

ПОВЕДЕНИЕ ^{137}Cs В ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ (ФАКТОРЫ, ДИНАМИКА, ПРОГНОЗ)

Булко Н.И.¹, Толкачева Н.В.¹, Потапенко А.М.¹, Козлов А.К.¹,
Машков И.А.¹, Митин Н.В.², Шабалева М.А.³,
Серенкова В.А.¹, Бутьковец В.В.¹

¹ГНУ «Институт леса НАН Беларуси»

²УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»

³УО «Гомельский государственный медицинский университет»
(г. Гомель, Беларусь)

Приводятся результаты миграции ^{137}Cs вглубь подстильно-почвенного комплекса лесных насаждений. Проанализировано влияние на процесс миграции радионуклида основных лесообразующих пород, трофности и влагообеспеченность почвы, состава смешанных и сложных насаждений, монодоминантных подлесочных ярусов. Показано, что глубже 20 см в почву проникло значительное количество радионуклида, что скорость вертикальной миграции на гидроморфных почвах выше, чем на автоморфных. Определены тенденции дальнейшего развития процессов миграции ^{137}Cs в подстильно-почвенном комплексе.

В результате катастрофы на Чернобыльской АЭС радиоактивному загрязнению свыше 1 Ки/км² подверглось 25,6% территории лесного фонда (1719,8 тыс. га) Республики Беларусь [1].

Леса, задержав радиоактивные вещества и прочно удерживая их выступают до настоящего времени в роли биогеохимического барьера для радионуклидов, не давая им распространяться на прилегающие территории. Спустя 34 года после катастрофы (на 01.01.2020 г.), все еще остаются радиоактивно загрязненными 16,2% (1560,3 тыс. га) лесов Республики Беларусь. Темпы снижения радиоактивного загрязнения территории лесного фонда составляют 2,1-2,2% в год за счет радиоактивного распада. Практически в таком же темпе (до 2% в год) снижается мощность дозы γ -излучения как за счет радиоактивного распада, так и за счет вертикальной миграции ^{137}Cs вглубь в подстильно-почвенном комплексе.

К настоящему времени в лесных экосистемах сформировался замкнутый цикл циркуляции радионуклидов, состоящий из восходящей ветви, образованной поступлением радионуклидов из почвы в растительность через корневые системы и нисходящей – их поступления с опадом на подстилку.

В дальней зоне аварии количество основного чернобыльского радионуклида – ^{137}Cs , циркулирующего в насаждениях на автоморфных почвах – 3-5%, на гидроморфных – 6-12%. Большая часть запаса ^{137}Cs в лесной экосистеме сосредоточена в подстильно-почвенном комплексе (ППК).

Оценки запаса ^{137}Cs в подстилке и почве могут существенно различаться в силу особенностей их отбора. Так, на мониторинговых пунктах наблюдения подстилка отбирается вместе с живым напочвенным покровом, но растения его составляющие, накапливают значительное количество радионуклида [2],

что сказывается на оценке содержания его в подстилке. Почва на этих пунктах отбирается на глубину до 20 см, хотя мигрирующий вглубь почвы ^{137}Cs вышел за пределы 20-см слоя.

На стационарах ГНУ «Институт леса НАН Беларуси» распределение ^{137}Cs по слоям почвы изучалось на глубину 0,5 м и более.

К настоящему времени по данным мониторинга на ППН распределение запаса ^{137}Cs в ППК выглядит следующим образом: подстилка с живым напочвенным покровом содержит в насаждениях сосны на автоморфных почвах 33-53% запаса ^{137}Cs , на полугидроморфных – 62%. В почве, отбирившейся до глубины 20 см по 5-см слоям, большая часть (44-53%) находится в слое 0-5 см.

По полученным в Институте леса данным (рисунок 1), спустя 30-35 лет после катастрофы на ЧАЭС, запас ^{137}Cs в ППК сосновых насаждений распределялся: на автоморфных почвах находилось в подстилке – 20,3%, слое 0-5 см – 61%, 5-10 см – 9%, 10-20 см – 5,9%, 20-50 см – 2,8%; на гидроморфных почвах: в подстилке – 14,4%, слое 0-5 см – 39,9%, 5-10 см – 19%, 10-20 см – 9,8%, 20-50 см – 16,9%.

