

ДИНАМИКА ДЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПОСТУПЛЕНИЯ ^{137}Cs В КОМПОНЕНТЫ ФИТОМАССЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ИЗ АВТОМОРФНЫХ ПОЧВ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ АВАРИИ НА ЧАЭС

**Булко Н.И.¹, Шабалева М.А.², Митин Н.В.³,
Толкачева Н.В.¹, Козлов А.К.¹**

¹ГНУ «Институт леса НАН Беларуси»

(г. Гомель, Беларусь)

²УО «Гомельский государственный медицинский университет»

(г. Гомель, Беларусь)

³УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

(г. Гомель, Беларусь)

Изучены особенности и динамика процессов поступления ^{137}Cs в деревья сосны из автоморфных песчаных почв в дальней зоне аварии на ЧАЭС. Показаны изменения в накоплении ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосны в сосняке мшистом в течение длительного (25 лет) промежутка времени.

ВВЕДЕНИЕ

Накопление радионуклидов древесными растениями определяется рядом факторов, среди которых видовые особенности древесных пород, состав насаждений, тип почв, водообеспеченность, уровень радиоактивного загрязнения почв и др. [1, 2, 3]. Большинство исследователей отмечалось, что наиболее существенное влияние на потребление ^{137}Cs растениями оказывает увлажненность экотопа, уровень влагообеспеченности почвы [4].

Выполненные нами исследования [5] показали, что за 25-летний период произошло существенное перераспределение ^{137}Cs в подстильно-почвенном комплексе сосняка мшистого на автоморфных песчаных почвах. При этом свыше 80% запаса радионуклида к 2014 г находилось в почве, а центр запаса радионуклида в ППК по сравнению с 1991 г. сместился вглубь вдвое.

Прогнозные модели, базировавшиеся на материалах исследователей первого десятилетия после аварии, предсказывали максимум накопления в древесине сосны в мшистом типе леса на середину 90-х годов и уменьшение ее загрязнения к 2014 г. по сравнению с 1991 г. в 1,7 раза [2, 6].

Проводившиеся нами в течение 25 лет периодические исследования на одних и тех же объектах в дальней зоне аварии на ЧАЭС в пределах Северного следа выпадений позволяют проследить фактическую динамику загрязненности компонентов фитомассы сосны, оценить достоверность прогнозов и реальные сроки реабилитации исследуемых насаждений.

Цель настоящей работы – провести сравнительный анализ динамики накопления ^{137}Cs компонентами фитомассы сосны в насаждениях на автоморфных почвах за последние 25 лет.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве модельного объекта для исследований в сосновых насаждениях дальней зоны аварии на ЧАЭС выбран один из стационаров на территории Северного следа чернобыльских выпадений в Ветковском спецлесхозе Гомельской области – стационар «Петуховка», заложенный в 1991 г. в сосняке мшистом. Подробная лесоводственная, таксационная и радиационная характеристики насаждений на стационаре приведены в [5].

В основу проводимых исследований положен радиологический анализ образцов компонентов фитомассы сосны, отбирившихся по единой методике в течение всего периода наблюдений. Отбор проб древесины, коры, одно- и двухлетней хвои, одно- и двухлетних побегов, производился с трех модельных деревьев (из каждого отдельно), которые подбирались из числа деревьев основной породы насаждения и соответствовали следующим критериям: равномерно располагались на территории участка, принадлежали к I и II классу роста и развития по Крафту.

Отбор проб древесины без коры производился напиливанием опилок бензопилой на расстоянии 1,3 м от нижнего спила дерева пропилами на всю глубину диаметра.

Полученные от каждой модели опилки (не менее 1 кг), а также образцы других компонентов фитомассы упаковывались в отдельные полиэтиленовые пакеты, снабжались этикеткой и укладывались во второй пакет.

В 2006 г. древесина отбиралась в виде кернов приростным буравом из растущих деревьев сосны I-II классов роста Крафта в двух повторностях из 25 моделей в каждой. Кора отбиралась стругом на расстоянии 1,3 м от нижнего спила ствола. Затем в этом месте отбиралась древесина без коры. Образцы высушивались, измельчались и готовились к измерениям.

