

УДК 574.4.5:539.16.047

© 2009

ИТОГИ МНОГОЛЕТНИХ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ЗОНЕ ЖИДКИХ СБРОСОВ БЕЛОЯРСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

И.В. Молчанова, Е.Н. Караваева, Л.Н. Михайловская

Россия, г. Екатеринбург, Институт экологии растений и животных УрО РАН

Приведены данные многолетнего мониторинга радиоэкологического состояния Ольховской болотно-речной экосистемы, испытывающей воздействие жидких сбросов Белоярской атомной электростанции (БАЭС) в период эксплуатации энергоблоков с реакторами различного типа. Мониторинг включал слежение за содержанием радионуклидов в воде и донных отложениях Ольховского болота, в истоке и устье р. Ольховки, в акватории р. Пышмы вверх и вниз по течению от места слияния их вод, а также в приболотных гидроморфных почвах. В настоящее время, когда на БАЭС функционирует один энергоблок с реактором на быстрых нейтронах, содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в водной компоненте экосистемы составляет десятые доли Бк/л и на порядок превышает контрольный уровень. Отмечено также резкое снижение степени загрязненности болотных и речных донных отложений. Содержание основного загрязнителя ^{137}Cs в илистых донных отложениях болота не превышает 5,0–6,0 кБк/кг, а на обследованном участке р. Пышмы – 0,4 кБк/кг. В донных отложениях болота и истока р. Ольховки обнаружено повышенное, по сравнению с фоновым, содержание плутония, максимальная удельная активность которого (10,5 Бк/кг) приурочена к началу болота. В составе водного стока в открытую гидрографическую сеть в весенне-летний период поступает около 380 МБк долгоживущих радионуклидов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Белоярская атомная электростанция, один из крупных ядерных объектов Уральского региона, расположена вблизи таких городов, как Екатеринбург и Асбест. Первая очередь БАЭС состояла из двух энергоблоков с водографитовыми реакторами, введенных в эксплуатацию в 1964 и 1967 гг. В 1969 г. они достигли проектной мощности 300 МВт, а к 1989 г. – выведены из эксплуатации. Вторая очередь БАЭС включает энергоблок на быстрых нейтронах БН-600, который был пущен в 1980 г. и эксплуатируется до настоящего времени. Функционирование ядерного, потенциально опасного объекта требует пристального слежения за состоянием окружающей среды в зоне его воздействия. В отношении Белоярской АЭС в таком слежении с 1978 г. принимают участие сотрудники Института экологии растений и животных УрО РАН [1–3]. При этом особое внимание уделяется обследованию природных экосистем в зоне жидких

сбросов БАЭС. Одна из них, Ольховская болотно-речная экосистема, расположена в 5-ти км к юго-востоку от атомной станции. Многолетний сброс слаборадиоактивных дебалансных вод в природную экосистему с высокой сорбционной емкостью привел к формированию зоны с повышенным содержанием радионуклидов. Наиболее значимые из них – долгоживущие радионуклиды ^{90}Sr , ^{137}Cs , а также изотопы плутония. После вывода из эксплуатации энергоблоков первой очереди (1989 г.) сброс радионуклидов с дебалансными водами резко сократился, однако вероятность поступления плутония в окружающую среду возросла в связи с реализацией программы перехода БАЭС на использование уран-плутониевого топлива, принятой в 1989 г. [4].

В настоящей работе систематизированы данные мониторинговых исследований Ольховской болотно-речной экосистемы: оце-

нена динамика накопления и перераспределения радионуклидов в основных ее компонентах; выявлена роль стоковых процессов в переносе излучателей из накопительного депо (донные отложения) в зону транзита.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Ольховская болотно-речная экосистема включает низинное торфяное болото площадью около 30 га с прилегающими к нему заболоченными участками. В болото выведен сбросной канал, по которому БАЭС сбрасывает слаборадиоактивные дебалансные воды. Центральная часть болота занята торфянистыми образованиями, чередующимися с толщами илистых отложений. Наиболее интенсивное осадкообразование наблюдается в месте контакта сбросных вод АЭС и болота. В растительном покрове преобладают осоково-рогозовые и осоково-березовые фитоценозы. В береговой зоне болота распространены смешанные березово-ольховые травянистые леса, произрастающие на бурых, лесных почвах с разной степенью оторфованности и оглеенности. Из болота вытекает р. Ольховка общей протяженностью 3,5 км (рис. 1). Река Ольховка впадает в

