

УДК: 574.577.39

Л.Н. Михайловская, И.В. Молчанова, М.Г. Нифонтова

Институт экологии растений и животных УрО РАН

620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8-е Марта, 202

Тел.: 8(34377)32070; факс: 8(34377)32070

E-mail: molchanova_i_v@mail.ru

РАДИОНУКЛИДЫ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЙ В РАСТЕНИЯХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

На обследованной территории Уральского региона с фоновым уровнем загрязнения почвы ^{90}Sr и ^{137}Cs , содержание радионуклидов в лесных растениях разных таксономических групп снижается с течением времени по экспоненциальному закону. Современное содержание ^{90}Sr во всех обследованных группах растений колеблется от 1 до 100 Бк/кг, а ^{137}Cs от 0.1 до 700 Бк/кг. Оно зависит от их видовой принадлежности и экологических условий. Максимальное накопление ^{137}Cs отмечено во мхах и лишайниках.

Ключевые слова: радионуклиды, таксономические группы, радионуклидные отношения, лесные экосистемы, глобальные радиоактивные выпадения.



Л.Н. Михайловская
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник



И.В. Молчанова
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник



М.Г. Нифонтова
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник

Глобальное радиоактивное загрязнение биосферы Земли началось в середине прошлого века в результате массированных испытаний ядерного оружия. С подписанием договора о «Нераспространении ядерного оружия»

1970 г., интенсивность глобальных радиоактивных выпадений из атмосферы постепенно снижалась. Аварийная ситуация на Чернобыльской АЭС (1986 г.) привела к новому увеличению поступления радионуклидов, особенно ^{137}Cs . В настоящее время уровень глобальных радиоактивных выпадений в значительной степени стабилизировался [3, 4, 13]. Сформированное радионуклидное загрязнение почвенно-растительного покрова неоднородно. В регионах с высокой техногенной нагрузкой кроме глобальных атмосферных выпадений, как правило, имеются источники дополнительного поступления радионуклидов в окружающую среду. В Уральском регионе таким источником являются предприятия ядерно-энергетического комплекса и загрязненная территория Восточно-Уральского радиоактивного следа, сформировавшаяся более полувека назад в результате аварий на производственном объединении «Маяк» [2, 9, 11]. Определенный вклад в загрязнение почв этого региона ^{137}Cs внесла и Чернобыльская авария [12]. В результате в настоящее время среднее содержание в них ^{90}Sr и ^{137}Cs составляет 2,0-3,0 и 4,0-7,0 кБк/м² соответственно [4, 6, 12]. Условимся такие уровни содержания радионуклидов считать фоновыми.

В исследованиях, посвященных изучению судьбы глобальных выпадений и распространению радиоактивных материалов воздушным путем, установлена буферная роль лесов, обусловленная свойствами древесных растений. Радионуклиды, поступающие в листья или хвою древесных растений, возвращаются с опадом на поверхность почвы и включаются в круговорот веществ. Количества, депонированные в осевых многолетних органах

растений, на длительное время выводятся из биологического круговорота [1, 10]. Немаловажное значение в миграционных процессах имеют свойства и других компонентов лесных экосистем: травянистых растений, мхов и лишайников. Снижение и последующая стабилизация уровня глобальных радиоактивных выпадений из атмосферы обусловили преобладание в настоящее время корневого пути поступления радионуклидов в растения.

Цель работы заключается в изучении аккумуляции и депонирования радионуклидов представителями крупных таксономических групп растений лесных экосистем, сформированных в пределах обследованной территории Уральского региона с фоновым уровнем техногенного радиоактивного загрязнения почвенного покрова.

Материал и методика

Исследования проводили в период с 1975 г. по 2011 г. на территории Свердловской, Челябинской и Курганской областей. Отбор проб надземной массы травянистых и древесных растений, слоевищ лишайников, дерновинок мхов и плодовых тел грибов (2-5 повторностей) производили на территориях смешанных лесов и колков. В непосредственной близости от места произрастания растений отбирали пробы почв.

