* Особенности первичного распределения поллютантов на агрегатном и профильном уровнях почв. Тез. докл. межд. конф. Биогеография почв. Сыктывкар, 2002. С. 49-50. — 6. *Horn R.* Kie bedeutung der aggregierung fur die nahrungssorption in boden // Z Pflanzenerenahr. Bodenk, 1987. V. 150. P. 13-16. — 7. *Kaysers A.T., Wikke W., Kaupenjohann M., Joslin J.K.* Small scale heterogeneity of soil chemical properties. I A technique for rapid aggregate fractionation // Z Pflanzenerenahr. Bodenk, 1994. V.157. P. 453-458.

Рецензент — д. б. н. А.И. Карпухин

SUMMARY

The role of soil profile condition — damaged or undamaged — has been revealed in the article, various biological activity — in both radioactive cesium and radioactive strontium transport in descending water flow during atmospheric precipitation modernization. Living plants proved to forward more active movement of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the soil. Features of radionuclides localization at aggregate level in soil have been studied. Primary concentration of radioactive toxic matter is found on their surface. Informative enough index — concentration coefficient (factor) — which describes well gradients of ^{137}Cs and ^{90}Sr concentrations, forming in soil, is offered in the article.