р. Пышму – составную часть Обь-Иртышской речной системы. В ходе многолетнего радиоэкологического мониторинга 30 км зоны БАЭС было проведено ранжирование обследованной территории по уровню радионуклидного загрязнения [5]. Ольховская болотно-речная экосистема отнесена к импактной зоне, мониторинг которой включает слежение за содержанием радионуклидов в воде и донных отложениях различных участков болота, в истоке и устье р. Ольховки, в р. Пышме вниз и вверх по течению от места впадения в нее р. Ольховки, а также в приболотных гидроморфных почвах. При этом, участок реки, расположенный вверх по течению и не испытывающий влияния загрязненных вод, условились считать контрольным. Пробы воды (20–40 л) фильтровали от крупных взвесей, подкисляли, выпаривали и прокаливали при $t = 400-450$ °С. Донные отложения из болота, отбирали торфоразведочным буром типа ТБГ-1 до глубины 30 см. В реках отбор проб проводили на ту же глубину вручную, приурочивая его к мелководьям и заводям. В непосредственной близости от Ольховского болота отбирали пробы гидроморфных почв. Содержание ^{137}Cs в отобранных образцах определяли на многоканальном гамма-анализаторе с

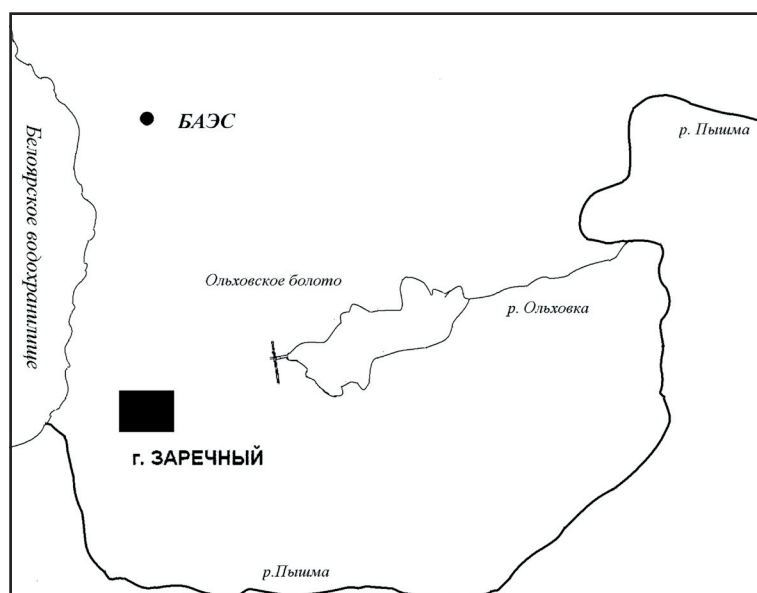


Рис. 1. Схема района исследований

германиевым полупроводниковым детектором фирмы “Canberra Packard” (США) с пределом обнаружения 0,1 Бк. Статистическая ошибка измерений – не более 15 %. Содержание ^{90}Sr определяли радиохимическим методом по ^{90}Y . Для радиометрии препаратов использовали установку УФМ-2000 (предел обнаружения 0,2 Бк). Содержание изотопов плутония в пробах также определяли радиохимическим методом, включающим их выделение на ионообменной смоле и электролитическое осаждение. Измерение проводили на спектрометре типа Alpha Analyst с полупроводниковыми детекторами (PIPS) и программным обеспечением GENIE-2000. Нижний предел определения составлял 0,001 Бк.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для удобства изложения материала многолетние мониторинговые наблюдения были разбиты на три периода. Первый охватывал 1978–1988 гг., когда Ольховская болотно-речная экосистема испытывала периодическое воздействие трех энергоблоков БАЭС. Второй период (1989–1991 гг.) характеризовался выводом из эксплуатации первой очереди БАЭС;

третий период наблюдений (1992 г. – по настоящее время) включает оценку современного радиоэкологического состояния исследуемой экосистемы, испытывающей воздействие третьего энергоблока станции БН-600.

