Радиоэкология, радиационная биология, радиохимия

Radioecology, radiation biology, radiochemistry

УДК 632.118.2:546.36:631.432.1

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА НАКОПЛЕНИЕ ^{137}Cs В НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЕ СОСНОВЫХ И БЕРЕЗОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ

***А. М. ПОТАПЕНКО*[1)], *А. Н. НИКИТИН*[1)], *А. К. КОЗЛОВ*[1)], *И. А. МАШКОВ*[1)], *Н. В. ТОЛКАЧЕВА*[1)], *Н. В. МОСКАЛЕНКО*[1)], *В. А. СЕРЕНКОВА*[1)]**

[1)]*Институт леса, Национальная академия наук Беларуси, ул. Пролетарская, 71, 246001, Гомель, Беларусь*

Образец цитирования:
Потапенко АМ, Никитин АН, Козлов АК, Машков ИА, Толкачева НВ, Москаленко НВ, Серенкова ВА. Влияние уровня грунтовых вод на накопление ^{137}Cs в надземной фитомассе сосновых и березовых насаждений. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2026;3:71–85.
https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-3-71-85

For citation:
Potapenko AM, Nikitin AN, Kozlov AK, Mashkov IA, Tolkacheva NV, Moskalenko NV, Serenkova VA. Influence of groundwater level on the accumulation of ^{137}Cs in the above-ground phytomass of pine and birch stands. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2026;3:71–85. Russian.
https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-3-71-85

Авторы:
Антон Михайлович Потапенко – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий лабораторией.
Александр Николаевич Никитин – кандидат сельскохозяйственных наук; директор.
Александр Константинович Козлов – научный сотрудник.
Игорь Алексеевич Машков – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; старший научный сотрудник.
Наталья Васильевна Толкачева – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; старший научный сотрудник.
Надежда Васильевна Москаленко – научный сотрудник.
Виктория Александровна Серенкова – научный сотрудник.

Authors:
Anton M. Potapenko, PhD (agriculture), docent; head of the laboratory.
formelior05@yandex.by
Alexander N. Nikitin, PhD (agriculture); director.
forinstnanb@post.gomel.by
Alexander K. Kozlov, researcher.
alexkak1958@gmail.com
Igor A. Mashkov, PhD (agriculture), docent; senior researcher.
formelior05@yandex.by
Natalia V. Tolkacheva, PhD (agriculture), docent; senior researcher.
formelior05@yandex.by
Nadezhda V. Moskalenko, researcher.
formelior05@yandex.by
Victoria A. Serenkova, researcher.
formelior05@yandex.by

Проведена оценка загрязнения ^{137}Cs древостоев, произрастающих на мелиорируемых полугидроморфных и гидроморфных почвах, показавшая, что, в отличие от автоморфных почв, доминирующим фактором, влияющим на интенсивность поступления радионуклида в древесные растения, является уровень грунтовых вод. Содержание ^{137}Cs в компонентах надземной фитомассы деревьев сосны и березы тесно коррелирует с уровнем грунтовых вод в меженный период и плотностью загрязнения почвы (R = 0,87–0,96), что позволило предложить модельные уравнения для расчета удельной активности ^{137}Cs в древесных компонентах, который в настоящий период поступает в растительность преимущественно за счет корневого поглощения. Полученные функциональные уравнения позволяют сделать прогноз радиоактивного загрязнения древесины на 95 % доверительном уровне, что практически дает возможность использовать полученные результаты для предварительного радиационного обследования лесосек на территориях радиоактивного загрязнения в дальней зоне чернобыльских выпадений.

Ключевые слова: сосновые насаждения; березовые насаждения; компоненты надземной фитомассы; ^{137}Cs; уровень грунтовых вод.

INFLUENCE OF GROUNDWATER LEVEL ON THE ACCUMULATION OF ^{137}Cs IN THE ABOVE-GROUND PHYTOMASS OF PINE AND BIRCH STANDS

A. M. POTAPENKO[a], ***A. N. NIKITIN***[a], ***A. K. KOZLOV***[a], ***I. A. MASHKOV***[a], ***N. V. TOLKACHEVA***[a], ***N. V. MOSKALENKO***[a], ***V. A. SERENKOVA***[a]

[a]*Institute of Forestry, National Academy of Sciences of Belarus,*
71 Praletarskaja Street, Gomel 246001, Belarus
Corresponding author: A. K. Kozlov (alexkak1958@gmail.com)

An assessment of ^{137}Cs contamination in tree stands growing on reclaimed semi-hydromorphic and hydromorphic soils revealed that, unlike in automorphic soils, the groundwater level is the dominant factor influencing the intensity of radionuclide uptake by woody plants. The ^{137}Cs content in the above-ground phytomass components of pine and birch trees correlates strongly with the groundwater level during the low-flow period and the soil contamination density ^{137}Cs (R = 0.87–0.96). This relationship enabled the proposal of model equations for calculating the specific ^{137}Cs activity in woody plant components, where the radionuclide currently accumulates primarily through root uptake. The resulting functional equations allow for the prediction of radioactive contamination in wood at a 95 % confidence level, making it practically feasible to use these findings for preliminary radiological surveys of logging sites in radioactively contaminated areas within the distant zone of Chernobyl fallout.

Keywords: pine stands; birch stands; aboveground biomass components; ^{137}Cs; groundwater level.

Введение

Условия почвенного увлажнения являются одним из факторов, оказывающим существенное влияние на накопление радионуклидов в древесных растениях. При исследовании накопления радионуклидов в растениях, произрастающих в условиях избыточного увлажнения, отмечено, что на гидроморфных почвах, по сравнению с автоморфными, различия в коэффициентах перехода ^{137}Cs достигают 70-кратной величины [1]. При переходе от полугидроморфных почв к гидроморфным увеличение коэффициентов перехода ^{137}Cs достигает 3–4 раз [2]. Во влажных экотопах, по сравнению с сухими, наблюдается более интенсивное заглубление ^{137}Cs по вертикальному профилю почв [3]. В наших исследованиях также отмечалось, что центр запаса ^{137}Cs в вертикальном профиле гидроморфной торфянистой почвы в сосняке пушицево-сфагновом, располагался глубже в 4,9 раза в сравнении с сосняком лишайниковым, произрастающим на автоморфной песчаной почве [4].

Приведенные выше закономерности в основном связывают с наличием торфяного горизонта, в котором ^{137}Cs практически не закрепляется и поэтому он легко доступен для растений [1]. Поэтому на участках с избыточным увлажнением почв увеличивается биологическая доступность радионуклида, которая обусловливает его интенсивное поступление в древесные растения.

Исследования миграции ^{137}Cs в частично мелиорированных насаждениях показали, что вертикальное перераспределение радионуклида на торфяно-болотных почвах лимитируется особенностями, определяемые изменением уровня грунтовых вод (УГВ). Было установлено, что близкое расположение мелиоративного канала приводит к повышению интенсивности процесса вертикальной миграции ^{137}Cs в почве [5].

Отмечалось, что колебания УГВ на торфяно-болотных почвах, происходящие за счет спада избыточной воды из корнеобитаемого слоя после весеннего половодья и летне-осенних паводков, приводят к улучшению воздухообеспеченности почвы, что положительно отражается на жизнедеятельности древесных растений. Установлено, что при амплитуде УГВ от 0 до 30 см отмечалось ухудшение жизненного состояния сосны [6]. Обращено внимание на особый водно-воздушный режим торфяных почв, способствующий более быстрому переводу в доступные для растений формы поступающих с удобрениями питательных веществ [6].

Изучение динамики накопления ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосны на гидроморфной почве позволило выявить устойчивое 2–4-кратное снижение накопления радионуклида при средневегетационном УГВ 56 см, обеспечивающего благоприятный водный режим для древесных растений, по сравнению с неблагоприятным водно-воздушным режимом при УГВ 27 см [7].

Таким образом, на полугидроморфных и гидроморфных почвах увеличение биологической доступности радионуклида для древостоев связано с повышением УГВ до определенных пределов, благоприятных для жизнедеятельности данных древостоев.