Содержание ^{137}Cs определяли на сцинтилляционном гамма-спектрометре АИ-256-6 (Россия) или на многоканальном гамма-анализаторе с германиевым полупроводниковым детектором фирмы "Canberra Packard"

(США). Предел обнаружения 0,1 Бк. ^{90}Sr – радиохимическим методом по дочернему ^{90}Y , с последующей радиометрией осадков на универсальной малофоновой установке УМФ-1500 (Россия) или альфа-бета радиометре УМФ-2000 (Россия), предел обнаружения 0,2 Бк. Погрешность методов не превышала 20%.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных исследований показали, что на обследованной территории Уральского региона запасы радионуклидов в почвах лесных экосистем не превышают фоновый уровень и колеблются в пределах 0,5-2,9 и 1,6-7,0 кБк/м² для ^{90}Sr и ^{137}Cs соответственно.

Учитывая длительный период и сложный характер формирования фонового загрязнения почвенного покрова, оценили изменение содержания радионуклидов в надземной массе растений разной таксономической принадлежности во времени (рис. 1). На примере травянистых растений (лесное разнотравье), напочвенных мхов и эпифитных лишайников показано, что удельная активность ^{90}Sr в надземной массе растений произрастающих на территории с фоновым уровнем радионуклидного загрязнения снижалась с течением времени по экспоненциальному закону. Аналогичная зависимость отмечена и для ^{137}Cs . Однако после Чернобыльской аварии в 1986 г. уровень загрязнения растительного покрова этим радионуклидом повысился. В пост аварийный период его содержание в растениях закономерно снижалось с течением времени так, что к 2011 г. оно оказалось ниже предаварийного уровня.