В березовых насаждениях на автоморфных почвах вертикальная миграция ^{137}Cs идет более интенсивно, чем в сосновых насаждениях. В подстилке содержится более 10,5% от запаса ^{137}Cs в ППК, в слое 0-5 см – 68,1%, в слое 5-10 см – 6,7%, 10-20 см – 5,6%. На глубину 20-60 см проникло в 3,2 раза больше ^{137}Cs , чем в сосняке (9,1%).

На гидроморфных почвах вертикальная миграция ^{137}Cs в березняках идет в таком же темпе, как и в сосновом насаждении на таких же почвах. Глубже 20 см находится 12,3% ^{137}Cs .

Таким образом, спустя 30-35 лет после катастрофы на ЧАЭС, основным депо радиоцезия в насаждениях на автоморфных почвах является подстилка и слой почвы 0-10 см, а на гидроморфных – подстилка и слой почвы 0-20 см. При этом значительное количество ^{137}Cs находится глубже 20 см, особенно в торфяно-болотных почвах (12-17%).

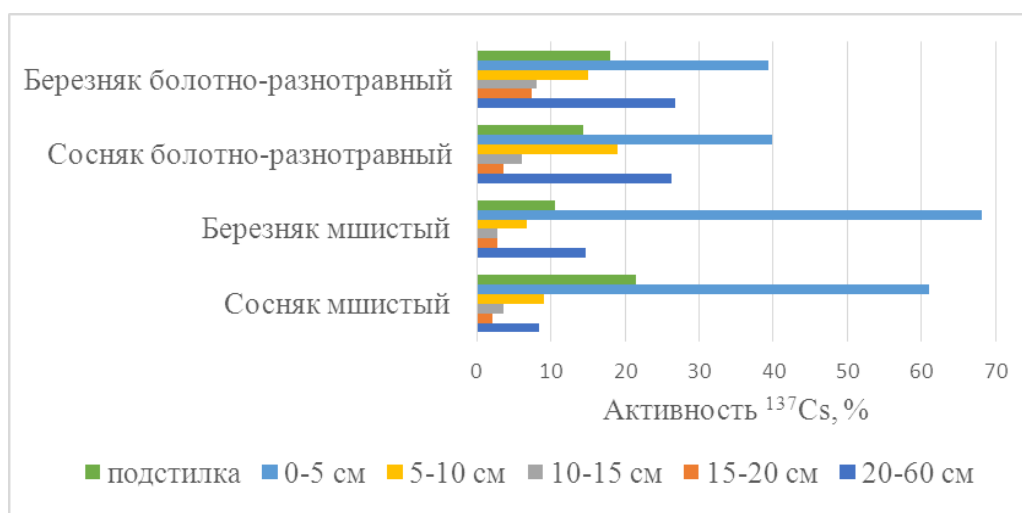


Рисунок 1 – Вертикальная миграция ^{137}Cs в березовых и сосновых насаждениях на автоморфных и гидроморфных почвах

Спустя 30-35 лет после катастрофы на ЧАЭС по усредненным данным установлены различия в содержании ^{137}Cs в ППК насаждений основных лесообразующих пород Беларуси на стационарах (таблица 1).

Таблица 1 – Усредненные значения параметров вертикальной миграции ^{137}Cs в ППК насаждений основных лесообразующих пород, %

Слой, см	Порода				
	сосна	береза	осина	дуб	ольха черная
Подстилка	30,9	22,8	24,7	12,4	5,9
0-5	50,9	56,2	56,8	69,2	59,1
5-10	9,6	11,8	12,2	12,1	23,0
10-15	4,9	5,5	4,0	4,3	9,0
15-20	3,1	3,2	2,3	2,1	3,0

Наиболее интенсивно вертикальная миграция ^{137}Cs из подстилки в почву идет в черноольховых насаждениях. В силу высокой скорости разложения опада (листьев) ольхи черной в сырых условиях произрастания, в подстилке содержание ^{137}Cs не превышает 6%. В то же время на втором месте по интенсивности перехода ^{137}Cs из подстилки в почву стоят дубравы, содержание ^{137}Cs в подстилке которых близко к 12,5%. Очевидно, что основную роль в процессах миграции в дубравах играет опад подлесочных пород, поскольку листья дуба медленно разлагаются. По содержанию радионуклида в подстилке насаждений березы и осины близки (соответственно 22,8 и 24,7%). Наибольшее количество ^{137}Cs содержится в подстилке сосновых насаждений – почти 31%. В целом, во всех насаждениях независимо от главной породы, в слое 0-5 см содержится больше половины запаса ^{137}Cs в ППК.

