

УДК 574::539.1.04:58.051

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАПОВЕДНИКА И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2011 г. Л. Н. Михайловская^{1*}, И. В. Молчанова¹, Е. Н. Караваяева¹,
В. Н. Позолотина¹, О. В. Тарасов²

¹ Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург

² Федеральное Государственное унитарное предприятие Производственное объединение “Маяк”, Озерск

Изучены уровни загрязнения и пространственное распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвенном покрове Восточно-Уральского государственного заповедника и сопредельных территорий. Заповедник, расположенный в Челябинской области, представляет собой “головную” часть Восточно-Уральского радиоактивного следа, образовавшегося в 1957 г. в результате аварии на производственном объединении “Маяк”. В пределах обследованной территории содержание радионуклидов в почвах снижается по экспоненциальному закону по мере удаления от источника загрязнения. Основным загрязнителем центральной части заповедника (97% от суммарного загрязнения) остается ^{90}Sr , поступивший в почвенный покров в результате аварии 1957 г. На территории, сопредельной с западной границей заповедника, вклад этой аварии в радиоактивное загрязнение уменьшается до 67%, что приводит к снижению радиационной нагрузки на объекты окружающей среды. К востоку от границы заповедника загрязнение почв сформировано в значительной степени за счет ^{137}Cs , поступившего в результате ветрового сдува донных отложений с берегов оз. Карачай (1967 г.). Отмечено обогащение лесных подстилок этим радионуклидом, обусловленное его поступлением в составе современных атмосферных выпадений.

Ядерные аварии, загрязненные территории, пространственное распределение радионуклидов, запасы радионуклидов в почвах.

В результате радиационной аварии 1957 г. на Производственном объединении “Маяк” была загрязнена обширная территория (23000 км²), названная Восточно-Уральским радиоактивным следом (ВУРС). В аварийных выбросах среди долгоживущих радионуклидов преобладал ^{90}Sr . Позднее, в 1967 г. на эту зону наложилось загрязнение, обусловленное ветровым сдувом радиоактивных донных отложений оз. Карачай — технологического водоема ПО “Маяк”. Основным загрязнителем донных отложений являлся ^{137}Cs . Вблизи эпицентра аварии на территории с высоким уровнем загрязнения в 1966 г. был создан Восточно-Уральский государственный заповедник — ВУГЗ. За годы, прошедшие после аварии, на его территории выполнены различные по тематике радиоэкологические исследования, получены уникальные данные, как в научном, так и в практическом плане [1–5]. Заповедник общей площадью 16616 га до сих пор является полигоном, на котором разрабатываются технологии специального природопользования. В настоящее время интегральные запасы ^{90}Sr в его почвенном покрове со-

ставляют 571.2×10^{12} Бк, а ^{137}Cs — 66.1×10^{12} Бк [6]. Такие количества долгоживущих радионуклидов превращают заповедник в источник вторичного радионуклидного загрязнения сопредельных территорий.

Цель работы состояла в изучении пространственного распределения радионуклидов в почвенном покрове ВУГЗа и сопредельных территорий, а также в оценке вклада двух радиационных инцидентов в их загрязнение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Исследованиями, проводимыми в 2003–2009 гг., была охвачена южная часть ВУГЗа и его окрестности. Обследованная территория расположена в лесостепной зоне на высокой предгорной равнине Зауральского пенеблена, рельеф которой характеризуется общим понижением с запада на восток. В данном регионе преобладают западный, юго-западный и северо-западный ветры. Наземные экосистемы представлены в основном березовыми, и смешанными (сосново-березовыми) лесами, частично суходольными лугами и залежами; в почвенном покрове преобладают серые лесные и дерново-подзолистые почвы [7].

* Адресат для корреспонденции: 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202, ИЭРиЖ УрО РАН; тел.: (34377) 3-20-70; e-mail: molchanova_i_v@mail.ru.