В табл. 1 приведены данные, отражающие динамику содержания радионуклидов в воде болотно-речной экосистемы в разные периоды. Так, в 1978–1988 гг. среднее содержание ^{90}Sr на участке “болото-устье р. Ольховки” удерживалось на уровне, близком к 1 Бк/л. Оно снижалось до 0,2 Бк/л на 0,5 км отрезке р. Пышмы вниз по течению. Сравнение этой величины с контрольным значением выявляет их близкое совпадение. Среднее содержание ^{137}Cs в воде болота и р. Ольховки составляло 16 Бк/л; оно на порядок снижалось в воде р. Пышмы. Вывод из эксплуатации первой очереди БАЭС мало сказался на содержании в воде ^{90}Sr ; удельная активность этого радионуклида в болотной и речной воде по-прежнему варьировала около 1 Бк/л и снижалась до 0,4 и 0,1 Бк/л в воде р. Пышмы вниз и вверх по течению, соответственно. Практически то же самое справедливо и для ^{137}Cs . Его средняя удельная активность в воде на участке “болото – р. Ольховка” состав-

Таблица 1

Удельная активность радионуклидов в воде Ольховской болотно-речной экосистемы в разные периоды наблюдений, Бк/л

Место отбора проб	^{90}Sr			^{137}Cs		
	Период наблюдений					
Болото:	1	2	3	1	2	3
начало	0,8 (0,1–1,6)*	1,3 (1,0–1,6)	0,2 (0,1–0,3)	16,6 (2,3–49,2)	8,4 (2,0–10,6)	0,05 (0,03–0,08)
середина	0,9 (0,1–1,7)	1,2 (0,7–1,2)	0,3 (0,2–0,4)	20,7 (4,1–43,4)	17,0 (9,9–24,1)	0,2 (0,1–0,3)
р. Ольховка:						
исток	0,8 (0,2–2,5)	1,0 (0,8–1,1)	0,5 (0,2–1,4)	16,0 (9,7–35,0)	11,6 (4,7–20,2)	0,3 (0,1–0,5)
устье	0,4 (0,2–1,0)	0,5 (0,2–1,0)	0,3 (0,1–0,7)	10,0 (2,4–16,0)	7,9 (4,1–17,9)	0,2 (0,1–0,6)
р. Пышма:						
0,5 км вниз по течению	0,2 (0,1–0,3)	0,35 (0,04–0,5)	0,1 (0,06–0,1)	1,3 (0,1–4,4)	0,5 (0,16–0,9)	0,2 (0,1–0,2)
0,5 км вверх по течению (контроль)	0,1 (0,1–0,2)	0,08 (0,03–0,1)	0,03 (0,01–0,04)	0,2 (0,1–0,4)	0,1 (0,08–0,15)	0,05 (0,03–0,08)

Примечание: * – здесь и в табл. 2 и 3 в скобках приведен разброс значений по годам.

ляла 11,2 Бк/л, а в воде р. Пышмы – 0,5–0,1 Бк/л. На современном этапе исследований, когда в эксплуатации находится лишь третий блок станции, наблюдается ясно выраженное снижение уровня загрязнения водной компоненты экосистемы. Средняя удельная активность ^{90}Sr во всех точках опробования колеблется в пределах 0,2–0,5 Бк/л, что на порядок выше контрольного значения. Особенно отчетливо наблюдаемое явление выражено для ^{137}Cs , содержание которого в воде исследуемой экосистемы удерживается на уровне десятых долей Бк/л. Подобный эффект может быть связан, наряду с изменением технологии сбросов БАЭС, с высокой способностью ^{137}Cs сорбироваться донными отложениями.