По результатам обобщенного анализа вертикальной миграции ^{137}Cs в зависимости от богатства почвы (таблица 2) видно, что быстрее всего из подстилки в почву переходит ^{137}Cs на богатых почвах в трофотопах С и D. Интенсивность вертикальной миграции более высока в этих же трофотопах.

Таблица 2 – Влияние трофности почвы на миграцию ^{137}Cs в ППК, %

Слой, см	Трофность			
	A	B	C	D
Подстилка	31,4	25,8	10,7	18,2
0-5	53,1	53,5	65,0	58,5
5-10	7,8	12,1	16,1	15,4
10-15	4,5	5,3	5,8	5,4
15-20	2,9	3,0	2,5	2,5

Не менее важно, наряду с трофностью почвы, влияние на вертикальную миграцию ^{137}Cs в ППК оказывает влажность почвы (таблица 3).

Наиболее интенсивно вертикальная миграция радионуклида в почве идет в сырых условиях произрастания, а миграция ^{137}Cs из подстилки в почву в мокрых, сырых и влажных условиях.

Таблица 3 – Влияние влагообеспеченности почвы на миграцию ^{137}Cs в ППК, %

Слой, см	Почва по влагообеспеченности			
	свежая	влажная	сырая	мокрая
Подстилка	24,9	14,1	18,0	7,5
0-5	60,1	63,1	50,3	67,5
5-10	9,5	14,7	18,9	17,2
10-15	3,3	5,2	9,0	5,2
15-20	2,2	2,5	3,7	2,6

Наличие развитого подлеска влияет на вертикальную миграцию ^{137}Cs в ППК разнопланово. Загрязненность ^{137}Cs подстилки в сосняке без подлеска выше, чем в сосняке с подлеском из крушины, лещины, бересклета, свидины и ниже, чем в сосняке с подлеском из ирги, боярышника, рябины. Полученные усредненные данные по запасу ^{137}Cs в подстилке согласуются с различной устойчивостью опада подлеска к разложению с особенностями строения корневых систем подлесочных пород при общем тренде выравнивая к 2020 году различий в распределении запаса ^{137}Cs между подстилкой и почвой в насаждениях с подлеском и без него.

Особенности миграции ^{137}Cs в ППК смешанных насаждений в сравнении с образующими их чистыми или близкими к ним однопородными древостоями аналогичны особенностям накопления радионуклида в древесных ярусах этого состава. Так, в смешанных насаждениях сосны с елью, сосны с дубом, сосны с осиной, имеющих в своем составе 4-6 единиц сосны, относительный запас ^{137}Cs в подстилке меньше, чем в чистых насаждениях сосны соответственно в 2,2; 1,3; 1,7 раза и в тоже время выше, чем в чистых древостоях ели в 2,2, осины – в 1,2 раза. Аналогичным образом идет миграция ^{137}Cs в ППК смешанных насаждений другого состава.

Таким образом, на вертикальную миграцию ^{137}Cs вглубь ППК существенное влияние оказывает ряд факторов, среди которых главная порода, состав насаждения, тип почвы, трофность, влагообеспеченность, наличие и видовой состав подлеска. Тенденции дальнейшего развития процессов миграции ^{137}Cs в лесных почвах состоят в совместном действии ряда вышеуказанных факторов с учетом снижения загрязнения радионуклидом за счет радиоактивного распада, определенного замедления процессов миграции из-за климатических и сезонных изменений последних лет.