В настоящее время в лесных экосистемах на гидроморфных почвах процесс «самоочищения» почвы за счет фиксации минералами фактически отсутствует, а снижение биологической доступности в них происходит только из-за естественного радиоактивного распада. Следовательно, в период отсутствия радиоактивных выпадений и при преимущественно корневом поступлении радионуклида в растения, установление зависимостей накопления ^{137}Cs древесными растениями от параметров УГВ в лесных экосистемах с разной степенью гидроморфизма почв позволяет прогнозировать изменяющуюся радиационную характеристику насаждений на протяжении длительного периода их формирования. Цель исследования – изучение перераспределения ^{137}Cs в компонентах лесных насаждений дальней зоны чернобыльских выпадений при различных УГВ.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в приспевающих, спелых и перестойных сосновых и березовых насаждениях на частично мелиорируемых полугидроморфных, гидроморфных и автоморфных почвах Ветковского и Наровлянского спецлесхозов, расположенных в дальней зоне чернобыльских выпадений (более 30 км от ЧАЭС). Радиоактивное загрязнение насаждений определялось на пробных площадях (ПП) размером 20×100 м, заложенных параллельно мелиоративному каналу и на удалении от него – 25 м, 50 и 75–100 м. На ПП осенью проводился отбор проб надземной фитомассы с 3–4 модельных деревьев, включающий следующие компоненты: у сосны – кора, окоренная древесина, одно- и двухлетние побеги и хвоя; у березы – кора, окоренная древесина, однолетние побеги, ветви, листья. В летний период осуществлялся отбор проб почвенного комплекса – лесной подстилки и почвы, на глубину до 60 см – на торфяно-болотных разновидностях или 20 см – на минеральных. УГВ на каждой ПП оценивался по обустроенным 9 водомерным колодцам в виде трех створов на расстоянии 25 м друг от друга на линии, перпендикулярной осушительному каналу, что позволило определить амплитуду УГВ.

Расположение ПП и их шифр, исследуемая лесная порода и ее возраст, тип почв и режим их увлажнения приведены в табл. 1.

Удельная активность ^{137}Cs в компонентах фитомассы деревьев и подстилочно-почвенном комплексе определялась на бета-гамма-спектрометре *МКС-АТ1315* по *МВИ.МН 1181-2011*. Допускаемая относительная погрешность измерений не превышала 20 %.

Оценка влияния уровня грунтовых вод на накопление ^{137}Cs в надземной фитомассе насаждений выполнена на основании показаний УГВ в меженный период, так как он характеризовался устойчивыми минимальными колебаниями уровня воды в колодцах длительное время, что оказалось наиболее предсказуемым для сравнительного анализа между ПП. Различия биологической доступности ^{137}Cs в фитомассе насаждений на ПП, имеющих разную плотность загрязнения радионуклидом, определялись по коэффициентам перехода (Кп) ^{137}Cs, которые рассчитывались из соотношения удельной активности радионуклида в компоненте фитомассы и плотности загрязнения ^{137}Cs почвы.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования, проведенные за 2021–2023 гг., в сосновых и березовых насаждениях, произрастающих на территории с плотностью загрязнения ^{137}Cs от 88,5 кБк/м^2 до 764,8 кБк/м^2 при различном удалении от мелиоративных каналов, позволили определить особенности радиоактивного загрязнения надземной фитомассы, которые были охарактеризованы определенным УГВ меженного периода. Результаты радиационного обследования насаждений и почв, а также глубина воды в колодцах в августе – сентябре на исследуемых ПП по годам наблюдений, приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 1

Характеристика пробных площадей и почв в исследуемых сосновых и березовых древостоях

Table 1

Characteristics of sample plots and soils in the studied pine and birch stands

Квартал / выдел	Шифр ПП	Расстояние от мелиоративного канала, м	Лесная порода – возраст, лет	Тип почвы	
				по происхождению	по режиму увлажнения
Столбунское лесничество Ветковского спецлесхоза					
42/1	Ст-1	25	С*–65, Б**–45	торфяно-болотная	гидроморфная
	Ст-2	50			
	Ст-3	75			
Ветковское лесничество Ветковского спецлесхоза					
512/3	М3-1	25	С–77, Б–56	торфяно-болотная	гидроморфная
	М3-2	50			
512/3, 7	М3-3	100		торфянисто-болотная	полугидроморфная
517/6	М4-1	25	С–65, Б–41	торфянисто-болотная	полугидроморфная
	М4-2	50	С–83, Б–42		
517/7	М4-3	100	С–84, Б–58	минеральная	автоморфная
512/1	М2-1	25	Б–51	торфяно-болотная	гидроморфная
	М2-2	50			
	М2-3	100			
448/1	Ом1-1	25	Б–45	торфяно-болотная	гидроморфная
	Ом1-2	50			
	Ом1-3	100			
448/2	М1-1	25	С–105	торфяно-болотная	гидроморфная
	М1-2	50			
	М1-3	100			
252/15, 18	Кз-1	25	Б–50	минеральная	автоморфная
	Кз-2	50			
252/15, 17	Кз-3	100			
421/1	В-1	25	С–75	минеральная	автоморфная
	В-2	50			
	В-3	75			
Головчицкое лесничество Наровлянского спецлесхоза					
9/23	Г1-1	25	С–95	минеральная	автоморфная
	Г1-2	50			
	Г1-3	100			

*С – сосна; **Б – береза.

Таблица 2

Уровни грунтовых вод, плотность загрязнения почвы ^{137}Cs и его содержание в компонентах надземной фитомассы сосновых насаждений на исследуемых пробных площадях в разные годы наблюдений

Table 2

Groundwater levels, density of soil contamination with ^{137}Cs and its content in the components of the aboveground phytomass of pine stands in the studied sample plots in different years of observations

Шифр ПП	УГВ в меженный период, м, $x \pm m_x$,	Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs, кБк/м^2	Удельная активность ^{137}Cs (Бк/кг), $x \pm m_x$, в компонентах надземной фитомассы					
			кора	древесина	побеги 1-летние	побеги 2-летние	хвоя 1-летняя	хвоя 2-летняя
1-й год наблюдений								
Ст1-1	0,99 ± 0,06	122,5	1048 ± 81	291 ± 16	2974 ± 69	1502 ± 290	2552 ± 121	923 ± 126
Ст1-2	1,03 ± 0,05	88,5	909 ± 88	352 ± 76	4536 ± 949	1802 ± 112	2140 ± 452	741 ± 158
Ст1-3	1,15 ± 0,07	105,8	936 ± 38	346 ± 22	5662 ± 986	2006 ± 388	2550 ± 565	958 ± 206
М3-1	0,86 ± 0,05	388,8	10269 ± 1701	2171 ± 270	22958 ± 1097	10963 ± 490	16346 ± 260	8380 ± 227
М3-2	0,82 ± 0,05	304,1	8075 ± 342	1743 ± 41	25760 ± 1431	12946 ± 782	19466 ± 1119	9269 ± 1291
М3-3	1,57 ± 0,12	370,6	2968 ± 308	532 ± 49	8315 ± 1706	3640 ± 108	4936 ± 1024	2329 ± 333
М4-1	1,35 ± 0,09	380,8	4450 ± 501	1033 ± 18	11573 ± 1675	4649 ± 260	8877 ± 1417	3947 ± 819
М4-2	1,25 ± 0,08	273,3	5326 ± 764	1136 ± 92	12064 ± 1778	5146 ± 906	8949 ± 1004	4092 ± 270
М4-3	1,96 ± 0,13	332,4	1814 ± 233	396 ± 36	3654 ± 747	2502 ± 308	3071 ± 626	1867 ± 101
В1-1	1,28 ± 0,09	421,1	2510 ± 275	582 ± 67	6178 ± 603	3404 ± 730	4176 ± 331	1758 ± 93
В1-2	1,54 ± 0,11	463,5	2781 ± 363	763 ± 109	6677 ± 981	4048 ± 769	5001 ± 708	2215 ± 462
В1-3	1,67 ± 0,12	551,2	5519 ± 408	1273 ± 46	7616 ± 324	6202 ± 367	6681 ± 853	3236 ± 264
Г1-1	2,73 ± 0,14	333,6	796 ± 47	174 ± 19	2440 ± 522	1635 ± 327	1722 ± 195	784 ± 170
Г1-2	2,51 ± 0,13	262,1	1905 ± 134	478 ± 24	6209 ± 483	3075 ± 209	4431 ± 204	1427 ± 127
Г1-3	2,12 ± 0,11	314,3	1206 ± 138	245 ± 51	4021 ± 763	1702 ± 281	3313 ± 727	1194 ± 247
2-й год наблюдений								
М1-1	0,62 ± 0,03	317,7	3915 ± 854	1184 ± 263	23345 ± 5058	8867 ± 1936	14209 ± 3046	4088 ± 909
М1-2	0,51 ± 0,05	281,4	2216 ± 418	850 ± 137	12959 ± 1707	3868 ± 454	10245 ± 420	4025 ± 506
М1-3	0,39 ± 0,04	289,9	4342 ± 155	1263 ± 166	19516 ± 2498	7689 ± 314	15288 ± 449	5542 ± 501
3-й год наблюдений								
М3-1	0,80 ± 0,05	371,4	4782 ± 647	1099 ± 194	20133 ± 3304	8725 ± 1432	14889 ± 986	6623 ± 659
М3-2	0,73 ± 0,04	290,5	4795 ± 165	1759 ± 134	22761 ± 2600	8838 ± 1906	17182 ± 2815	7894 ± 1507
М3-3	0,82 ± 0,06	354,0	4889 ± 1081	1007 ± 218	16215 ± 3682	5457 ± 1036	10495 ± 2344	5303 ± 1121
М4-1	1,44 ± 0,10	363,7	2472 ± 66	967 ± 141	9857 ± 610	4818 ± 633	8607 ± 978	4155 ± 437
М4-2	1,31 ± 0,09	261,0	2779 ± 619	811 ± 174	11674 ± 2529	4462 ± 956	7731 ± 1729	3475 ± 718
М4-3	1,69 ± 0,11	317,5	838 ± 37	208 ± 19	2324 ± 97	1124 ± 72	1935 ± 149	1029 ± 88
М1-1	0,75 ± 0,05	310,5	3893 ± 428	910 ± 71	16395 ± 1410	6594 ± 134	14155 ± 1585	6613 ± 607
М1-2	0,68 ± 0,06	275,0	3841 ± 839	878 ± 199	17228 ± 3428	6166 ± 1303	11977 ± 1522	4907 ± 1037
М1-3	0,51 ± 0,05	283,3	6263 ± 1072	1471 ± 241	19184 ± 2392	8531 ± 873	16467 ± 2702	6831 ± 888