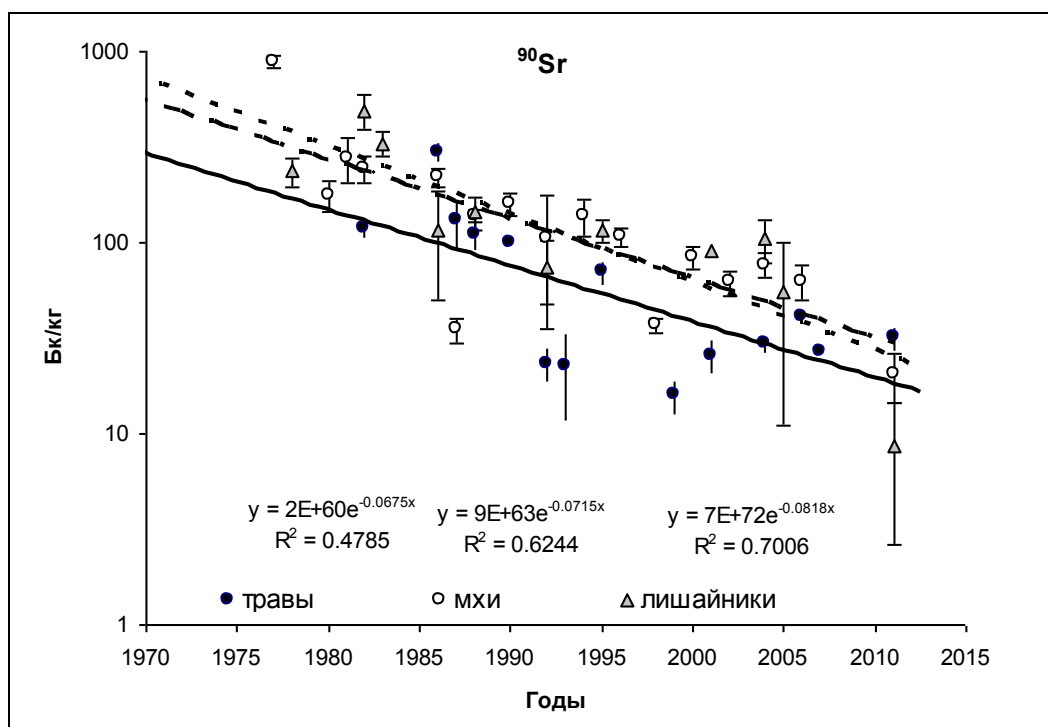


Рисунок 1

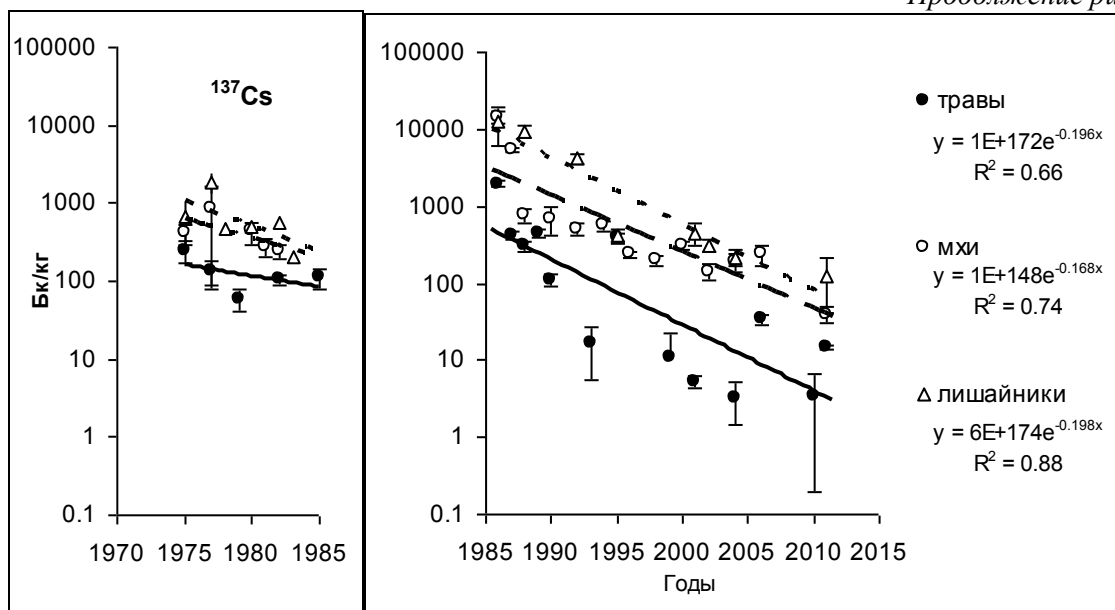


Рисунок 1 – Удельная активность радионуклидов в надземной массе растений разной таксономической принадлежности

Наблюдаемый характер временной зависимости загрязнения надземной массы растений хорошо коррелирует с изменением интенсивности выпадений радионуклидов из атмосферы [3, 4, 13]. Наряду с этим существенным фактором, влияющим на процессы временного перераспределения радионуклидов, являются и морфофизиологические особенности растений. Видно, что содержание

обоих радионуклидов во мхах и лишайниках в течение всего периода наблюдений превышало таковое в высших травянистых растениях. Об этом свидетельствует и изменение величины соотношения радионуклидов (рис.2). На фоне общего снижения содержания радионуклидов в растениях с течением времени имеет место относительное обогащение растений ^{90}Sr .