Таблица 1. Удельная активность радионуклидов в компонентах наземных экосистем (центральная трансекта)

Компонент	^{90}Sr , кБк/кг		^{137}Cs , кБк/кг		$^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$
	воздушно-сухая масса	зола	воздушно-сухая масса	зола	
Лесная подстилка	4–914	15–6950	0.2–5.6	0.9–42.3	16–232
Почва, 0–5 см	4–300	–	0.9–19.6	–	4–22
Надземная масса растений:					
древесных	9–209	324–10460	0.1–0.9	5.5–25.0	31–5000
травянистых	4–227	63–3400	0.07–1.8	0.7–25.8	60–1533

В ходе проведения работ было заложено три трансекты протяженностью 15 км каждая. Центральная трансекта (1) – совпадала с осью следа, а западная (2) и восточная (3) – проходили вдоль соответствующих границ заповедника (рис. 1). В пределах выделенных трансект, в основных типах экосистем на разном удалении от эпицентра аварии выделяли реперные участки, однородные по мезорельефу. На каждом участке закладывали по 3–6 почвенных разрезов, располагая их в вершинах равносторонних треугольников с длиной стороны 10 м. Содержание радионуклидов в пробах почв, отобранных по такой схеме, представительного характеризует территорию площадью 0.01 км² [8]. Общее содержание радионуклидов в 50-сантиметровом почвенном слое, включая лесную подстилку, нормированное на площадь, условно называли запасом [9].

Все пробы высушивали до воздушно-сухого состояния, а затем озоляли при $t = 450^\circ\text{C}$. Содержание ^{90}Sr определяли радиохимическим методом [10] с использованием малофоновой радиометрической установки типа УМФ-2000 (Россия) или на бета-спектрометре с программным обеспечением “Прогресс” (Россия). Нижний предел обнаружения составляет 0.2 и 0.7 Бк соответственно. Погрешность методов не превышала 20%.

Содержание ^{137}Cs в образцах определяли на сцинтилляционном гамма-спектрометре с программным обеспечением “Прогресс” и многоканальном анализаторе фирмы Canberra-Packard (США) с германиевым полупроводниковым детектором. Нижние пределы обнаружения для этих спектрометров составляют 3.0 и 0.1 Бк соответственно, а ошибка счета не превышает 15%.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных исследований показали, что в пределах центральной оси следа ^{90}Sr является основным загрязнителем (рис. 2). Максимальный его запас в непосредственной близости от южной границы заповедника достигает 95×10^3 кБк/м² и снижается более чем на порядок

величин на расстоянии 15–20 км. Аналогичный характер пространственного распределения наблюдается и для ^{137}Cs . Его запас в почве по мере увеличения расстояния изменяется от 2.6×10^3 до 1.5×10^2 кБк/м². На всем протяжении центральной трансекты величина отношения запасов ^{90}Sr и ^{137}Cs ($^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$) в почве варьирует незначительно и в среднем составляет 33.2 ± 1.8 .

На сопредельной территории к западу от границы заповедника ^{90}Sr остается основным загрязнителем, его запас в почве значительно ниже 50–12 кБк/м². Отметим, что и в этом случае величина отношения $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ не изменяется с расстоянием и в среднем составляет 2.7 ± 0.3 . К востоку от границы заповедника уровень загрязнения почвенного покрова ^{90}Sr примерно в 2 раза, а ^{137}Cs в 6 раз выше, чем на западном участке. Запас ^{90}Sr в почвах этой трансекты составляет 117–25 и ^{137}Cs 136–20 кБк/м², а отношение $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ независимо от расстояния варьирует в пределах 0.4–2.1.

Высокий уровень содержания ^{90}Sr , достигающий десятков и сотен кБк на кг сухого вещества, отмечен и для различных компонентов растительного покрова изученных экосистем в зоне центральной трансекты (табл. 1). При сгорании органических материалов уровень загрязнения золы возрастает на 1–2 порядка величин. Величина отношения удельных активностей ^{90}Sr и ^{137}Cs в компонентах экосистем варьирует в широких пределах от 4 до 5000, его максимальное значение наблюдается в надземной массе древесных растений (усредненные пробы, включающие мелкие и крупные ветки, листья).