Поскольку в лесах, загрязненных радионуклидами наиболее распространены сосновые и березовые насаждения, рассмотрим динамику миграции ^{137}Cs на их примере. В сосновых насаждениях на автоморфных почвах в начальный период наблюдений наибольшая активность ^{137}Cs была сосредоточена во мхе, затем шли подстилка и почва. За 25 лет содержание радионуклида во мхе снизилось в

64,7 раза за счет перемещения его в подстилку и почву. Максимум активности ^{137}Cs в подстилке пришелся на 1993 год, а минимум содержания – на 1997 год. Интенсивный переход радионуклида из подстилки в почву наблюдался в период 1993-2004 гг., при этом активность ^{137}Cs в подстилке уменьшилась в 3,8-4 раза. С 2005 года процесс миграции в ППК замедлился. В сосняке на мощных торфяных почвах содержание ^{137}Cs к 1999 г. было менее 12% от общего запаса в ППК, однако к 2004-2006 гг. его активность увеличилась и к концу периода наблюдений снова снизилась в 2,3 раза (до минимума). При этом на всех объектах на мощных торфяных почвах процессы перераспределения ^{137}Cs в ППК между подстилкой и почвой носили циклический характер, обусловленный изменением подвижности ^{137}Cs в разложившемся слое подстилки и в торфяной почве в связи с погодными условиями и с изменением влажности ППК.

Аналогичный, но не столь выраженный характер носят процессы перераспределения ^{137}Cs в березовых насаждениях. На мощных торфах в них миграция радионуклида между подстилкой и почвой в ППК также носит циклический характер с минимумом содержания ^{137}Cs в почве в 2004 году.

По многочисленным прогнозам, по сравнению с 1991 г., предполагалось к 2021 г. суммарное снижение содержания ^{137}Cs в подстилке и слое почвы 0-20 см до 44% с периодом полуочищения 29 лет на автоморфных почвах и 12-15 лет – на торфяных. Однако, уже к 2014 году запас ^{137}Cs в ППК снизился в 2 раза. В последующем фактически процесс миграции ^{137}Cs в ППК замедлился и в настоящее время имеет низкую интенсивность. Основную роль в динамике содержания ^{137}Cs в ППК будет играть радиоактивный распад.

Таким образом, на миграцию ^{137}Cs вглубь подстильно-почвенного комплекса оказывают влияние породный состав насаждений, трофность почвы, ее влагообеспеченность, монодоминантный развитый подлесочный ярус, состав смешанных и сложных насаждений.

Спустя 25-35 лет после катастрофы на ЧАЭС на автоморфных почвах глубже 20 см мигрировало 3-9% запаса радионуклида в ППК, на гидроморфных мощных торфяных почвах – 12-17%. Процесс миграции носит волнообразный (циклический) характер, обусловленный переходом ^{137}Cs из разложившегося подстильного слоя в почву и обратно при сезонном изменении влажности ППК под влиянием климатических факторов.

Скорость процессов вертикальной миграции в настоящее время замедлилась из-за климатических и сезонных изменений последних лет. Тенденции дальнейшего развития процессов миграции ^{137}Cs в лесных почвах будут определяться совместным действием ряда вышеуказанных факторов с учетом снижения запаса радионуклида за счет радиоактивного распада.

Литература

1. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В.А. Ипатьев [и др.]. – Под ред. В.А. Ипатьева. – Гомель: Институт леса НАН Беларуси, 1999. – 452 с.

2. Радиоактивное загрязнение территории Беларуси в связи с аварией на ЧАЭС / Под общ. Ред. В.И. Парфенова и Б.И. Якушева. – Минск: Наука и техника, 1995. – 582 с.

**BEHAVIOR OF ^{137}Cs IN FOREST SOILS
(FACTORS, DYNAMICS, FORECAST)**

*Bulko N.I., Tolkacheva N.V., Potapenko A.M., Kozlov A.K., Mashkov I.A., Mitin N.V.,
Shabaleva M.A., Serenkova V.A., Butkovets V.V.*

The results of ^{137}Cs migration into the depth of the litter-soil complex of forest stands are presented. The influence on the process of radionuclide migration of the main forest-forming species, trophicity and moisture supply of the soil, the composition of mixed and complex stands, monodominant undergrowth layers is analyzed. It was shown that a significant amount of radionuclide penetrated into the soil deeper than 20 cm, that the rate of vertical migration on hydromorphic soils is higher than on automorphic soils. Trends in the further development of ^{137}Cs migration processes in the litter-soil complex have been determined.