Таблица 3

Уровни грунтовых вод, плотность загрязнения почвы ^{137}Cs и его содержание в компонентах надземной фитомассы березовых насаждений на исследуемых пробных площадях в разные годы наблюдений

Table 3

Groundwater levels, density of soil contamination with ^{137}Cs and its content in the components of aboveground phytomass of birch stands in the studied sample plots in different years of observations

Шифр ПП	УГВ в меженный период, м, $x \pm m_x$	Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs, кБк/м^2	Удельная активность ^{137}Cs (Бк/кг), $x \pm m_x$, в компонентах надземной фитомассы				
			кора	древесина	побеги 1-летние	ветви	листья
1-й год наблюдений							
М3-1	0,86 ± 0,05	388,8	2773 ± 65	1272 ± 274	10996 ± 884	6730 ± 581	13090 ± 2892
М3-2	0,82 ± 0,05	304,1	2670 ± 586	879 ± 22	13475 ± 3029	6068 ± 642	17945 ± 3603
М3-3	1,57 ± 0,12	370,6	1790 ± 406	257 ± 52	4219 ± 902	1823 ± 188	4599 ± 1029
Ст1-1	1,35 ± 0,06	122,5	522 ± 104	220 ± 17	1645 ± 256	956 ± 139	2057 ± 443
Ст1-2	1,05 ± 0,05	88,5	456 ± 53	197 ± 38	1472 ± 280	920 ± 172	1452 ± 217
Ст1-3	1,25 ± 0,07	105,8	408 ± 17	164 ± 17	1236 ± 42	798 ± 68	1536 ± 124
М4-1	1,35 ± 0,09	380,8	1988 ± 439	575 ± 81	6812 ± 1278	3058 ± 119	6231 ± 169
М4-2	1,25 ± 0,08	273,3	1295 ± 293	474 ± 101	4405 ± 748	2455 ± 553	5959 ± 524
2-й год наблюдений							
М4-3	1,58 ± 0,08	332,4	489 ± 105	192 ± 42	1789 ± 354	787 ± 173	1603 ± 274
Кз-1-1	1,39 ± 0,06	731,3	995 ± 216	235 ± 51	1741 ± 387	706 ± 98	1625 ± 278
Кз-1-2	1,60 ± 0,09	764,8	524 ± 72	178 ± 13	1420 ± 267	605 ± 89	1563 ± 287
Кз-1-3	2,15 ± 0,11	674,7	211 ± 47	66 ± 5	365 ± 81	274 ± 62	416 ± 69
М2-1	0,49 ± 0,03	246,8	2567 ± 61	1264 ± 278	9502 ± 1676	4870 ± 840	14538 ± 2437
М2-2	0,56 ± 0,04	252,8	2564 ± 232	1294 ± 192	11482 ± 1005	5880 ± 373	14463 ± 2090
М2-3	0,58 ± 0,05	244,8	3889 ± 393	1353 ± 94	13840 ± 887	6069 ± 694	15635 ± 3492
Ом1-1	0,77 ± 0,04	373,4	3188 ± 692	736 ± 71	6162 ± 882	3991 ± 748	9238 ± 778
Ом1-2	0,84 ± 0,06	391,0	3576 ± 684	1079 ± 33	7931 ± 1724	4428 ± 864	8533 ± 1909
Ом1-3	0,78 ± 0,05	413,7	4090 ± 602	950 ± 179	9262 ± 1642	5108 ± 576	13705 ± 2295
3-й год наблюдений							
М3-1	0,80 ± 0,05	371,4	3824 ± 791	1058 ± 85	9291 ± 829	5110 ± 300	10925 ± 892
М3-2	0,73 ± 0,04	290,5	3294 ± 393	1078 ± 116	14293 ± 1621	6616 ± 307	17646 ± 2340
М3-3	0,82 ± 0,06	354,0	2471 ± 346	889 ± 199	8344 ± 769	4383 ± 285	8547 ± 1076
М4-1	1,44 ± 0,10	363,7	1446 ± 74	333 ± 31	3856 ± 235	2090 ± 151	4270 ± 646
М4-2	1,31 ± 0,09	261,0	1722 ± 353	695 ± 157	6732 ± 1330	3331 ± 597	5900 ± 760
М4-3	1,69 ± 0,11	317,5	410 ± 87	96 ± 11	1034 ± 108	616 ± 70	777 ± 175
М2-1	0,90 ± 0,05	241,2	4961 ± 778	905 ± 140	12471 ± 1081	6095 ± 128	11534 ± 405
М2-2	0,82 ± 0,06	247,1	3146 ± 489	1491 ± 87	14726 ± 1205	7520 ± 436	14837 ± 1299
М2-3	0,78 ± 0,05	239,2	3724 ± 588	1210 ± 57	13011 ± 803	6351 ± 376	18531 ± 3078
Ом1-1	0,90 ± 0,04	365,0	2351 ± 187	696 ± 50	7998 ± 1221	4246 ± 284	10560 ± 2190
Ом1-2	0,95 ± 0,05	382,1	3109 ± 73	692 ± 76	10750 ± 1118	5885 ± 770	12503 ± 2751
Ом1-3	0,94 ± 0,05	404,3	5025 ± 1106	1108 ± 168	14288 ± 3006	7398 ± 960	11652 ± 2645

Из приведенных данных по УГВ на ПП следует, что почвы с автоморфным типом режима увлажнения имели среднюю глубину залегания грунтовых вод – 1,85 ± 0,13 м, с полугидроморфным – 1,29 ± 0,10 м, с гидроморфным – 0,77 ± 0,04 м. При этом Кп ^{137}Cs в компоненты сосновых и березовых деревьев, рассчитанные по данным о радиоактивном загрязнении надземной фитомассы исследуемых насаждений и поверхностности почвы, отразили различия в уровнях накопления радионуклида в зависимости от режима увлажнения почв. Так, проведенный анализ сравнений Кп ^{137}Cs в компоненты фитомассы насаждений на разных типах почв с использованием U-критерия Манна – Уитни (табл. 4 и 5), убедительно показал существующие достоверные различия в накоплении радионуклида компонентами древесных растений, произрастающих в различных условиях увлажнения почв, за исключением коры и 2-летней хвои сосны при сравнении полугидроморфных и гидроморфных условий.