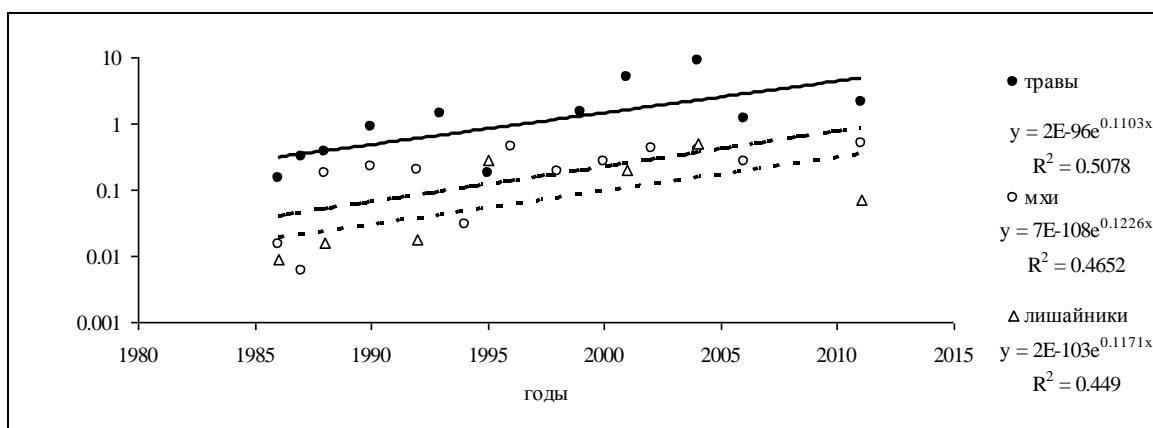
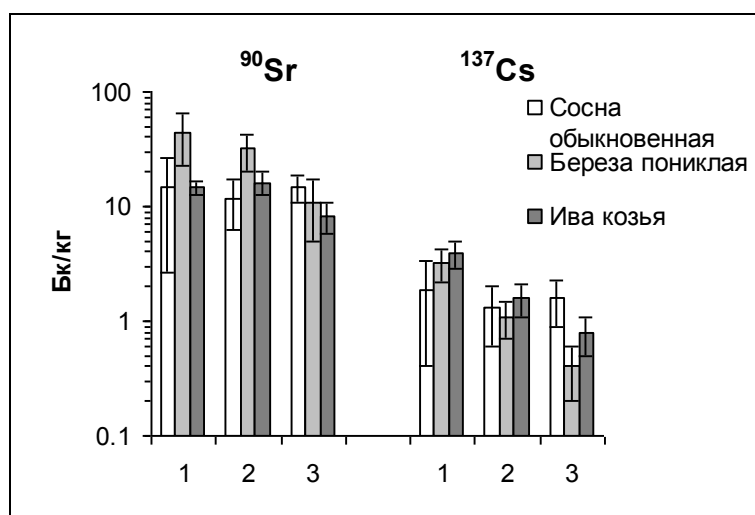


Рисунок 2 – Величина радионуклидного отношения $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ в надземной массе растений разной таксономической принадлежности

Детальное изучение аккумуляции и депонирования радионуклидов растениями разной таксономической принадлежности проводили в относительно короткий период времени, с 2000 по 2012 гг., полагая, что в этом случае временной зависимостью можно пренебречь.

На рис. 3 представлено распределение радионуклидов в надземных органах основных лесобразующих пород – сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), березе пониклой (*Betula pendula* Roth.) и крупном кустарнике – иве козьей (*Salix caprea* L.).



1 – листья (хвоя), 2 – мелкие ветки, 3 – ствол

Рисунок 3 – Распределение радионуклидов в надземных органах древесных растений

Современный уровень содержания ⁹⁰Sr в надземных органах представленных видов древесных растений варьирует в пределах 11-44 Бк/кг. Содержание ¹³⁷Cs на порядок величин меньше (0,4-3,0 Бк/кг). Видовые различия не достоверны. Изучение распределения радионуклидов по органам древесных пород показало, что у лиственных деревьев содержание ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs убывает в ряду: листья ≥ ветки > ствол. Сколько-нибудь выраженной дифференциации их в органах хвойных пород не обнаружено. Представитель кустарникового яруса – ива козья накапливает радионуклиды в меньшей степени по сравнению с рядом кустарниковых и травянистых растений (табл. 1). Отмеченные различия обусловлены тем, что большая часть биомассы этого крупного кустарника, достигающего высоты 6-10 м, представлена одревесневшими скелетными ветвями. Они, как и