Штатные газоаэрозольные выбросы ПО “Маяк” загрязняют почвенно-растительный покров в зоне влияния на протяжении более 50 лет. Технологии, используемые на предприятии, а значит и состав выбросов, с течением времени неоднократно изменялись [4], поэтому определить их вклад в загрязнение обследованной территории очень сложно. По имеющимся в литературе данным в настоящее время в выбросах ПО “Маяк” долгоживущие радионуклиды представлены преимущественно ^{137}Cs , а основное направление ветрового переноса аэрозолей в зоне влияния пред-

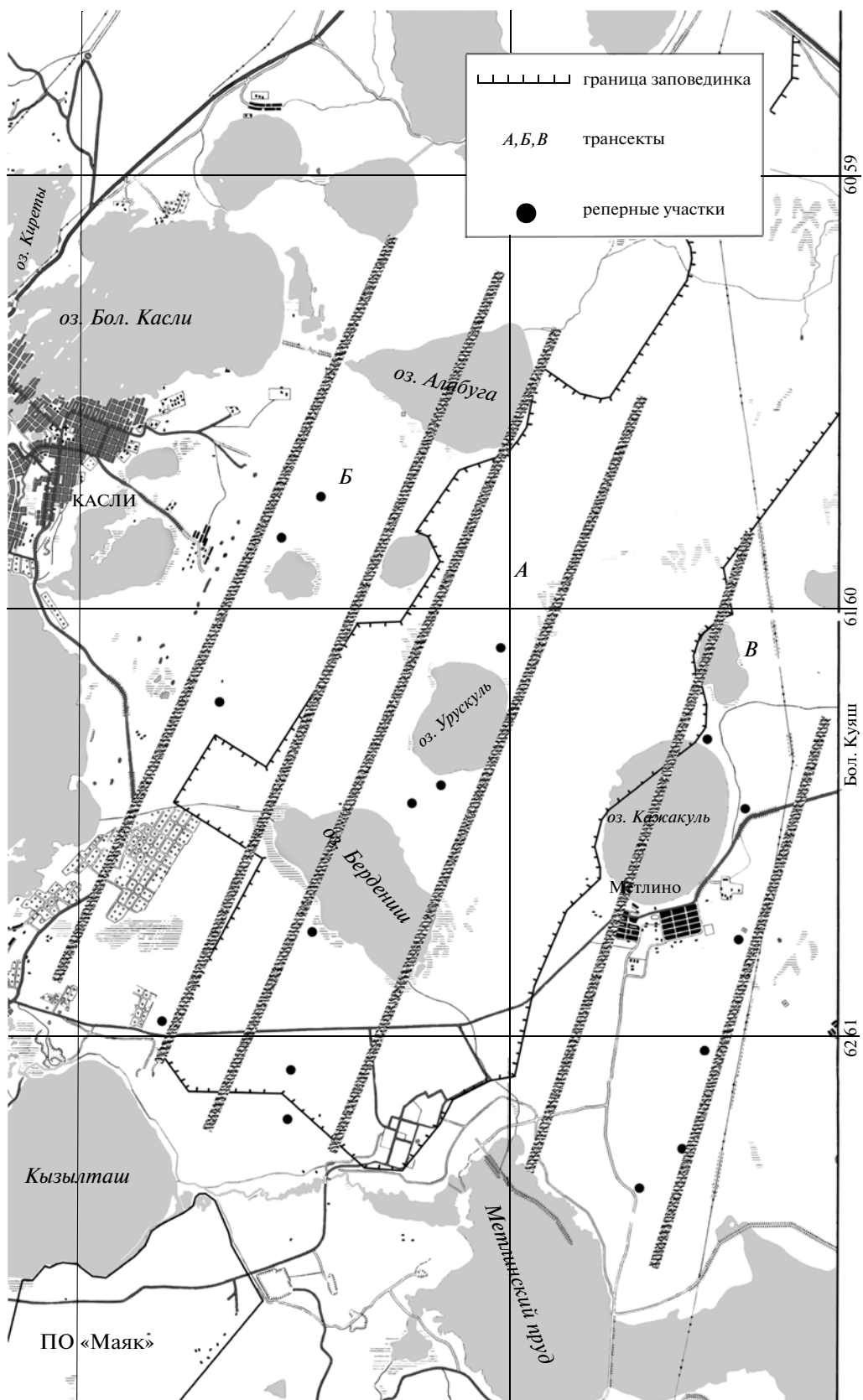


Рис. 1. Схема обследованного района

приятая – восточное, юго-восточное и северо-восточное [11]. Учитывая это обстоятельство, мы попытались оценить вклад современных выбросов ПО “Маяк” по уровню загрязнения лесных подстилок. Исследования проводили на лесных участках, близких к западной и восточной границам ВУРСа, идентичных по составу растительных сообществ и почвенно-экологическим условиям. Они были сосредоточены вблизи г. Касли и н.п. Метлино, на одинаковом расстоянии от ПО “Маяк”. Результаты проведенных исследований показали, что среднее содержание ^{90}Sr в лесных подстилках западной трансекты составляет 500 Бк/м^2 , а на восточной – в 2.5 раза больше (табл. 2). Примерно также различается и уровень загрязнения почв ^{90}Sr на этих же участках.