Известно, что сорбционная способность грунтов зависит от их гранулометрического и химического состава. Как правило, в водных, квазиравновесных экосистемах, эти образования удерживают до 90 % радионуклидов в расчете от их общего содержания [6–10]. Динамика удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs в грунтах Ольховской болотно-речной экосистемы в разные периоды наблюдений приведена в табл. 2. Результаты многолетних исследований донных отложений, отобранных на разном расстоянии от места сброса дебалансных вод БАЭС, выявили высокую вариабельность содержания радионуклидов в зависимости от года наблюдений; в ряде случаев она достигала порядка величин. Основным загрязнителем грунтов обследуемой экосистемы является ^{137}Cs . В период с 1978 по 1991 г. его содержание в грунтах на участке “начало болота – устье р. Ольховки” составляло десятки кБк/кг, в то время как в контроле (грунты р. Пышмы до слияния с р. Ольховкой) оно не превышало десятых долей кБк/кг.

Обращает внимание резкое снижение содержания ^{137}Cs в грунтах на современном этапе исследований. За счет естественного распада за 30-летний период наблюдений, при условии отсутствия дополнительного поступления загрязнителя в болото, можно было ожидать двукратного различия в его содержании в крайних временных точках. Анализ представленных данных выявляет, как правило, 3-10-кратное снижение содержания ^{137}Cs в донных отложениях. То же самое справедливо и для ^{90}Sr . Отметим, что в настоящее время по мере удаления от места сброса дебалансных вод БАЭС на участке

“болото – исток р. Ольховки”, прослеживается тенденция к увеличению удельной активности радионуклидов в илистых отложениях, отражающая смещение фронта загрязнения в направлении вектора стока (табл. 2).

Особый интерес представляют данные, характеризующие современный уровень содержания изотопов плутония в грунтах исследуемой экосистемы (табл. 3). Видно, что максимальное содержание $^{238-240}\text{Pu}$ (10,5 Бк/кг) зарегистрировано в донных отложениях начала болота. Оно постепенно снижалось по вектору стока вплоть до истока р. Ольховки. Вклад р. Ольховки в загрязнение донных отложений р. Пышмы изотопами плутония в настоящее время практически не прослеживается; содержание в них $^{238-240}\text{Pu}$ не превышает 0,1 Бк/кг. В донных отложениях болотно-речной экосистемы величина отношения $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ варьирует в пределах 0,15–0,75. Известно, что в глобальных выпадениях эта величина составляет 0,02–0,03 [11]. Существенное ее отклонение в сторону более высоких значений свидетельствует о поступлении плутония из других источников. В нашем случае таковым являются жидкие сбросы БАЭС. Ранее нами было показано, что действительно вклад БАЭС в загрязнение донных отложений Ольховской болотно-речной экосистемы изотопами плутония составляет 64–93 % [12].

Разгрузка депонированных в болоте радионуклидов осуществляется в транзитное звено “р. Ольховка – р. Пышма”, которое является составной частью Обь-Иртышской речной системы. Исток реки Ольховки – своеобразный триггер, запускающий транспорт геохимического материала в составе водного стока реки из депонирующего компонента в зону рассеяния. Учитывая снижение содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в донных отложениях болота на современном этапе исследований, оценили вклад в него стоковых процессов. С этой целью определили объем водного стока в истоке р. Ольховки в половодье и меженный период. Отметим, что согласно проведенным наблюдениям период весеннего половодья с высокой водой не превышал 10 дней, а летняя межень продолжалась три месяца. В середине этих периодов отбирали пробы воды (40 л), фильтровали их через фильтр “белая лента” выделяя, таким образом, твердую компоненту. Как видно из табл. 4, в половодье через

Таблица 2

Удельная активность радионуклидов в 0–30 см слое донных отложений Ольховской болотно-речной экосистемы в разные периоды наблюдений, кБк/кг сухой массы