Таблица 4

Сравнительный анализ Кп ^{137}Cs в компоненты надземной фитомассы сосновых насаждений при различном типе режима увлажнения почвы по U-критерию Манна – Уитни

Table 4

Comparative analysis of Cf ^{137}Cs in the components of the aboveground phytomass of pine plantations under different types of soil moisture regime according to the Mann – Whitney U-test

Тип почвы по режиму увлажнения	Статистический показатель	Кп ^{137}Cs, *1E- 03 (м^2/кг) в компонент надземной фитомассы					
		кора	древесина	побеги 1-летние	побеги 2-летние	хвоя 1-летняя	хвоя 2-летняя
Автоморфная	*n*	8	8	8	8	8	8
	M	5,71	1,29	13,30	7,81	10,23	4,48
	ДИ$_{95\,\%}$	2,38 ÷ 10,01	0,52 ÷ 2,31	7,32 ÷ 23,69	3,54 ÷ 11,74	5,16 ÷ 16,91	2,35 ÷ 5,87
Полугидроморфная	n	6	6	6	6	6	6
	M	11,17	2,78	37,27	14,33	26,64	12,37
	ДИ$_{95\,\%}$	6,80 ÷ 19,49	1,43 ÷ 4,16	22,43 ÷ 45,81	9,82 ÷ 18,83	13,32 ÷ 32,75	6,28 ÷ 14,98
Автоморфная / полугидроморфная	*U-критерий*	3	3	1	2	1	0
	p	0,008	0,008	0,004	0,006	0,004	0,002
Гидроморфная	n	13	13	13	13	13	13
	M	12,88	3,73	59,04	23,49	43,55	17,85
	ДИ$_{95\,\%}$	8,85 ÷ 22,11	2,96 ÷ 5,58	51,27 ÷ 73,47	18,96 ÷ 30,11	24,19 ÷ 58,13	9,06 ÷ 24,11
Полугидроморфная / гидроморфная	*U-критерий*	26	15	5	7	11	20
	p	0,273	0,039	0,003	0,006	0,016	0,105

Примечание. *n* – число вариант в группе; *M* – медиана; ДИ – доверительный интервал; *p* – значимая вероятность.

Показанные существенные различия в накоплении ^{137}Cs надземной фитомассой исследуемых насаждений указывают на наличие связи глубины залегания грунтовых вод и интенсивности перехода радионуклида в элементы древесных растений. Наличие такой связи также приведено в аналогичных исследованиях на подтопленных лесных территориях [8], где отмечалось о достоверном снижении Кп ^{137}Cs для древесины сосны в 4 раза при изменении УГВ от 0,33 до 2,45 м.

Как следует из табл. 6, анализ тесноты связи Кп ^{137}Cs в древесные растения и УГВ указал на наличие высокой силы связи (r_s = −0,72–0,88; $p < 0,001$) между УГВ в меженный период и уровнями накопления ^{137}Cs в компонентах надземной фитомассы древостоев березы и сосны. При этом интенсивность перехода ^{137}Cs в компоненты фитомассы древостоев имеет обратную связь с величиной значений УГВ.

Таблица 5

Сравнительный анализ Кп ^{137}Cs в компоненты надземной фитомассы березовых насаждений при различном типе режима увлажнения почвы по U-критерию Манна – Уитни

Table 5

Comparative analysis of Cf ^{137}Cs in the components of the aboveground phytomass of birch stands under different types of soil moisture regime according to the Mann – Whitney U-test

Тип почвы по режиму увлажнения	Статистический показатель	Кп ^{137}Cs, *1E- 03 (м^2/кг) в компонент надземной фитомассы				
		кора	древесина	побеги 1-летние	ветви	листья
Автоморфная	*n*	5	5	5	5	5
	M	1,29	0,30	2,38	0,97	2,22
	ДИ$_{95\,\%}$	0,31 ÷ 1,47	0,10 ÷ 0,58	0,54 ÷ 5,38	0,41 ÷ 2,37	0,62 ÷ 4,82
Полугидроморфная	*n*	6	6	6	6	6
	M	5,02	1,62	17,00	8,51	19,08
	ДИ$_{95\,\%}$	3,98 ÷ 6,98	0,69 ÷ 2,66	10,60 ÷ 25,79	4,92 ÷ 12,76	11,74 ÷ 24,15
Автоморфная / полугидроморфная	*U-критерий*	0	0	0	0	0
	p	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Гидроморфная	*n*	19	19	19	19	19
	M	9,89	2,85	28,28	17,31	33,13
	ДИ$_{95\,\%}$	7,13 ÷ 12,43	1,97 ÷ 5,06	20,29 ÷ 49,21	11,32 ÷ 23,26	24,74 ÷ 59,01
Полугидроморфная / гидроморфная	*U-критерий*	16	15	21	18	12
	p	0,010	0,008	0,024	0,014	0,005

Таблица 6

Анализ связи коэффициентов перехода ^{137}Cs в компоненты фитомассы сосны и березы и уровней грунтовых вод в меженный период методом ранговой корреляции Спирмена

Table 6

Analysis of the relationship between the coefficients of ^{137}Cs transition into the components of pine and birch phytomass and groundwater levels during the low-water period using the Spearman rank correlation method

Статистический показатель	Компонент фитомассы деревьев сосны					
	кора	древесина	побеги однолетние	побеги двухлетние	хвоя однолетняя	хвоя двухлетняя
1	2	3	4	5	6	7
n	27	27	27	27	27	27
r_s	–0,72	–0,77	–0,87	–0,82	–0,87	–0,82
p	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
ДИ$_{95\,\%}$	–(0,45 ÷ 0,87)	–(0,54 ÷ 0,89)	–(0,72 ÷ 0,94)	–(0,63 ÷ 0,92)	–(0,72 ÷ 0,94)	–(0,63 ÷ 0,92)
Статистический показатель	Компонент фитомассы деревьев березы					
	кора	древесина	побеги однолетние		ветви	листья
1	8	9	10		11	12
n	30	30	30		30	30
r_s	–0,84	–0,87	–0,80		–0,82	–0,88
p	< 0,001	< 0,001	< 0,001		< 0,001	< 0,001
ДИ$_{95\,\%}$	–(0,68 ÷ 0,92)	–(0,73 ÷ 0,94)	–(0,61 ÷ 0,90)		–(0,64 ÷ 0,91)	–(0,75 ÷ 0,94)

Аппроксимация полученных фактических данных позволила выразить установленные зависимости накопления радионуклида в компонентах надземной фитомассы сосновых и березовых древостоев при изменении УГВ посредством экспоненциальных уравнений, коэффициенты которых приведены на рис. 1 и 2.