В лесных подстилках восточной трансекты запас ^{137}Cs в 25 раз превышает таковой для западных участков, в то время как уровень загрязнения почв различается только в 9 раз. Об относительном обогащении лесных подстилок ^{137}Cs свидетельствует и изменение величины отношения $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$.

Для количественной оценки вкладов двух событий в загрязнение обследованной территории использовали радионуклидные отношения, характеризующие выпадения, и величины запасов радионуклидов на реперных участках. Ранее было установлено, что в аварийных выпадениях 1957 г. величина отношения $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ составляла 71.0, а в загрязненных донных отложениях береговой зоны оз. Карачай – 0.3 [12]. Решая систему уравнений с использованием приведенных отношений, рассчитали вклад 2-х аварий в загрязнение ^{90}Sr и ^{137}Cs почвенного покрова каждой трансекты:

$$x + y = a, \quad (1)$$

$$v + p = b, \quad (2)$$

$$-71x + v = 0, \quad (3)$$

$$-0.3y + p = 0, \quad (4)$$

где x – ^{137}Cs , v – ^{90}Sr , поступившие в ходе аварии 1957 г. (кБк/м^2); y – ^{137}Cs , p – ^{90}Sr , принесенные с донными отложениями оз. Карачай (кБк/м^2); a – суммарное содержание ^{137}Cs , b – ^{90}Sr в местах отбора проб (кБк/м^2). Более подробно расчеты

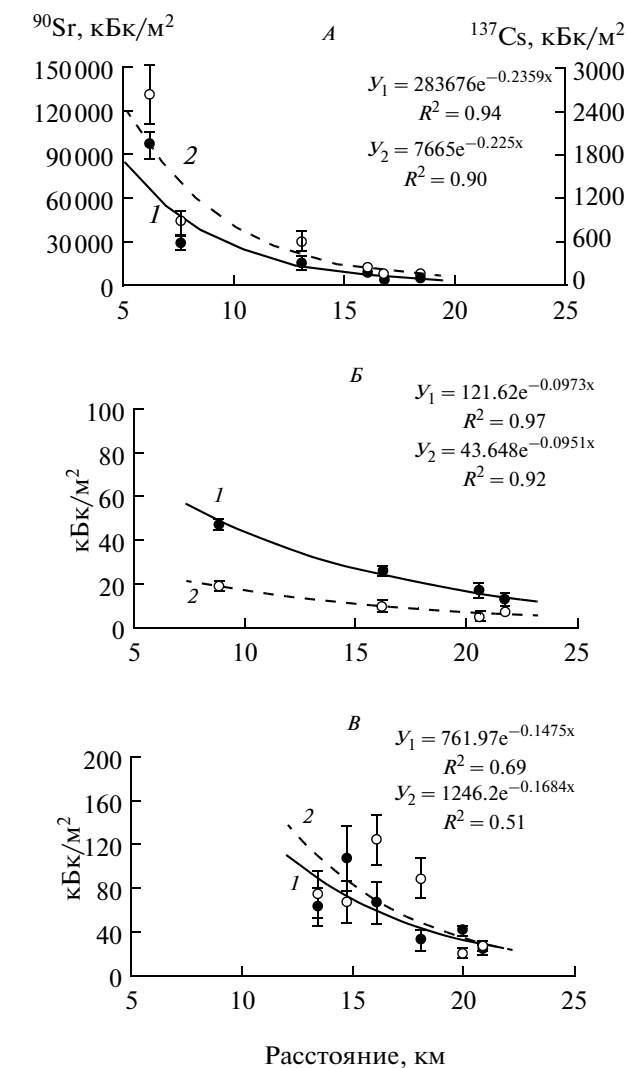


Рис. 2. Пространственное распределение ^{90}Sr (1) и ^{137}Cs (2) в почвенном покрове обследованной территории. Трансекты: А – центральная, Б – западная, В – восточная.