Отбор побегов и хвои производился из верхней части кроны модельных деревьев. Радиометрические измерения отобранных образцов почвы и растительности осуществлялись после их высушивания и пробоподготовки на бета-гамма – радиометре «МКС-АТ1315» [7] и сцинтилляционном гамма – спектрометре «ПРОГРЕСС-320» [8]. Нижний предел измерения приборов – 4 Бк/кг. Средняя относительная погрешность измерения «МКС-АТ1315» – до 20%, «ПРОГРЕССА-320» – 7-11%.

Математическая обработка спектрограмм проб проводилась по специальным алгоритмам разработчиков этих приборов в IBM – совместимом программном обеспечении.

Измерения проводились в следующих геометриях:

- сосуд Маринелли – 1 л;
- цилиндрический сосуд «плошка» высотой 50 мм и диаметром 140 мм;
- цилиндрический сосуд «дента» высотой 32 мм и диаметром 70 мм;
- сосуд специальной геометрии для измерения содержания ^{137}Cs на МКС-АТ1315.

Статистическая обработка полученных данных осуществлялась с помощью программ Microsoft Excel и Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Систематические наблюдения за поступлением ^{137}Cs в компоненты фитомассы сосны в сосновом насаждении на автоморфных почвах стационара «Петуховка» осуществлялись с разной периодичностью с 1991 по 2014 гг. – 7 раз.

В те же периоды на этом стационаре изучались особенности вертикальной миграции радионуклида в подстильно-почвенном комплексе [5].

Динамика поступления ^{137}Cs в компоненты фитомассы сосны на автоморфных почвах в дальней зоне аварии на ЧАЭС. Результаты наших исследований показывают (таблица 1, рисунок 1), что в 1991 г. максимальное содержание ^{137}Cs имелось в коре. К 2014 г. средняя удельная активность коры снизилась в 5,7 раза. Наиболее высокая удельная активность в древесине сосны на автоморфных почвах имела место в 1993-1997 гг., на которые пришелся пик накопления ^{137}Cs на стационаре «Петуховка». По сравнению с 1991 г. в 2014 г. содержание ^{137}Cs в древесине снизилось в 1,8 раза, а в сравнении с 1995 г. – в 2,8 раза. В хвое и побегах максимум содержания радионуклида приходился на 1993 г., при этом, по сравнению с 1991 г., отмечен рост удельной активности ^{137}Cs в однолетних побегах и хвое в 2,2-2,5 раза, двухлетних побегах и хвое – в 1,4-1,5 раза. По сравнению с максимумом содержания ^{137}Cs в этих компонентах фитомассы, приходившимся на 1993 г., в 2014 г. среднее содержание радионуклида в них снизилось соответственно в 3,6-3,7 раза и 1,9-2,1 раза.

В течение всего периода наблюдений физиологически активные компоненты фитомассы сосны (однолетняя хвоя и побеги) отличались наиболее высоким уровнем накопления ^{137}Cs , который превышал, как видно из таблицы 2, уровень накопления в древесине в разные годы в среднем в 10,7-18,1 раз. Отток физиологически активных веществ и радионуклида из однолетних побегов и хвои по окончании периода их активного роста привел к уменьшению содержания ^{137}Cs в двухлетних побегах и хвое в среднем в 2,4-2,8 раза.

Таблица 1 – Динамика удельной активности ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосны в сосняке мшистом на автоморфных песчаных почвах

Год	Активность ^{137}Cs , Бк/кг					
	кора	древесина	побеги однолетние	побеги двухлетние	хвоя однолетняя	хвоя двухлетняя
1991	15170	834	11211	4308	13866	5578
1993	10162	1138	28428	9398	31092	8399
1995	8823	1320	14862	5936	15472	5613
1997	8096	1314	19397	7624	18303	6508
2004	4020	765	14690	6048	15933	4197
2006	–	779	–	–	–	–
2014	2651	468	7748	4465	8674	4311