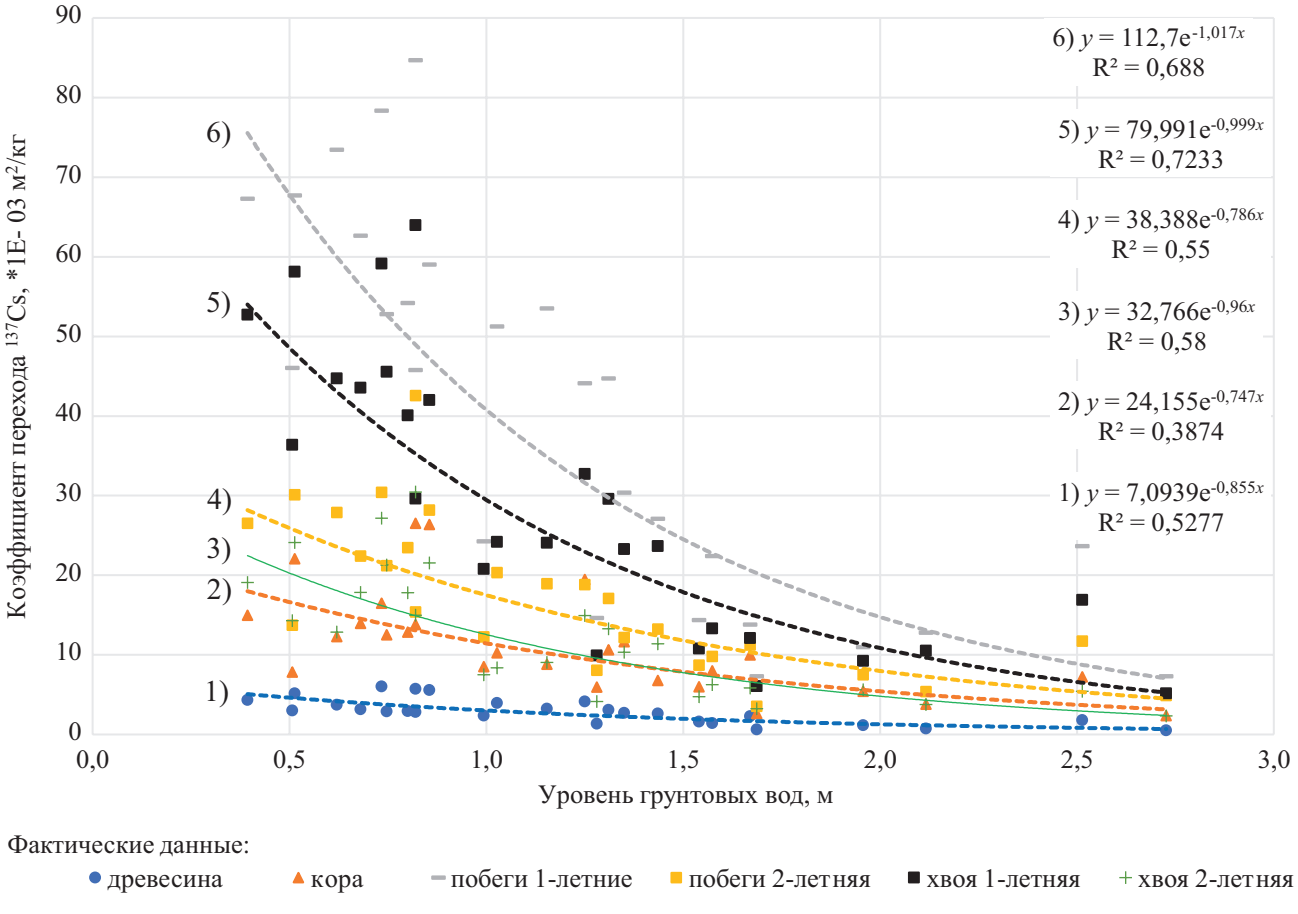


Рис. 1. Зависимость накопления ^{137}Cs в компонентах надземной фитомассы сосны от уровня грунтовых вод

Fig. 1. Dependence of ^{137}Cs accumulation in components of pine aboveground phytomass on the groundwater level

Приведенные зависимости описываются экспоненциальным выражением вида:

$$Кп\ ^{137}Cs = a \cdot e^{-b \cdot УГВ}, \quad (1)$$

где УГВ – уровень грунтовых вод в меженный период, м;

a и *b* – коэффициенты уравнения.

Отрицательный показатель степени указывает на экспоненциальное убывание, так как с увеличением УГВ накопление радионуклида снижается во всех компонентах надземной фитомассы сосны и березы. Свободный член перед экспонентой (коэффициент *a*), показывающий теоретический уровень накопления радионуклида при УГВ = 0, позволяет ранжировать компоненты в следующий ряд по убыванию параметра: элементы однолетнего прироста, элементы двухлетнего прироста, многолетние кора и древесина. Коэффициент *b*, отражающий скорость уменьшения накопления радионуклида при падении уровня вод, показывает, что быстрее всего концентрация ^{137}Cs падает в компонентах березы: от листьев (2,682) до коры (2,156), и медленнее – в компонентах сосны: от однолетних побегов (1,017) до коры (0,747).

Приведенные зависимости коэффициентов перехода радионуклида в надземную фитомассу деревьев сосны и березы (за исключением коры у сосны) от УГВ объясняют от 51 до 72 % изменчивости признака, что является высоким показателем для биологических систем.

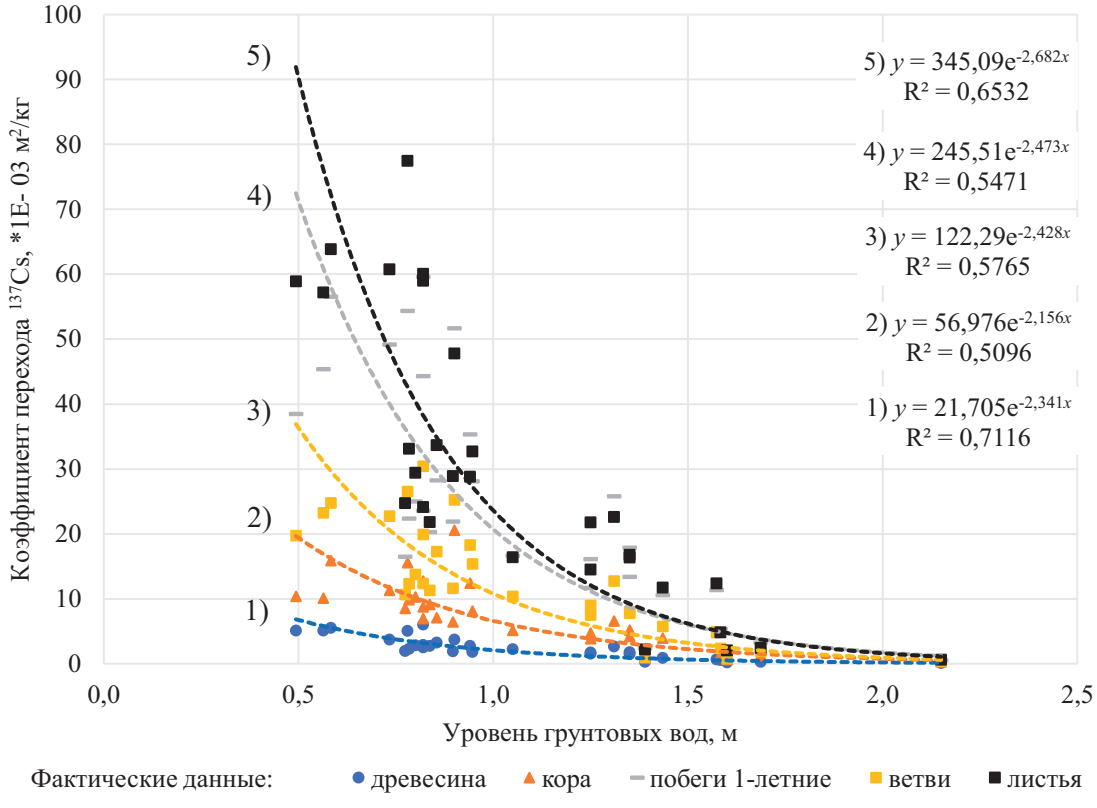


Рис. 2. Зависимость накопления ^{137}Cs в компонентах фитомассы березы от уровня грунтовых вод

Fig. 2. Dependence of ^{137}Cs accumulation in birch phytomass components on the groundwater level

Таким образом, как следует из рис. 1 и 2, наиболее высокий переход радионуклида, отмеченный у однолетних вегетативных органов, является характерным для активно растущих компонентов прироста. При этом величина Кп ^{137}Cs в компоненты березы при значениях УГВ – 0,4–0,5 м достигала различий в 1,2–2,2 раза по сравнению с сосной, что, очевидно, указывает на более высокую скорость разложения лиственного опада в отличие от хвойного при данном водном режиме почв и активное поступление подвижных форм ^{137}Cs в корнеобитаемый поверхностный слой почвы. Но если при пятикратном спаде УГВ поступление ^{137}Cs в однолетних компонентах сосны снижалось фактически в 5 раз, то в аналогичных компонентах березы это происходило значительно сильнее – на 5–7 порядков, что свидетельствует о высоком поглощении корнями березы растворенных ионов ^{137}Cs, поступающих в надземную фитомассу преимущественно с мощным транспирационным током воды, формируемым при близком залегании грунтовых вод. При снижении УГВ радионуклид переходит в фиксированное состояние, интенсивность водообмена березы понижается и ^{137}Cs становится малодоступным для ее поверхностно-разветвленной корневой системы. В отличии от березы, сосна формирует мощный стержневой корневой комплекс, способный эффективно добывать влагу из глубоких горизонтов и поэтому она менее чувствительна к колебаниям зеркала грунтовых вод.