вклада различных источников в радиоактивное загрязнение почв приведены в работе [12]. При расчетах учитывали уровень глобального фона, а для восточной трансекты еще и примерный вклад газоаэрозольных выбросов ПО “Маяк”.

Таблица 2. Содержание радионуклидов в лесной подстилке и в верхнем 15-сантиметровом слое почв сопредельных с ВУГЗ территорий

Образец	Трансекта	^{90}Sr , кБк/м^2	^{137}Cs , кБк/м^2	$^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$
А 0	Западная	0.50 ± 0.37	0.020 ± 0.005	25.0 ± 10.9
	Восточная	1.20 ± 0.30	0.50 ± 0.10	2.4 ± 0.8
А 0–15 см	Западная	18.60 ± 4.50	8.90 ± 3.40	2.1 ± 0.4
	Восточная	58.30 ± 13.30	81.70 ± 21.80	0.7 ± 0.2

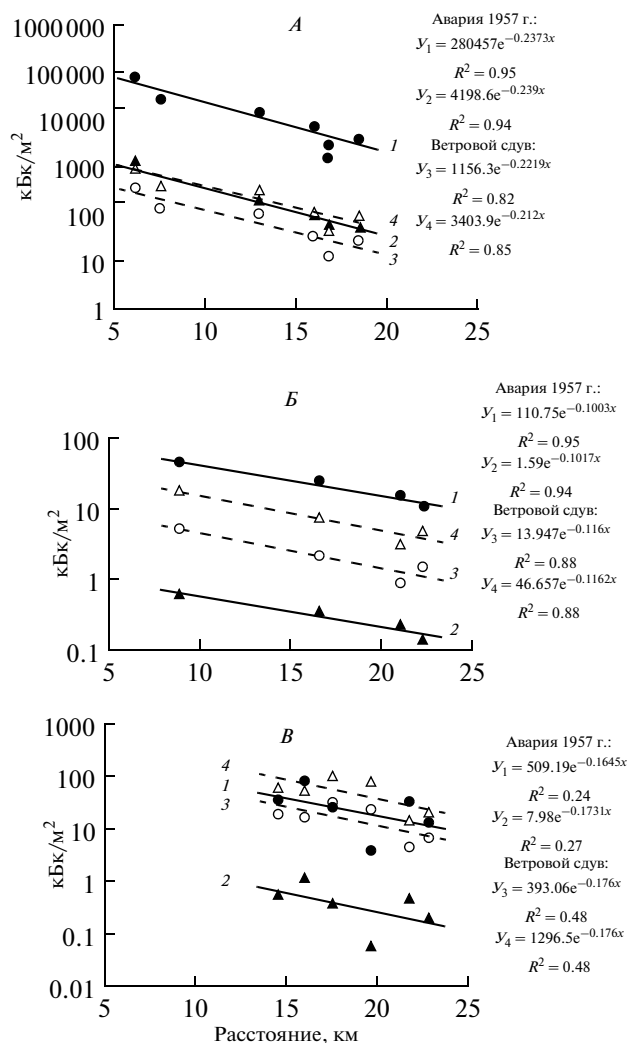


Рис. 3. Вклад двух аварий в загрязнение почвенного покрова обследованной территории. Трансекты: А – центральная, Б – западная, В – восточная; 1 – ^{90}Sr и 2 – ^{137}Cs выпадений аварии 1957 г.; 3 – ^{90}Sr и 4 – ^{137}Cs донных отложений оз. Карачай.

Как и следовало ожидать, основной вклад в радионуклидное загрязнение центральной трансекты внесли аварийные выпадения 1957 г., представленные преимущественно ^{90}Sr (рис. 3). Загрязнение ^{137}Cs в равной степени сформировано обоими инцидентами. Аварийные выпадения ^{90}Sr остаются преобладающим источником загрязнения участков, сопредельных с западной границей заповедника. На эти участки ^{137}Cs поступил преимущественно в составе “Карачаевских” выпадений. Однотипный характер распределения свидетельствует о сходных условиях формирования загрязнения почвенного покрова центральной и западной трансект.