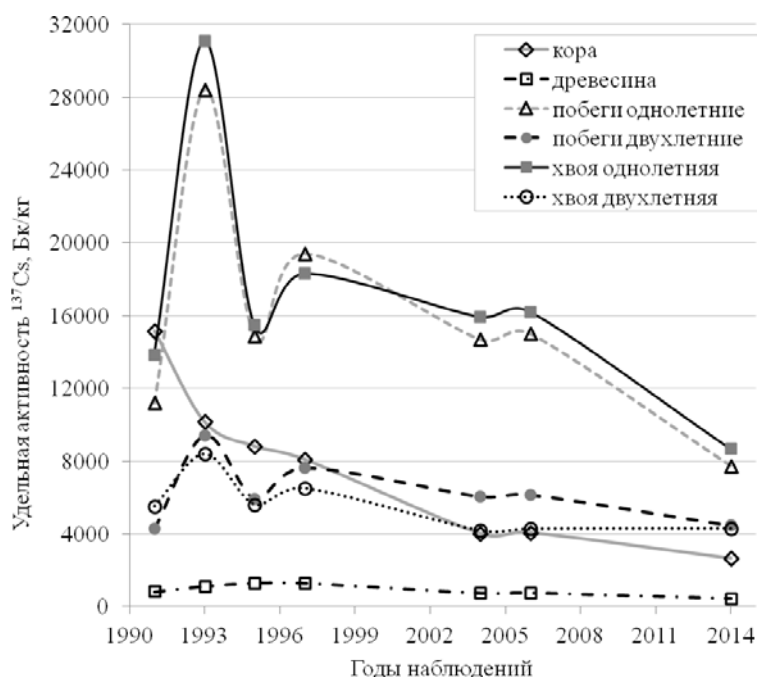


Рисунок 1 – Динамика удельной активности ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосны с 1991 по 2014 годы на автоморфной почве, стационара «Петуховка»

Таблица 2 – Динамика соотношений удельной активности ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосны в насаждении на автоморфной песчаной почве, стационар «Петуховка»

Компоненты фитомассы	Годы						
	1991	1993	1995	1997	2004	2006	2014
Кора	18,2	8,9	6,7	6,2	5,3	–	5,7
Древесина	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Побеги однолетние	13,4	25,0	11,3	14,8	19,2	–	16,6
Побеги двухлетние	5,2	8,3	4,5	5,8	7,9	–	9,5
Хвоя однолетняя	16,6	27,3	11,7	13,9	20,8	–	18,5
Хвоя двухлетняя	6,6	7,4	4,3	4,9	5,5	–	9,2

Дискретный характер чернобыльских выпадений на территории Северного следа, обусловивший высокую вариабельность поверхностного загрязнения почвы ^{137}Cs [5], обусловил неодинаковый уровень накопления радионуклида деревьями, произрастающими в одном насаждении.

Как видно из таблицы 3, в исследуемом сосновом насаждении стационара «Петуховка», по уровню накопления ^{137}Cs модельные деревья одного класса роста и развития существенно различаются.

Таблица 3 – Колебания в накоплении ^{137}Cs между модельными деревьями сосны одного класса роста и развития на автоморфных почвах стационара «Петуховка»

Компоненты фитомассы	Уровень различий в накоплении ^{137}Cs между модельными деревьями сосны, раз							Среднее
	1991	1993	1995	1997	2004	2006	2014	
Кора	1,1	1,3	1,4	1,4	2,2	–	2,7	1,7
Древесина	1,4	1,3	2,0	1,9	1,4	1,3*	2,7	1,7
Побеги однолетние	2,3	3,3	2,2	1,9	1,8	–	2,5	2,3
Побеги двухлетние	2,5	3,0	1,5	3,35	2,2	–	1,6	2,3
Хвоя однолетняя	1,3	1,6	3,3	1,7	2,1	–	2,5	2,1
Хвоя двухлетняя	1,1	1,6	1,9	1,9	1,8	–	2,3	1,8

Примечание: * Среднее различие между двумя повторностями из 25 моделей каждая

До начала двухтысячных годов минимальные различия по сравнению с древесиной отмечались для коры сосны (1,3-1,4 раз), загрязнение которой в большей мере была поверхностным. Затем в загрязнении коры большую роль стал играть фактор различий накопления ^{137}Cs отдельными деревьями одной древесной породы, обусловленный физиологическими особенностями отдельных деревьев в потреблении элементов питания и радионуклидов и депонировании их в флоэме в условиях дискретного характера выпадений.

Для других компонентов фитомассы сосны минимальными были различия в поступлении ^{137}Cs в компоненты фитомассы моделей сосны в 1991 г. Начиная с 1993 г. различия в содержании ^{137}Cs в одинаковых компонентах фитомассы деревьев сосны существенно возрастают, что обусловлено, скорее всего, поступлением, при вертикальной миграции ^{137}Cs в ППК, подвижных его форм в слои почвы, в которых располагается основная масса сосущих корней деревьев этой породы и, затем, в надземные компоненты фитомассы.