Следует отметить, что при низких отметках УГВ (2,0–2,5 м) поступление ^{137}Cs в надземные части деревьев снижается, причем величина его перехода сопоставима с таковой для автоморфных почв.

Поскольку Кп ^{137}Cs представляет собой соотношение между удельной активностью ^{137}Cs в компоненте фитомассы деревьев и плотностью загрязнения им почвы, выражение (1) можно привести к виду:

$$А_{уд} = a \cdot Пз \cdot e^{-b \cdot УГВ}, \quad (2)$$

где $А_{уд}$ – удельная активность ^{137}Cs в компоненте фитомассы, Бк/кг;

Пз – плотность загрязнения радионуклидом, кБк/м^2.

Плотность загрязнения ^{137}Cs и УГВ являются независимыми между собой аргументами, а их величина связана с определенной (локальной) территорией и изменяется со временем. Предварительное определение данных аргументов позволяет построить прогноз содержания ^{137}Cs в компонентах фитомассы

деревьев, что представляет практический интерес для планирования лесохозяйственной деятельности на отдаленном этапе последствий радиационной аварии.

Для количественной оценки сопряженного влияния УГВ и поверхностного загрязнения ^{137}Cs почвы на его аккумуляцию в компонентах древесных растений был осуществлен множественный регрессионный анализ, в котором использованы экспериментальные данные, представленные в табл. 2 и 3. Для проведения регрессионного анализа выражение (2) было прологарифмировано:

$$ln\ (A_{уд}) = ln\ (a) + ln\ (Пз) - b \cdot УГВ. \quad (3)$$

Отметим, что для предотвращения искажения результатов регрессионного анализа, экстремальные наблюдения были исключены из модельных расчетов. Как следует из табл. 7 и 8, регрессионный анализ показал, что все построенные регрессионные модели для древесных компонентов характеризуются исключительно высокой статистической значимостью ($p < 0{,}00001$), а входящие в них предикторы вносят математически достоверный вклад в финальные показатели (p-значения для всех переменных лежат в диапазоне от 0,0279 до < 0,0001).

Таблица 7

Статистические показатели регрессионной зависимости накопления ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосны и березы от плотности загрязнения и УГВ

Table 7

Statistical indicators of the regression dependence of ^{137}Cs accumulation in the components of pine and birch phytomass on the pollution density and groundwater level

Компонент фитомассы	n	Множественный R	Множественный R^2_{adj}	Скорректированный	cc	F-критерий	p-значение	Стандартная ошибка оценки S_E
Сосна								
Древесина	25	0,876	0,768	0,747	22	36,4	<0,00001	0,332
Кора	25	0,873	0,763	0,741	22	35,4	<0,00001	0,359
Побеги однолетние	23	0,937	0,878	0,865	20	71,8	<0,00001	0,249
Побеги двухлетние	21	0,955	0,912	0,902	18	93,4	<0,00001	0,186
Хвоя однолетняя	23	0,950	0,903	0,893	20	92,8	<0,00001	0,242
Хвоя двухлетняя	25	0,898	0,807	0,790	21	46,1	0,00001	0,373
Береза								
Древесина	27	0,949	0,901	0,893	23	109,0	<0,00001	0,290
Кора	30	0,904	0,816	0,803	22	60,0	<0,00001	0,439
Побеги однолетние	27	0,877	0,770	0,751	24	40,1	<0,00001	0,413
Ветви	27	0,901	0,812	0,796	24	51,9	<0,00001	0,354
Листья	26	0,902	0,814	0,798	23	50,5	<0,00001	0,356

Построенные модели объясняют преобладающую часть вариации целевого признака. Так, в зависимости от исследуемого компонента, скорректированный коэффициент детерминации (R^2_{adj}) принимает значения: у сосны – от 0,741 (для коры) до 0,902 (для побегов двухлетних); у березы – от 0,751 (для побегов однолетних) до 0,893 (для древесины). Это свидетельствует о высокой прогностической способности полученных уравнений, обусловленных в 74,1–90,2 % случаях фактическими значениями аргументов Пз и УГВ.

Таблица 8

Параметры регрессионных моделей накопления ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосны и березы от плотности загрязнения и УГВ

Table 8

Parameters of regression models of ^{137}Cs accumulation in pine and birch phytomass components from pollution density and groundwater level

Компонент фитомассы	Предикторы	Нестандартизованный коэффициент *B*	Стандартизованный коэффициент β	*t*-критерий	*p*-значение
Сосна					
Древесина	константа	2,537 ± 0,903	–	2,81	0,0102
	ln $П_з$	0,912 ± 0,162	0,591 ± 0,105	5,63	0,0001
	УГВ	−0,918 ± 0,123	−0,780 ± 0,105	−7,43	< 0,0001
Кора	константа	2,568 ± 0,973	–	2,64	0,0149
	ln $П_з$	1,126 ± 0,173	0,684 ± 0,105	6,50	< 0,0001
	УГВ	−0,774 ± 0,122	−0,665 ± 0,105	−6,32	< 0,0001
Побеги однолетние	константа	6,75 ± 0,762	–	8,86	< 0,0001
	ln $П_з$	0,667 ± 0,136	0,392 ± 0,08	4,92	< 0,0001
	УГВ	−1,080 ± 0,093	−0,930 ± 0,08	−11,67	< 0,0001
Побеги двухлетние	константа	4,516 ± 0,57	–	7,92	< 0,0001
	ln $П_з$	0,875 ± 0,102	0,614 ± 0,071	8,61	< 0,0001
	УГВ	−0,871 ± 0,072	−0,861 ± 0,071	−12,08	< 0,0001
Хвоя однолетняя	константа	4,068 ± 0,668	–	6,09	< 0,0001
	ln $П_з$	1,073 ± 0,12	0,637 ± 0,071	8,94	< 0,0001
	УГВ	−1,081 ± 0,091	−0,848 ± 0,071	−11,90	< 0,0001
Хвоя двухлетняя	константа	2,427 ± 1,031	–	2,35	0,0279
	ln $П_з$	1,196 ± 0,184	0,616 ± 0,095	6,50	< 0,0001
	УГВ	−0,982 ± 0,123	−0,759 ± 0,095	−8,01	< 0,0001
Береза					
Древесина	константа	5,201 ± 0,742	–	7,01	< 0,0001
	ln Пз	0,594 ± 0,132	0,294 ± 0,065	4,51	0,0002
	УГВ	−2,139 ± 0,146	−0,952 ± 0,065	−14,61	< 0,0001
Кора	константа	4,507 ± 0,881	–	5,12	< 0,0001
	ln Пз	0,914 ± 0,158	0,489 ± 0,084	5,80	< 0,0001
	УГВ	−2,240 ± 0,218	−0,867 ± 0,084	−10,29	< 0,0001
Побеги однолетние	константа	5,393 ± 1,181	–	4,57	0,0001
	ln Пз	0,919 ± 0,201	0,449 ± 0,098	4,57	0,0001
	УГВ	−1,804 ± 0,246	−0,721 ± 0,098	−7,35	< 0,0001
Ветви	константа	5,259 ± 1,012	–	5,20	< 0,0001
	ln Пз	0,83 ± 0,172	0,427 ± 0,089	4,82	< 0,0001
	УГВ	−1,809 ± 0,211	−0,763 ± 0,089	−8,59	< 0,0001
Листья	константа	5,561 ± 1,033	–	5,38	< 0,0001
	ln Пз	0,925 ± 0,174	0,480 ± 0,09	5,32	< 0,0001
	УГВ	−1,841 ± 0,233	−0,714 ± 0,09	−7,91	< 0,0001

Сравнительный анализ стандартизованных коэффициентов регрессии (β) позволил выявить ключевые закономерности отклика древесной растительности на изменение УГВ. Во всех исследованных компонентах фитомассы сосны и березы фактор УГВ показал строго отрицательную связь с удельной активностью

^{137}Cs при максимальном уровне статистической значимости ($p < 0{,}0001$), что доказывает: депрессия (углубление) водоносного горизонта выступает универсальным экологическим фактором, лимитирующим корневое поступление ^{137}Cs в надземные органы деревьев.