На восточных участках наблюдается высокая неоднородность распределения радионуклидов.

По-видимому, загрязнение аварийными выпадениями территории восточной трансекты произошло иначе, чем центральной и западной. Оно сформировалось не только в ходе аварии 1957 г., но и в результате пространственного перераспределения радионуклидов. После аварии интенсивная воздушная миграция радиоактивных аэрозолей, слабо закрепленных на поверхности почв и растительности, наблюдалась преимущественно в направлении господствующих ветров.

На основании полученных данных рассчитали средний вклад двух источников в радиоактивное загрязнение обследованной территории. На центральной трансекте доля аварии 1957 г. составляет 97%, на западной – 67%, а на восточной – 31% в расчете от суммарного содержания радионуклидов в почвах. Ветровой перенос донных отложений оз. Карачай прибавил к этому загрязнению 3, 26 и 63% соответственно. Вклад глобальных выпадений и штатных выбросов ПО “Маяк” в загрязнение территории заповедника очень мал по сравнению с аварийными (<0.1%), а на сопредельных территориях не превышает 7%.

ОБСУЖДЕНИЕ

Спустя 50 лет после аварии в пределах центральной оси следа и на сопредельной территории к западу от границы заповедника ^{90}Sr остается основным загрязнителем почвенно-растительного покрова. По мере удаления от эпицентра аварии наблюдается закономерное снижение запаса радионуклидов в почвенном покрове, которое с высокой степенью достоверности описывается экспоненциальными уравнениями, приведенными на рис. 2. К востоку от границы заповедника пространственное распределение обоих радионуклидов характеризуется высокой неоднородностью, хотя оно и аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, ее достоверность значительно ниже, чем для центральной и западной трансект.

Отмеченные особенности пространственного распределения радионуклидов указывают на сложный характер формирования загрязнения. В нем наряду с глобальными выпадениями принимают участие штатные выбросы ПО “Маяк”; наибольший вклад внесли аварийные выпадения и ветровой сдув донных отложений с берегов оз. Карачай; определенное влияние оказывают процессы пространственно-временного перераспределения радионуклидов.

Использование лесных подстилок при оценке вклада штатных выбросов ПО “Маяк” обусловлено в первую очередь их свойствами. Они представляют собой органогенные образования, формирующиеся в результате разложения опада растений и характеризующиеся высокой сорбционной спо-

способностью по отношению к микроколичествам загрязнителей. В почвенном профиле лесные подстилки выделяют как слой-индикатор, в котором суммируется содержание загрязнителей растительного покрова, поступивших корневым и аэральным путями. Повышение содержания ^{137}Cs в лесных подстилках восточной трансекты непропорционально увеличению уровня загрязнения почв и может быть вызвано дополнительным его поступлением из атмосферы в составе штатных выбросов ПО “Маяк” [11]. В районе н.п. Метлино за счет суммарного вклада этих выбросов запас радионуклидов увеличивается не менее, чем в 2 раза по сравнению с фоновым уровнем, сформированным глобальными выпадениями из атмосферы, который в этих широтах для ^{90}Sr составляет 1.5 кБк/м², а для ^{137}Cs – 2.4 кБк/м² [12].