Отдельные скачки в уровнях накопления ^{137}Cs по годам (например, в 1995 г.) труднообъяснимы. Попытка связать их с метеорологическими показателями года результатов не дали, поскольку по погодным условиям вегетационный период 1995 г. существенно не отличался (ГТК=1,05) от предыдущего и последующих лет.

Динамика коэффициентов перехода ^{137}Cs в компоненты фитомассы сосны на автоморфных песчаных почвах.

Как видно из таблицы 4, плотность загрязнения почвы к 2014 г. снизилась примерно в 2 раза, что вполне согласуется с периодом полураспада радионуклида. При этом, в 1991 г., спустя 6 лет после аварии, коэффициенты перехода ^{137}Cs в побеги, хвою сосны на автоморфных песчаных почвах были достаточно велики, чего не скажешь о коэффициентах перехода ^{137}Cs в древесину. В 1993 г. процессы перехода ^{137}Cs в фитомассу сосны, как отмечалось выше, определялись весьма интенсивным потреблением деревьями сосны радионуклида, что

скорее всего было обусловлено высвобождением в почве мобильных форм радионуклида в условиях аномально высокого, превышавшего среднее годовое в 1,25 раза, количества осадков (685,2 мм/год, 522,1 мм/вегетационный сезон) в районе расположения стационара «Петуховка».

Таблица 4 – Коэффициенты перехода ^{137}Cs в компоненты фитомассы сосны на автоморфных песчаных почвах стационара «Петуховка»

Год	КП в компоненты фитомассы сосны, $\text{н} \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$						Средняя плотность загрязнения, $\text{кБк}/\text{км}^2$
	кора	древесина	побеги однолетние	побеги двухлетние	хвоя однолетняя	хвоя двухлетняя	
1991	7,8	0,4	5,8	2,2	7,1	2,9	1942
1993	8,8	1,0	24,7	8,2	27,0	7,3	1152
1995	5,2	0,8	8,7	3,5	9,1	3,3	1703
1997	7,4	1,2	17,8	7,0	16,8	6,0	1092
2004	4,3	0,8	15,9	6,5	17,2	4,5	926
2006	–	1,1	–	–	–	–	740
2014	2,9	0,5	8,3	4,8	9,3	4,6	928

Динамика изменения коэффициента перехода ^{137}Cs в компоненты фитомассы сосны на автоморфных почвах, как видно из таблицы 4 и рисунка 2, носит в определенной степени синусоидально-циклический характер с более низкими КП ^{137}Cs в 1991 г., 1995 г., 2004 г., 2014 г. В целом, с 1993 по 2014 годы КП ^{137}Cs снизился в 1,5-3,0 раза. Дальнейшие исследования позволят установить пришелся ли КП ^{137}Cs в 2014 г. на спад синусоиды или на ее подъем. Динамика изменения КП ^{137}Cs в кору в значительной мере за изучаемый период времени была обусловлена длительными процессами ее самоочищения за счет отслоения аэралью загрязненных верхних слоев коры.

К настоящему времени отмечено устойчивое постепенное снижение КП ^{137}Cs , прежде всего за счет уменьшения удельной активности радионуклида в компонентах фитомассы деревьев сосны, вследствие как распада радионуклида, так и некоторого снижения корневого поступления его в деревья из-за происходящих в почве на стационаре «Петуховка» процессов вертикальной его миграции, сопровождаемых изменением содержания биологически доступных форм ^{137}Cs в слоях почвы, на которые приходится основная масса физиологически активных корней сосны [9].