Место отбора проб	Донные отложения	⁹⁰ Sr			¹³⁷ Cs		
		Период наблюдений					
		1	2	3	1	2	3
Болото:							
начало	ил	1,80 (0,48–3,80)	0,55 (0,23–1,20)	0,03 (0,01–0,05)	58,0 (9,0–110,0)	28,2 (4,5–64,7)	1,5 (0,6–2,3)
середина	ил	1,20 (0,07–3,40)	0,36 (0,26–0,48)	0,12 (0,07–0,17)	27,0 (7,2–65,0)	18,3 (10,0–26,7)	2,4 (0,5–4,3)
р. Ольховка							
исток	ил песок	0,19 (0,06–0,87)	0,30 (0,21–0,50)	0,22 (0,12–0,36)	30,0 (8,0–51,0)	20,0 (4,6–36,2)	5,9 (4,8–6,0)
		0,03 (0,02–0,15)	0,06 (0,04–0,17)	0,02 (0,01–0,03)	20,0 (10,0–30,0)	15,2 (10,0–20,8)	4,2 (3,5–5,5)
устье	ил песок	0,14 (0,01–0,24)	0,07 (0,04–0,15)	0,02 (0,01–0,03)	34,0 (7,0–86,0)	17,0 (9,5–30,8)	4,9 (3,0–6,2)
		0,06 (0,01–0,17)	0,05 (0,02–0,06)	–	16,0 (3,0–26,0)	13,0 (6,5–21,0)	–
р. Пышма							
0,5 км вниз по течению	ил песок	0,02 (0,01–0,04)	0,02	<0,01	3,0 (0,15–3,90)	3,0 (1,1–6,4)	0,4 (0,2–0,5)
		0,01 (0,01–0,03)	0,01	<0,01	0,21 (0,15–0,33)	0,4 (0,2–0,8)	0,01
0,5 км вверх по течению (контроль)	ил песок	0,02 (0,01–0,03)	0,01	<0,01	0,37 (0,10–0,97)	0,10 (0,07–1,2)	0,02 0,01
		0,01 (0,01–0,02)	0,01	<0,01	0,09 (0,03–0,20)	0,03 (0,04–0,20)	0,01

исток р. Ольховки в единицу времени перемещается масса воды в 6 раз большая, чем в меженный период. В то же время за каждый наблюдаемый период через створ реки проходят приблизительно одинаковые массы воды. В отношении твердого стока имеет место обратная картина. За 10 дней половодья из болота выносятся в 3 раза больше взвешенного твердого вещества по сравнению с летней меженью.

В жидкой и твердой составляющих стока определили содержание ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ (табл. 5). Видно, что удельная активность радионуклидов в жидкой компоненте стока на порядки величин ниже, чем в твердой. При этом как в половодье, так и в летнюю межень удельная активность радионуклидов в твердой компоненте убывает в ряду: $^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr} > ^{239,240}\text{Pu}$. Такое обогащение радионуклидами мелкодисперсного материала согласуется с классическими представлениями об их подвижности в двухфазной системе (твердая-жидкая), а также отражает их общее содержание в компонентах обследованной болотно-речной экосистемы [13–16]. На основании имеющихся параметров стока и удельных активностей радионуклидов в его компонентах рассчитали суммарный вынос загрязнителей из Ольховского болота (табл. 6). Видно, что основное количество ^{90}Sr переносится в водорастворимом состоянии в составе жидкого стока. То же самое справедливо и для $^{239,240}\text{Pu}$. Аналогичные данные получены в работе [17] при изучении миграции ^{90}Sr с водным стоком р. Течи. Вынос ^{137}Cs в период половодья более или менее равномерно распределяется по компонентам стока, а в летнюю межень, когда происходит разгрузка воды от взвесей, он перемещается в основном в водорастворимом состоянии. В результате в период весеннего паводка и летней межени в открытую гидрографическую сеть выносятся примерно 380 МБк всех трех радионуклидов, что составляет 0,01 % от рассчитанного нами ранее запаса в донных отложениях Ольховского болота ($3,7 \cdot 10^{12}$ Бк). В целом на современном этапе вклад стоковых процессов в очищение донных отложений болота невелик. Вероятно, в предыдущие годы, при более высоком уровне загрязнения компонентов болота, он был более значимым. Кроме того, определенную роль в снижении содержания радионуклидов играют не учтенные нами миг-

рационные потоки загрязнителей в различных биогеоценотических и трофических звеньях.