Процессы ветрового переноса загрязненного материала с территории заповедника не выражены столь отчетливо. В противном случае они привели бы к загрязнению лесных подстилок сопредельной территории преимущественно ^{90}Sr . В исследованиях, проводимых ранее, также было показано, что именно ^{90}Sr характеризуется в десятки раз более высокими величинами коэффициентов накопления и перехода в травянистые растения, чем ^{137}Cs [6]. Высокое содержание этого радионуклида в золе органических компонентов экосистем обуславливает повышение ветрового переноса радионуклидов по направлению господствующих ветров во время природных пожаров, периодически возникающих на территории заповедника [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пространственное распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвенном покрове обследованной территории отражает сложный характер формирования загрязнения. Это является следствием поступления радионуклидов из двух источников, при этом в одном случае основным загрязнителем был ^{90}Sr , а в другом – ^{137}Cs . Определенный вклад вносят современные выбросы в атмосферу ПО “Маяк”. В настоящее время территория заповедника загрязнена преимущественно (95.7%) ^{90}Sr аварийных выпадений 1957 г. В пределах западной трансекты имеет место относительное снижение радиационной нагрузки за счет ^{90}Sr и увеличение ее за счет ^{137}Cs , поступившего в почву в составе “Карачаевских” выпадений. К востоку от ВУГЗа загрязнение почв сформировано ветровым переносом донных отложений оз. Карачай, а лесные подстилки обогащены ^{137}Cs в результате современных штатных выбросов ПО “Маяк”.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 09-М-24-2001 в проекте поддержки междисциплинарных фундаментальных исследований УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антропова З.Г., Белова Е.И., Дибобес И.К. и др. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана / Под ред. А.И. Бурназяна. М.: Энергоатомиздат, 1990. 145 с.
2. Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале. / Под ред. В.Е. Соколова, Д.А. Криволицкого. М.: Наука, 1993. 336 с.
3. Чуканов В.Н., Баженов А.В., Вараксин А.Н. и др. Восточно-Уральский радиоактивный след (Свердловская область) / Под ред. В.Н. Чуканова. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 167 с.
4. Подтесов Г.Н., Аклеев А.В., Бакуров А.С. и др. Челябинская область: ликвидация последствий радиационных аварий / Под ред. А.В. Аклеева. Челябинск: Южно-Уральское книжное изд-во, 2006. 344 с.
5. Тарасов О.В. // Опыт преодоления последствий техногенных аварий и развитие атомных технологий: Матер. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию аварии на ПО “МАЯК”. Челябинск, 2007. С. 126–133.
6. Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др. Современное состояние наземных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа: уровни загрязнения, биологические эффекты. Екатеринбург: Гощицкий, 2008. 203 с.
7. Комплексный доклад о состоянии окружающей среды Челябинской области в 2004 г. / Под ред. Г.Н. Подтесова. Челябинск, 2005. 319 с.
8. Алексахин Р.М., Васильев А.В., Дикарев В.Г. и др. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1991. 400 с.
9. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н. Радиоэкологические исследования почвенно-растительного покрова. Екатеринбург, 2006. 89 с.
10. Цветаева Н.Е., Филлин И.В., Иванова Л.А. и др. // Атом. энергия. 1984. Вып. 57 (2). С. 114–117.
11. Бакуров А.С., Шейн Г.П., Аксенов Г.М., Ровный С.И. // Опыт преодоления последствий техногенных аварий и развитие атомных технологий: Матер. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию аварии на ПО “МАЯК”. Челябинск, 2007. С. 8–25.
12. Aarkrog A., Dahlgaard H., Nielsen S.P. et al. // Sci. Total Environ. 1997. V. 201. P. 137–154.
13. Ровный С.И., Куценогий К.П., Тарасов О.В., Бакуров А.С. // Пробл. биогеохимии и геохимической экологии. 2010. № 1 (12). С. 1–6.

Поступила в редакцию
31.08.2010

Radioecological Investigation of the Soil Cover of Eastern Urals State Radioactive Reserve and Neighboring Areas

L. N. Mikhaylovskaya¹, I. V. Molchanova¹, E. N. Karavaeva¹,
V. N. Pozolotina¹, O. V. Tarasov²

¹ *Institute of Plant and Animal Ecology, Urals Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620144 Russia;
e-mail: molchnova_i_v@mail.ru*

² *Productions Association "Mayak", Ozyersk*

The contamination levels and spatial distribution of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in the soil cover of the Eastern Ural State Radioactive Reserve and neighboring areas have been studied. Situated in the Chelyabinsk region, the Reserve embraces the frontal part of the Eastern Urals Radioactive Trace. This Trace emerged in 1957 as a result of the nuclear accident at the Production Association "Mayak". In the studied areas, the content of radionuclides in soils decreases exponentially as the distance from the source of contamination increases. ⁹⁰Sr received by the soil cover as a result of the accident in 1957 has remained the main contaminant of the Reserve central part (97% of the total contamination). Its contribution throughout western neighboring areas reduces up to 67%, which decreases the effect of ⁹⁰Sr on the environment. Within eastern neighboring areas, soil is mainly contaminated by ¹³⁷Cs received as a result of the wind disseminated dried sediments from the shores of Lake Karachay (1967) that was used for dumping high-level radioactive waste. Also observed was enrichment of forest litters with this radionuclide due to current atmospheric fallout.