древесина многолетних деревьев, накапливают меньше радионуклидов, чем ежегодно опадающие листья. Удельная активность ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в надземной массе изученных представителей кустарничков и трав выше, чем у древесных пород и составляет 19,5-98,6 Бк/кг сухой массы для ⁹⁰Sr, и 3,8-12 Бк/кг сухой массы для ¹³⁷Cs. Специфических видов накопителей радионуклидов в данном случае не обнаружено. Все изученные виды высших растений накапливают ⁹⁰Sr больше, чем ¹³⁷Cs, в то время как в почвах, на которых они произрастают, содержание ⁹⁰Sr примерно в 1,6 раза меньше, чем ¹³⁷Cs. Возможно, преимущественное накопление ⁹⁰Sr обусловлено как повышенным содержанием в растениях его макро аналога кальция по сравнению с калием, так и большей подвижностью стронция в системе почва-растение [1,5].

Таблица 1 – Содержание радионуклидов в надземной массе высших сосудистых растений

Жизненная форма	Вид	Удельная активность, Бк/кг	
		⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Кустарники	<i>Salix caprea</i> L.	12,1±2,3	1,8±0,9
	<i>Cytisus ruthenicus</i> (Fisch. ex Woloszcz.)	43,6±2,7	3,5±0,9
Кустарнички	<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	67,9±9,8	8,4±2,3
Травы	<i>Pulmonaria mollissima</i> M. Pop.	79,5±26,4	9,2±0,4
	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	62,6±9,6	8,6±3,7
	<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Holub	28,3±12,9	4,2±3,2
	<i>Fragaria viridis</i> Duch	98,6±9,8	9,0±0,6
	<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.	19,5±7,5	8,9±2,2
	<i>Lycopodium clavatum</i>	42,7±3,7	3,8±1,7
	<i>Equisetum sylvaticum</i> L.	74,8±14,0	5,7±2,5
	<i>Dryopteris filix-mas</i>	33,6±7,3	12,0±0,5

В ходе исследований наряду с высшими травянистыми и древесными видами растений было изучено 45 видов мхов и 31 вид лишайников. Мхи, в отличие от высших растений, не имеют корневой системы. Поглощение минеральных веществ, происходит всей поверхностью растения или ризоидами. Лишайники представляют собой симбиотический организм, в котором грибной компонент питается органическим веществом, создаваемым водорослью. Минеральные вещества поглощаются слоевищем из атмосферных осадков и субстратов, с которыми они тесно контактируют [8]. Так как среди изученных представителей мохово-лишайниковой растительности

не было обнаружено видов значительно отличающихся по накопительной способности, в качестве примера приведены данные, полученные для представителей родов мхов *Brachythecium* и лишайников *Cladonia* (табл. 2). Видно, что все представленные виды мхов имеют практически одинаковое содержание ^{90}Sr ; в среднем оно составляет 85 Бк/кг. Содержание ^{137}Cs в них примерно в 3 раза выше. Близкие величины характеризуют удельную активность радионуклидов в лишайниках рода *Cladonia*. В большинстве случаев вариабельность (CV) накопительной способности мхов и лишайников для отдельных видов гораздо выше, чем для рода в целом.

Таблица 2 – Содержание радионуклидов в представителях мхов рода *Brachythecium* и лишайников рода *Cladonia*

Род	Вид	^{90}Sr		^{137}Cs	
		Бк/кг	CV, %	Бк/кг	CV, %
<i>Brachythecium</i>	<i>oedipodium</i>	80	25.0	180	16.6
	<i>reflexum</i>	80	25.0	220	15.9
	<i>velutinum</i>	80	23.8	345	23.2
	<i>starkei</i>	85	92.9	205	13.2
	<i>salebrosum</i>	89	14.6	218	27.5
	Среднее	85	2.4	234	4.7
<i>Cladonia</i>	<i>amaurocraea</i>	56	53.6	206	49.5
	<i>digitata</i>	80	30.0	310	30.0
	<i>comuta</i>	130	23.1	250	20.0
	<i>furcata</i>	70	28.6	80	12.5
	<i>gracilis</i>	40	25.0	390	17.9
	<i>rei</i>	30	30.0	240	30.0
	<i>uncialis</i>	60	16.7	140	14.3
	Среднее	67	22.4	230	23.0

По-видимому, масштаб колебаний удельной активности радионуклидов в мохово-лишайниковом покрове, в первую очередь, определяется экологическими различиями мест отбора образцов [7]. Высокая межпопуляционная изменчивость накопительной способности растений была отмечена нами ранее [5].