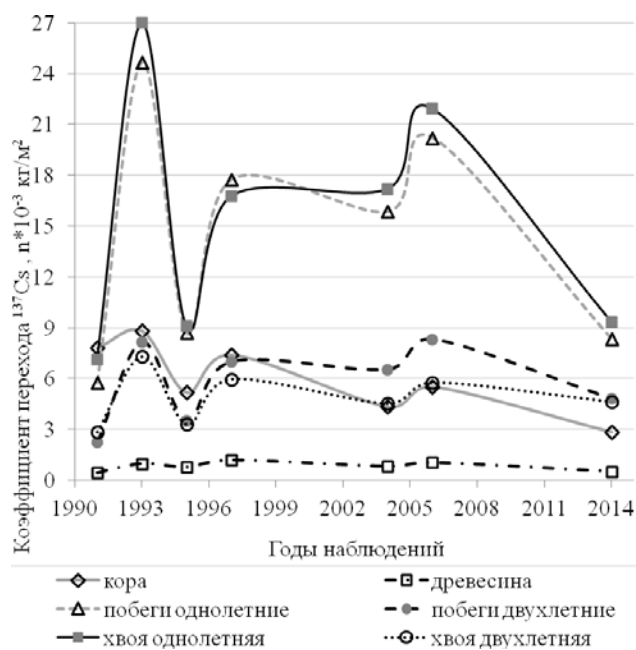


Рисунок 2 – Динамика КП ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосны в 1991-2014 гг.

Оценивая достоверность прогнозов изменения содержания ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосняка мшистого с течением времени, можно отметить определенные совпадения и различия полученных нами фактических данных и полученных авторами [2, 6] прогнозных показателей:

1. По прогнозам максимум накопления ^{137}Cs в древесине, в побегах, хвое в сосняке мшистом предсказывался на начало 90-х годов (на 1991-1993 гг.). Фактически, на стационаре «Петуховка», максимум накопления ^{137}Cs пришелся на 1993-1997 гг.

2. По прогнозу удельная активность ^{137}Cs в окоренной древесине сосны должна была достигнуть уровня 1991 г. в 2004 г. Фактически на стационаре «Петуховка» этот процесс произошел несколько ранее 2004 г.

3. По прогнозу, по сравнению с 1991 г, удельная активность ^{137}Cs в древесине сосны в дальней зоне аварии на ЧАЭС к 2014 г. должна была уменьшиться в 1,7 раз. Фактически – на стационаре «Петуховка» – она уменьшилась за этот период в 1,8 раза.

4. С середины 2000-х годов прогнозировался стабильный характер распределения ^{137}Cs в сосняке мшистом. Фактически, относительно стабильный характер распределения ^{137}Cs в сосняке мшистом прослеживался только для древесины и коры сосны с 2006 г.

Реальные сроки реабилитации сосняков мшистых определяются возможностью вовлечения их в эксплуатацию при условии соответствия загрязненности неокоренной древесины допустимому уровню содержанию в ней ^{137}Cs , предусмотренному РДУ/ЛХ-2001. Согласно результатам исследований, отраженным в таблице 1, допустимому уровню загрязнения лесоматериалов круглых, прочих в 1480 Бк/кг, неокоренная древесина сосны на стационаре «Петуховка» соответствовала уже в 2004 г., а уровню использования ее для строительства стен жилищных зданий (740 Бк/кг) – в 2014 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ динамики удельной активности ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосняка мшистого, произрастающего на автоморфных песчаных почвах, показал, что за период с 1991 по 2014 годы процесс накопления ^{137}Cs носил циклический характер с периодом 7-10 лет.

Максимум накопления ^{137}Cs в компоненты фитомассы деревьев в сосновом насаждении на автоморфных почвах пришелся на 1993-1997 гг.

В 2014 г., по сравнению с максимум содержания ^{137}Cs в компонентах фитомассы в 1993 г., среднее содержание радионуклида было ниже в однолетних побегах и хвое в 3,6-3,7 раза, двухлетних побегах и хвое – в 1,9-2,1 раза.

Наиболее низкий уровень накопления ^{137}Cs отмечен в древесине, причем в 2014 г. по сравнению с 1991 г. он был ниже в 1,8 раза, по сравнению с максимумом накопления в 1995 г. – в 2,8 раза.

Удельная активность ^{137}Cs в других компонентах фитомассы существенно отличалась от удельной активности древесины в разные годы: в двухлетней хвое и побегах – в 2,4-2,8 раза, однолетней хвое и побегах – в 10,7-18,1 раз, коре – в 5,3-18,2 раза.

Дискретный характер выпадений на территории Северного следа обусловил существенные, близкие к двукратным, колебания накопления ^{137}Cs деревьями сосны одного класса роста и развития в насаждении на автоморфных песчаных почвах.