Накопленные в болоте радионуклиды, помимо их миграции в открытую гидрографическую сеть, включаются в процессы рассеяния и поступают в сопредельный почвенный покров. Долговременные наблюдения показали, что в 1980–90-е гг. содержание радионуклидов в приболотных почвах (на удалении 5–10 м от болота) на разном расстоянии от места сброса дебалансных вод не превышало 2,0 и 65,0 кБк/кг для ^{90}Sr и ^{137}Cs , соответственно. На современном этапе имеет место дифференциация в содержании радионуклидов в обследованных приболотных почвах; запас ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ в них возрастает в направлении от начала болота к истоку р. Ольховки (рис. 2). Это коррелирует с отмеченным выше смещением фронта загрязнения донных отложений (табл. 2). В результате со временем происходит перераспределение радиационной нагрузки на живые и косные компоненты Ольховской болотно-речной экосистемы.

Таким образом, результаты многолетнего слежения за радиоэкологическим состоянием природных экосистем показали, что они испытывали максимальный прессинг жидких сбросов в 1980–90-е гг., когда одновременно эксплуатировались три энергоблока БАЭС. В настоящее время наблюдается ясно выраженное снижение содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в водной компоненте и донных отложениях Ольховского болота. Отмечено также снижение содержания основного загрязнителя (^{137}Cs) в донных отложениях р. Ольховки и участка р. Пышмы, сопряженных с болотом общим водным стоком. В то же время обнаружено, что в донных отложениях болота и начала р. Ольховки величина отношения $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ варьирует в пределах 0,15–0,75. Существенное отклонение этих величин от аналогичных в глобальных выпадениях свидетельствует о вкладе жидких сбросов БАЭС в загрязнение изотопами плутония донных отложений Ольховского болота. За весенне-летний период из болота в открытую гидрографическую сеть поступает около 380 МБк радионуклидов, располагающихся по интенсивности выноса в ряду: $^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr} > ^{239,240}\text{Pu}$. В приболотных почвах и донных отложениях болота имеет место смещение фронта загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr по

Таблица 3

Удельная активность изотопов плутония в 0-5 см слое илистых донных отложений Ольховской болотно-речной экосистемы, Бк/кг сухой массы

Место отбора проб	²³⁸⁻²⁴⁰ Pu	²³⁸ Pu	^{239,240} Pu	²³⁸ Pu/ ^{239,240} Pu
Болото:				
начало	10,5 (1,5–21,6)	4,5 (0,7–8,9)	6,0 (0,7–12,8)	0,75
середина	5,2 (0,8–9,3)	0,7 (0,1–0,9)	4,5 (0,7–8,9)	0,15
р. Ольховка:				
исток	3,6 (1,3–10,4)	2,0 (0,9–8,9)	3,1 (1,3–12,0)	0,64
устье	–*	0,2 (0,1–0,2)	0,5 (0,4–0,6)	0,40

Примечание. * – нет данных.

Таблица 4

Характеристика водного стока

Период	Компонент стока			
	Жидкий		Твердый	
	м ³ /мин	м ³ /период	кг/мин	кг/период
Половодье	15,6	2,2x10 ⁵	1,38	19,9x10 ³
Межень	2,4	3,2x10 ⁵	0,042	5,7x10 ³

Таблица 5

Удельная активность радионуклидов в компонентах водного стока

Радионуклид	Компонент стока			
	Жидкий, Бк/л		Твердый, Бк/кг	
	Половодье	Межень	Половодье	Межень
⁹⁰ Sr	0,25	0,11	206,0	790,0
¹³⁷ Cs	0,60	0,10	5460,0	1420,0
^{239,240} Pu	0,001	0,001	1,5	17,1

Таблица 6

Вынос радионуклидов из Ольховского болота с водным стоком, МБк

Радионуклид	Жидкий сток		Твердый сток		Всего за год
	Половодье	Межень	Половодье	Межень	
⁹⁰ Sr	55,0	35,6	4,1	4,5	99,20
¹³⁷ Cs	132,0	32,4	108,7	8,0	281,10
^{239,240} Pu	0,22	0,32	0,03	0,10	0,67