Исследованные виды мхов и лишайников относились к разным жизненным формам и экологическим группам. Представляло интерес оценить, как это обстоятельство сказывается на параметрах аккумуляции радионуклидов. Оказалось, что содержание ^{90}Sr во мхах и лишайниках разных жизненных форм, произ-

растающих на почве или коре деревьев, практически одинаково (табл. 3). Для ^{137}Cs отмечено меньшее накопление представителями мхов, имеющих форму ковриков, по сравнению с дерновинками. В дерновинках растения крупнее, чем в ковриках и имеют большую поверхность. Отсутствие достоверных различий между эпигейной и эпифитной группами растений свидетельствует о преобладании аэрального поступления радионуклидов в организм мхов и лишайников. Следует отметить, что мхи и лишайники накапливают ^{137}Cs в больших количествах, чем высшие растения.

Таблица 3 – Содержание радионуклидов в надземной массе мхов и лишайников различных экологических групп и жизненных форм

Тип	Экологическая группа	Жизненная форма	⁹⁰ Sr, Бк/кг	¹³⁷ Cs, Бк/кг	⁹⁰ Sr/ ¹³⁷ Cs
Мхи	Эпигейные	дерновинки	83±17	281±32	0.32±0.03
		коврики	70±9	172±15	0.40±0.02
Мхи	Эпифитные	дерновинки	89±5	239±27	0.40±0.04
Лишайники	Эпигейные	Листоватые	66±10	216±73	0.31±0.05
		Кустистые	62±5	150±29	0.35±0.04
Лишайники	Эпифитные	Листоватые	66±13	168±44	0.40±0.02
		Кустистые	57±3	105±9	0.55±0.08

Грибы питаются гетеротрофным способом. В плодовые тела макромицетов органические и неорганические вещества, в том числе и радионуклиды, поступают преимущественно из субстрата (почва, древесина, лесная подстилка) через широко разветвленную сеть гиф мицелия. Продолжительность жизни плодовых тел съедобных грибов исчисляется несколькими сутками, мицелия - годами. Уровень загрязнения радионуклидами глобальных выпадений плодовых тел съедобных грибов, произ-

растающих в смешанных лесах Свердловской области, невелик, для ⁹⁰Sr он составляет 1-20 Бк/кг (табл. 4). Содержание ¹³⁷Cs в несколько раз выше. Максимальная удельная активность этого радионуклида, 170 Бк/кг отмечена в опятах (*Armillariella mellea*), произрастающих на разлагающейся древесине. Несколько ниже в грибах семейства Boletaceae (подберезовик, подосиновик, белый) – 28-65 Бк/кг, минимальная в грибах семейства Russulaceae (сыроежка, валуй, груздь) – 3-9 Бк/кг.

Таблица 4 – Содержание ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в плодовых телах агариковых грибов, Бк/кг воздушно-сухого вещества (2011 г.)