Установлено, что береза обладает значительно более высокой чувствительностью к изменению УГВ по сравнению с сосной. Для всех компонентов фитомассы березы фактор УГВ является доминирующим предиктором, достигая максимума в древесине ($\beta = -0{,}952$), где его регуляторный вклад более чем в 3 раза превышает влияние плотности загрязнения почвы. Высокая зависимость аккумуляции радионуклида березой от фактора УГВ обусловлена ее биологическими свойствами как интенсивного транспиратора при произрастании на почвах полугидроморфного и гидроморфного ряда.

Для сосны характерно избирательное распределение влияния гидрологического фактора. УГВ выступает ведущим предиктором для наиболее физиологически активных, молодых органов: однолетних побегов ($\beta = -0{,}930$) и однолетней хвои ($\beta = -0{,}848$). По мере старения органов (переход к двухлетней хвое и побегам), а также в скелетных фракциях (древесина, кора) приоритет стремиться и переходит (в случае коры) к почвенному загрязнению, однако модуль $\beta_{УГВ}$ во всех моделях сосны удерживает стабильно высокие значения (от −0,665 до −0,780). Данный факт свидетельствует, что гидрологический режим корнеобитаемой зоны служит ключевым синергетическим фактором, определяющим интенсивность корневого выноса ^{137}Cs в надземные органы деревьев вне зависимости от их видовой специфики.

Для определения содержания ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосновых и березовых насаждений, произрастающих на полугидроморфных и гидроморфных почвах, в зависимости от уровня грунтовых вод меженного периода и изменяющейся по истечении времени плотности загрязнения ^{137}Cs, в полученные регрессионные уравнения была введена функция радиоактивного распада. В результате, модельные уравнения приведены к следующему виду:

• *для сосны*

– древесина: $$A_{уд} = 12{,}644 \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot П_з^{0{,}912} \cdot e^{-0{,}918 \cdot УГВ}; \quad (4)$$

– кора: $$A_{уд} = 13{,}045 \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot П_з^{1{,}126} \cdot e^{-0{,}774 \cdot УГВ}; \quad (5)$$

– побеги однолетние: $$A_{уд} = 854{,}063 \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot П_з^{0{,}667} \cdot e^{-1{,}08 \cdot УГВ}; \quad (6)$$

– побеги двухлетние: $$A_{уд} = 91{,}445 \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot П_з^{0{,}875} \cdot e^{-0{,}871 \cdot УГВ}; \quad (7)$$

– хвоя однолетняя: $$A_{уд} = 58{,}451 \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot П_з^{1{,}074} \cdot e^{-1{,}081 \cdot УГВ}; \quad (8)$$

– хвоя двухлетняя: $$A_{уд} = 11{,}328 \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot П_з^{1{,}196} \cdot e^{-0{,}982 \cdot УГВ}; \quad (9)$$

• *для березы*

– древесина: $$A_{уд} = 181{,}403 \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot П_з^{0{,}594} \cdot e^{-2{,}139 \cdot УГВ}; \quad (10)$$

– кора: $$A_{уд} = 90{,}662 \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot П_з^{0{,}914} \cdot e^{-2{,}24 \cdot УГВ}; \quad (11)$$

– побеги однолетние: $$A_{уд} = 219{,}929 \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot П_з^{0{,}919} \cdot e^{-1{,}804 \cdot УГВ}; \quad (12)$$

– ветви: $$A_{уд} = 192{,}325 \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot П_з^{0{,}83} \cdot e^{-1{,}809 \cdot УГВ}; \quad (13)$$

– листья: $$A_{уд} = 260{,}149 \cdot e^{-\lambda \cdot t_i} \cdot П_з^{0{,}925} \cdot e^{-1{,}841 \cdot УГВ}, \quad (14)$$

где λ – постоянная радиоактивного распада ^{137}Cs, равная 0,02298 год$^{-1}$;

t_i – время, прошедшее с момента определения плотности загрязнения ^{137}Cs в почве (i = 0; 1; 2; …), лет.

Проверка корректности модельных уравнений проводилась при радиационном обследовании сосняков черничного типа леса в Чечерском спецлесхозе. Их возраст составлял 85–115 лет, а плотность загрязнения ^{137}Cs – от 4,05 до 15,07 Ки/км^2. Водный режим в исследованных насаждениях характеризовался колебаниями УГВ в начале сентября от 1,8 м и ниже. Для оценки различий расчетных и фактических данных по содержанию ^{137}Cs в древесине сосны использовался t-критерий Стьюдента для зависимых выборок. Как следует из рис. 3, статистический анализ показал, что достоверные различия, между расчетными и фактическими значениями $A_{уд}$ ^{137}Cs отсутствуют ($p = 0{,}093$). Относительное расхождение данных составило 11,1 %, что, очевидно, является удовлетворительным результатом, так как находится в пределах относительной погрешности измерений.

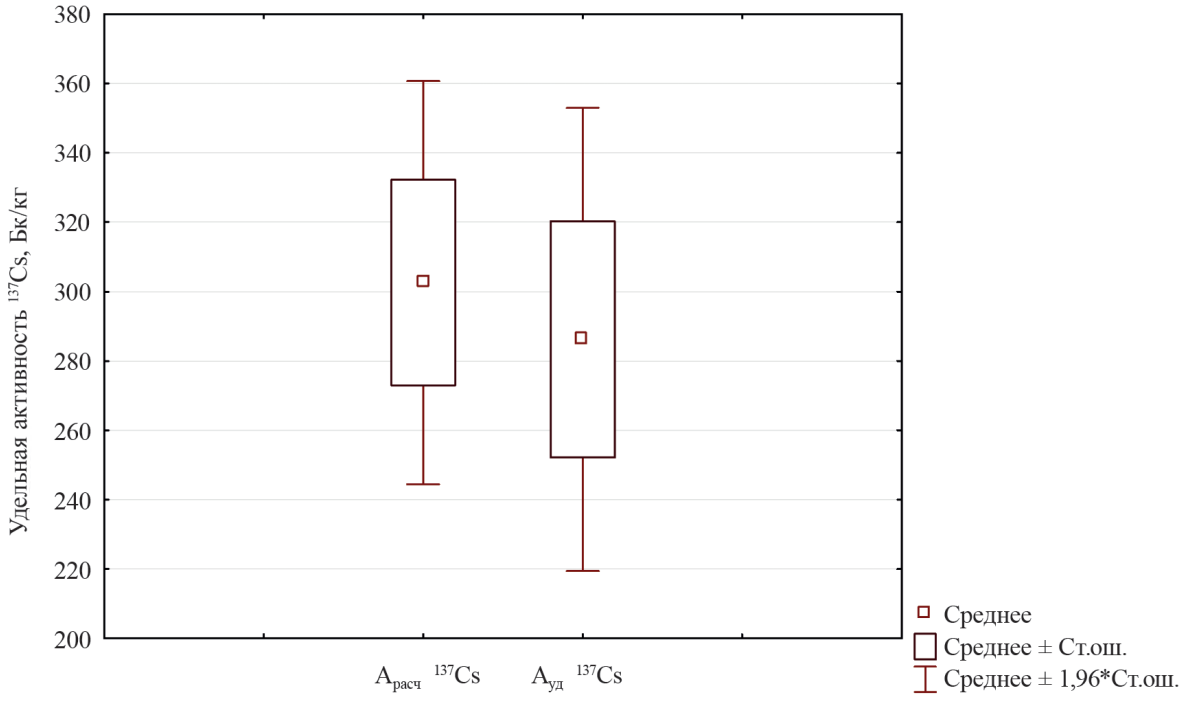


Рис. 3. Статистическое сравнение расчетных и фактических данных по содержанию ^{137}Cs в древесине сосновых насаждений в Чечерском спецлесхозе

Fig. 3. Statistical comparison of calculated and actual data on the content of ^{137}Cs in the wood of pine stands in the Chechersk special forestry enterprise

Таким образом, построенные модели (4–14) являются пригодными для прогноза удельной активности ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосны и березы от показателей глубины залегания грунтовых вод в меженный период и плотности загрязнения почвы радионуклидом. Приведенные модельные уравнения рекомендуется использовать для определения радиоактивного загрязнения древостоев при радиационном обследовании участков леса на полугидроморфных и гидроморфных почвах.