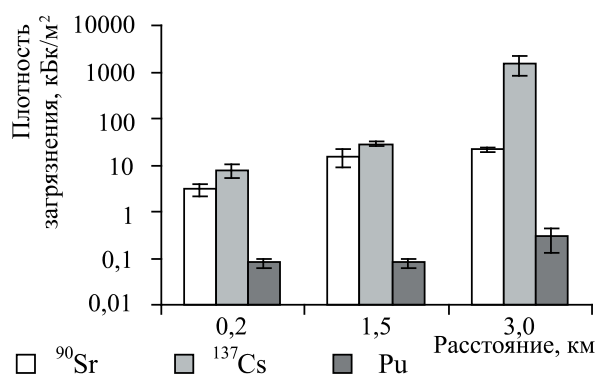


Рис. 2. Плотность загрязнения радионуклидами почв береговой зоны Ольховского болота на разном удалении от места сброса дебалансных вод

вектору стока, что приводит к перераспределению радиационной нагрузки на компоненты обследованных природных экосистем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 07-05-00171.

ЛИТЕРАТУРА

- Куликов Н.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Радиоэкология почвенно-растительного покрова. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 172 с.
- Чеботина М.Я., Трапезников А.В., Куликов Н.В., Трапезникова В.Н., Радиоэкологические исследования Белоярского водохранилища. – Свердловск, 1992. – 80 с.
- Трапезников А.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Трапезникова В.Н. Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах. – Екатеринбург: УрГУ, 2007. – Т. 1. – 479 с. – Т. 2 – 399 с.
- Сараев О.М., Ошканов Н.Н., Мальцев В.В. Перспективы безопасной утилизации плутония в виде МОКС-топлива на Белоярской АЭС // Материалы Российско-Американских Слушаний: Утилизация плутония: проблемы и решения. – Екатеринбург, 2000. – С. 57–59.
- Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н. Радиоэкологические исследования почвенно-растительного покрова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 89 с.
- Тимофеева-Ресовская Е.А. Распределение радиоизотопов по основным компонентам пресноводных водоемов. – Свердловск: УФ АН СССР, 1963. – 78 с.
- Сафронова Н.Г., Питкянен Г.Б. Миграция долгоживущих радионуклидов в грунтах непроточных водоемов // Теоретические и практические аспекты действия малых доз ионизирующих излучений. – Сыктывкар, 1973. – С. 162–163.
- Куликов Н.В., Чеботина М.Я. Радиоэкология пресноводных биосистем. – Свердловск, 1988. – 129 с.
- Трапезников А.В., Чеботина М.Я., Трапезникова В.Н. и др. Влияние АЭС на радиоэкологическое состояние водоема-охлаждителя. – Екатеринбург, 2008. – 399 с.
- Страховенко В.Д., Щербов Б.Л., Маликова И.Н. Сравнительный анализ распределения естественных и искусственных радионуклидов в озерных экосистемах различных регионов Сибири // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Мат. III междунар. конф. – Томск, 2009. – С. 556–562.
- Трансурановые элементы в окружающей среде / Под ред. У.С. Хэнсон. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 342 с.
- Михайловская Л.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Радионуклиды в компонентах экосистем зоны жидких сбросов Белоярской АЭС // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. – Екатеринбург, 2005. – Вып. 7. – С. 150–165.
- Тимофеев-Ресовский Н.В., Титлянова А.А., Махонина Г.И. и др. Поведение радиоактивных изотопов в системе почва-раствор // Радиоактивность почв и методы ее определения. – М., 1966. – С. 46–80.
- Павлоцкая Ф.И. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. – М.: Атомиздат, 1974. – 215 с.
- Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Эколого-геохимические аспекты миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 161 с.
- Алексахин Р.М. Проблемы радиоэкологии. Эволюция идей. Итоги. – М.: Россельхозакадемия, 2006. – 880 с.
- Мокров Ю.Г. Полуэмпирическая модель переноса стронция-90 с водами р. Теча // Вопросы радиац. безопасности. – 1996. – № 3. – С. 19–27.