Семейство	Вид	Бк/кг	
		⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
<i>Tridholomataceae</i>	<i>Armillariella mellea (Fr.) Karst</i>	20±10	170±30
<i>Russulaceae</i>	<i>Russula cyaxantha Fr.</i>	Не опр.	9.5±0.9
	<i>Russula foetens Fr.</i>	Не опр.	3.3±0.3
	<i>Lactarius resimus Fr.</i>	1.3±0.2	6.4±0.5
<i>Boletaceae</i>	<i>Leccinum scabrum S.F. Gray</i>	22.5±8.6	65.5±4.8
	<i>Leccinum aurantiacum S.F. Gray</i>	7.2±5.3	39.3±1.8
	<i>Boletus edulis Fr.</i>	Не опр.	28.1±3.2

Отмечается преимущественное накопление в грибах, лишайниках и мхах ¹³⁷Cs относительно ⁹⁰Sr. В определенной степени это связано с тем, что многие представители данных растений относятся к калиефильным организмам. Степень аккумуляции радионуклидов грибами, лишайниками и мхами определяется разнообразием их анатомо-морфологического строения и физиологической деятельностью, свойственной отдельным видам.

Вклад различных компонентов фитоценозов в вовлечение радионуклидов в биологический круговорот будет определяться не только способностью поглощать и удерживать радионуклиды, но и продуктивностью растений. В лесных экосистемах большая часть биомассы (1,0-2,2 кг/м²) образована многолетними одревесневшими осевыми органами дре-

весных растений. Гораздо меньше (0,1-0,5 кг/м²) образуют ежегодно отмирающие листья деревьев и надземная масса трав. Примерно столько же составляет биомасса мхов и лишайников, при проективном покрытии близком к 100%. Осевые органы древесных растений извлекают из почвы и удерживают в течение всего периода жизни, измеряемого десятками и сотнями лет, не более 3% ⁹⁰Sr и 0.3% ¹³⁷Cs (табл. 5). Опад древесных растений и лесное разнотравье ежегодно вовлекает в круговорот 0,8-1,9% и 0,06-0,4% ⁹⁰Sr соответственно. Для ¹³⁷Cs эти величины на два порядка меньше. Максимальное содержание радионуклидов отмечено в лесной подстилке. Участки мохово-лишайникового покрова содержат количества радионуклидов, сравнимые с запасами в лесных подстилках, и могут дол-

гие годы удерживать их в своем организме. Биомасса плодовых тел съедобных грибов очень мала (3-5 г/м²), соответственно и количество радионуклидов, вовлекаемое в круговорот, незначительно. В лесных биогеоценозах

основная функция грибного мицелия – разложение органического вещества лесных подстилок, приводящее к высвобождению радионуклидов из них.

Таблица 6 – Запас радионуклидов в различных компонентах лесных экосистем, min-max % от суммарного запаса в почве

Компонент	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Деревья: Осевые органы	3.0-3.4	0.05-0.3
опад	0.8-1.9	0.008-0.02
Травы	0.06-0.4	0.001-0.06
Лесная подстилка	0.8-10.0	0.1-3.4
Мхи	0.6-2.8	0.6-2.0
Лишайники	0.4-1.9	0.2-3.1
Грибы	0.0002-0.002	0.00002-0.008

Заключение

На обследованной территории Уральского региона с фоновым уровнем загрязнения почвы ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs, содержание радионуклидов в изученных представителях растений снижается с течением времени по экспоненциальному закону. Современное содержание радионуклидов во всех обследованных группах растений колеблется в зависимости от их таксономической и видовой принадлежности, а также от экологических условий. Максимальное накопление ¹³⁷Cs отмечено во мхах и лишайниках, минимальное – в многолетних осевых органах древесных растений. Показано, что высшие растения накапливают преимущественно ⁹⁰Sr; а мхи, лишайники и грибы – ¹³⁷Cs. Радионуклиды, аккумулированные в древесине и биомассе мхов и лишайников, в течение длительного времени удерживаются в них. В то же время количества, поступившие в листья, хвою деревьев и травяной покров, активно вовлекаются в биологический круговорот.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы УрО РАН ориентированных фундаментальных исследований по проекту № 12-С-4-1001 и гранта РФФИ, проект № 11-04-01260-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексахин Р. М., Нарышкин М. А. Миграция радионуклидов в лесных биоценозах. – Москва: Наука, 1977. – С. 144-149
2. Антропова З. Г., Белова Е. И., Дибобес И. К. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана. Москва: Энергоатомиздат, 1990. – С. 145-149