Заключение

В настоящее время, по истечении четырех десятилетий после чернобыльских выпадений, наиболее стабильными по интенсивности корневого поступления ^{137}Cs в системе «почва–растение» являются полугидроморфные и гидроморфные (торфяно-болотные) почвы, в которых, по сравнению с автоморфными, особенности почвообразовательных процессов приводят к высокой подвижности и биологической доступности ^{137}Cs для деревьев.

При исследовании распределения ^{137}Cs в древесных растениях в зависимости от УГВ выявлено, что интенсивность накопления радионуклида в компонентах фитомассы сосновых и березовых насаждений, произрастающих на почвах с разной степенью ее гидроморфизма, существенно различается. При этом, уровни перехода ^{137}Cs в компоненты фитомассы древостоев березы и сосны тесно коррелируют (r_s = −0,72–0,88; p < 0,001) с УГВ в меженный период.

Выявленная закономерность позволила количественно оценить влияние ключевого фактора (плотности загрязнения) на поступление ^{137}Cs в древесные растения при разном залегании грунтовых вод. Проведенный в связи с этим регрессионный анализ показал, что содержание радионуклида статистически значимо (значения p-факторов для всех переменных лежат в диапазоне от 0,00279 до < 0,0001) зависит от плотности загрязнения и УГВ, при этом поступление ^{137}Cs в компоненты однолетнего прироста сосны и во все компоненты березы более отзывчиво на изменение УГВ, превосходя влияние плотности загрязнения почвы по силе в 1,5–3,2 раза в березняках и в 1,3–2,4 раза в сосняках. В многолетних компонентах сосны (древесина, кора, хвоя двухлетняя) ^{137}Cs накапливается в большей степени за счет плотности загрязнения им почвы, хотя влияние УГВ также стабильно высокое.

Полученные регрессионные зависимости содержания ^{137}Cs в древесных компонентах от УГВ и плотности загрязнения радионуклида обладают высокой прогностической способностью (p < 0,00001) и описывают 74,1–90,2 % общей дисперсии удельной активности ^{137}Cs в надземной фитомассе сосновых и березовых насаждений.

В результате исследований разработаны модельные уравнения для прогноза удельной активности ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосны и березы от показателей глубины залегания грунтовых вод, плотности загрязнения почвы радионуклидом и промежутка времени с момента её определения, позволяющие на отдаленном этапе последствий радиационной аварии проводить оценку радиоактивного загрязнения ^{137}Cs в древесине приспевающих и спелых сосновых и березовых насаждений при проведении предварительного радиационного обследования лесосек на 95%-м доверительном уровне.

Библиографические ссылки

1. Щеглов АИ. *Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах*. В: *По материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС.* Москва: Наука; 2000. 268 с.

2. Ипатьев ВА, Багинский ВФ, Булавик ИМ, и др. *Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации*. Гомель: Институт леса НАН Беларуси; 1999. 451 с.

3. Переволоцкий АН. *Распределение ^{137}Cs в лесных биогеоценозах.* Гомель: Институт радиологии; 2006. 255 с.

4. Булко НИ, Шабалева МА, Козлов АК. Особенности поведения ^{137}Cs в сосновых насаждениях разных типов леса на территории западного следа аварии на ЧАЭС. *Веснік Мазырскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта імя І. П. Шамякіна.* 2009;2(23):3–14.

5. Булко НИ, Митин НВ, Шабалева МА. *Особенности миграции ^{137}Cs в почвах частично мелиорированных радиоактивно загрязненных насаждений.* В: *Проблемы лесоведения и лесоводства. Сборник научных трудов Института леса НАН Беларуси. Выпуск 53*. Гомель: Институт леса НАН Беларуси; 2001. с. 143–146.

6. Ипатьев ВА. *Водный режим и потребление элементов питания в мелиорированных сосновых фитоценозах*. Минск: Навука і тэхніка; 1990. 127 с.

7. Ипатьев ВА, Митин НВ, Булко НИ. Влияние уровня грунтовых вод на содержание радионуклидов в поверхностном слое лесных гидроморфных почв. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2000;44(3):81–83.

8. Переволоцкая ТВ, Булавик ИМ, Переволоцкий АН. О влиянии подтопления на распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесном биогеоценозе. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2009;49(3):291–301.

References

1. Shheglov AI. *Biogeohimija tehnogennyh radionuklidov v lesnyh jekosistemah.* V: *Po materialam 10-letnih issledovanij v zone vlijanija avarii na ChAJeS* [Biogeochemistry of technogenic radionuclides in forest ecosystems. In: Based on 10-year research in the area affected by the Chernobyl accident]. Moscow: Nauka; 2000. 268 p. Russian.

2. Ipat'ev VA, Baginskij VF, Bulavik IM, et al. *Les. Chelovek. Chernobyl'. Lesnye jekosistemy posle avarii na Chernobyl'skoj AJeS: sostojanie, prognoz, reakcija naselenija, puti reabilitacii* [Forest. Human. Chernobyl. Forest ecosystems after the Chernobyl accident: state, forecast, population response, rehabilitation pathways]. Gomel: Institut lesa NAN Belarusi; 1999. 451 p. Russian.

3. Perevolockij AN. *Raspredelenie ^{137}Cs v lesnyh biogeocenozah* [Distribution of ^{137}Cs in forest biogeocenoses]. Gomel: RNIUP «Institut radiologii»; 2006. 255 p. Russian.

4. Bulko NI, Shabaleva MA, Kozlov AK. *Osobennosti povedenija ^{137}Cs v sosnovyh nasazhdenijah raznyh tipov lesa na territorii zapadnogo sleda avarii na ChAJeS* [Features of ^{137}Cs behavior in pine stands of different forest types in the western trace of the Chernobyl accident]. *Vesnik Mazyrskaga dzjarzhaunaga pedagagichnaga universiteta imja I. P. Shamjakina*. 2009;2(23):3–14. Russian.

5. Bulko NI, Mitin NV, Shabaleva MA. *Osobennosti migracii ^{137}Cs v pochvah chastichno meliorirovannyh radioaktivno zagrjaznennyh nasazhdenij* [Features of ^{137}Cs migration in soils of partially reclaimed radioactively contaminated stands]. In: *Problemy lesovedenija i lesovodstva. Sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa NAN Belarusi. Vypusk 53.* Gomel: Institut lesa NAN Belarusi; 2001. p. 143–146. Russian.

6. Ipat'ev VA. *Vodnyj rezhim i potreblenie jelementov pitanija v meliorirovannyh sosnovyh fitocenozah* [Water regime and nutrient uptake in reclaimed pine phytocenoses]. Minsk: Navuka i tjehnika; 1990. 127 p. Russian.

7. Ipat'ev VA, Mitin NV, Bulko NI. *Vlijanie urovnja gruntovyh vod na soderzhanie radionuklidov v poverhnostnom sloe lesnyh gidromorfnyh pochv* [Influence of groundwater level on radionuclide content in the surface layer of forest hydromorphic soils]. *Doklady Nacionalnoj akademii nauk Belarusi.* 2000;44(3):81–83. Russian.

8. Perevolockaja TV, Bulavik IM, Perevolockij AN. *O vlijanii podtoplenija na raspredelenie ^{137}Cs i ^{90}Sr v lesnom biogeocenoze* [On the influence of flooding on the distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest biogeocenosis]. *Radiacionnaja biologija. Radiojekologija.* 2009;49(3):291–301. Russian.

Статья поступила в редколлегию 17.04.2026.
Received by editorial board 17.04.2026.