С 2006 г. отмечается устойчивое и постепенное снижение коэффициента перехода ^{137}Cs в компоненты фитомассы сосны за счет сочетанного действия таких факторов, как распад радионуклида, снижение корневого поступления радионуклида, изменение количества биологически доступных форм радионуклида в слоях почвы с наиболее высокой корненасыщенностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щеглов, А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах / А.И. Щеглов. – М.: Наука, 1999. – 268 с.
2. Переволоцкий А.Н. Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах / Гомель, РНИУП «Институт радиологии», 2006. – 255 с.
3. Москаленко, Н.В. Влияние биологических особенностей подлесочных пород на поступление ^{137}Cs в древесину сосны в условиях мшистого типа леса / Н.В. Москаленко, Н.И. Булко, М.А. Шабалева // Современное состояние и перспективы ведения лесного хозяйства на загрязненных радионуклидами землях: материалы междунауч.-практ. конф., Гомель, 26-28 апреля 2011 г. / ИЛ НАН Беларуси; редкол. А.И. Ковалевич [и др.]. – Гомель, 2011. – С. 87-90.
4. Шубин, В.А. Радиационный мониторинг в лесах России / В.А. Шубин, И.И. Марадудин, А.В. Панфилов // Проблемы экологии лесов и лесопользования в Полесье Украины: научные труды Полесской АЛНИС. – Вып.4. – Житомир, 1997. – С. 17-25.

5. Булко, Н.И. Особенности длительных процессов миграции чернобыльского ^{137}Cs в автоморфных и гидроморфных почвах сосновых фитоценозов в дальней зоне аварии на ЧАЭС / Н.И. Булко [и др.] // Сб. науч. тр., НАН Беларуси Ин-т леса, Гомель, 2015. – Вып. 75: Проблемы лесоведения и лесоводства. – С. 391-404.

6. Дворник, А.М. Радиоэкологическая оценка лесных экосистем после ядерных аварий: методология, моделирование, прогноз // автореф. дис. ... доктора биол. наук: 06.03.03, 03.00.16 / А.М. Дворник; Институт леса НАН Беларуси. – Гомель, 1998. – 40 с.

7. Методика выполнения измерений объемной и удельной активности ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{10}K на гамма-бета – спектрометре типа МКС-АТ1315, объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов ^{137}Cs и ^{10}K на гамма-спектрометре типа EL 1309 (МКГ-1309) в пищевых продуктах, питьевой воде, почве, сельскохозяйственном сырье и кормах, продукции лесного хозяйства, других объектах окружающей среды. МВИ МН 1181-2007. – Мн.: Атомтех, 2007. – 28 с.

8. Методика измерений удельной и объемной активности гамма-излучающих радионуклидов ^{137}Cs , ^{40}K в пищевых продуктах, сельскохозяйственном сырье и кормах, лесной продукции, удельной эффективной активности естественных радионуклидов в строительных материалах, а также удельной активности ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почве на сцинтилляционном гамма-спектрометре «ПРОГРЕСС – ГАММА» с использованием программного обеспечения «ПРОГРЕСС». МВИ. МН 2418 – 2005. Мн: Беллесрад, 2005. – 17 с.

9. Булко, Н.И. Трансформация форм нахождения ^{137}Cs в почвах насаждений различного состава в дальней зоне чернобыльской катастрофы спустя четверть века / Н.И. Булко // Сб. науч. тр., НАН Беларуси Ин-т леса, Гомель, 2014. – Вып. 74: Проблемы лесоведения и лесоводства. – С. 380-391.

LONG-TERM DYNAMICS OF ^{137}CS INTAKE IN COMPONENTS OF SCOTCH PINE PHYTOMASS ON AUTOMORPHIC SOILS IN THE FAR ZONE OF CHERNOBYL ACCIDENT

Bulko N.I., Shabaleva M.A., Mitin N.V., Tolkacheva N.V., Kozlov A.K.

The features and dynamic of ^{137}Cs accumulation in the pine trees on automorphic sand soils in the far zone of the Chernobyl accident were studied. The changes in ^{137}Cs accumulation by the components of pine biomass in mossy pine forest for a long period of time (25 years) were investigated. It was found that the ^{137}Cs accumulation processes in pine organs have a trend of the cyclic type with a period of 7-10 years. Since 2006 there has been a steady decline of ^{137}Cs transfer factors (TF) in pine phytomass components on automorphic sand soils due to a decrease in the specific activity of ^{137}Cs in them. Maximum of radionuclides accumulation in the pine bodies on automorphic soils was observed in the years 1993-1997.

Статья поступила в редколлегию 12.04.2016 г.