3. Зыкова А. С., Воронина Т. Ф. Испытания ядерного оружия в атмосфере и загрязнение окружающей среды радиоактивными веществами // Радиационная биология. Радиоэкология – 1993. – Т. 33. № 1(4). – С. 598-602

4. Израэль Ю. А., Квасникова Е. В., Назаров И. М., Стукин Е. Д. Радиоактивное загрязнение цезием-137 территории России на рубеже веков // Метеорология и гидрология – 2002. – № 4. – С. 20-31

5. Караваева Е. Н., Михайловская Л. Н., Молчанова И. В., Позолотина В. Н. Накопление ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs растениями из почв, загрязненных в результате эксплуатации предприятий ядерно-энергетического комплекса // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии – 2010. № 1 (12). – С. 85-90

6. Молчанова И. В., Караваева Е. Н., Михайловская Л. Н. Радиоэкологические исследования почвенно-растительного покрова. – Екатеринбург: Наука, 2006. – С. 89-93

7. Нифонтова М. Г. Содержание долгоживущих искусственных радионуклидов в мхово-лишайниковом покрове наземных экосистем Урало-Сибирского региона // Экология – 1998. – № 3. – С. 196-200.

8. Нифонтова М. Г. Лихено- и бриоиндикация радиоактивного загрязнения среды. – Пермь, 2003. – С. 50-55

9. Позолотина В. Н., Молчанова И. В., Караваева Е. Н., Михайловская Л. Н., Антонова Е. В. Современное состояние наземных экосистем зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа. – Екатеринбург: Гошицкий, 2008. – С. 204-208

10. Тихомиров Ф. А., Щеглов А. И. Радиоэкологические последствия Кыштымской и Чернобыльской аварий в лесных экосистемах

// Экология регионов атомных станций – 1994. – № 1. – С. 71-88

11. Чуканов В. Н., Баженов А. В., Вараксин А. Н. Восточно-Уральский радиоактивный след (Свердловская область). – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – С. 167-172

12. Aarkrog A., Dahlgaard H., Nielsen S. P. et al. Radioactivity inventories from the Kyshtym and Karachay accidents: estimates based on soil samples collected in the South Urals (1990-1995) // Sci. of the Total Environment – 1997. – V. 201. – P. 137-154

**ОРАЛ АУДАНЫНЫҢ ОРМАН ЭКОЖҮЙЕСІНДЕГІ ӨСІМДІКТЕРДЕГІ
ҒАЛАМДЫҚ ШАШЫНДАРДЫҢ РАДИОНУКЛИДТЕРІ
Л.Н. Михайловская, И.В. Молчанова, М.Г. Нифонтова**

Орал ауданының зерттелген территориясында топырақтың ^{90}Sr мен ^{137}Cs арқылы ластануының фондық деңгейімен, орманның әртүрлі таксономиялық топтарындағы радионуклидтер мөлшері экспоненциальды заңға сәйкес уақыт өтуімен жоғарылайды.

^{90}Sr қазіргі уақыттағы мөлшері барлық зерттелген өсімдіктер топтарында 1-ден 100 Бк/кг дейін болды, а ^{137}Cs 0.1-ден 700 Бк/кг аралығында. Ол түрлік ерекшелік пен экологиялық жағдайларға тәуелді. Cs-дің максималды жинақталуы мұқтер мен қыналарда байқалған.

**THE GLOBAL FALLOUT RADIONUCLIDES IN THE PLANTS OF THE
URALS REGION FOREST ECOSYSTEMS
L.N. Mikhailovskaya, I.V. Molchanova, M.G. Nifontova**

It was shown the content of the global fallout radionuclides in the different taxonomical groups of the forest plants decreases during time. This decrease fairly describe as exponential function. In all investigated groups of the plant the presently content of ^{90}Sr fluctuates from 1 to 100 Bq/kg and ^{137}Cs from 0.1 to 700 Bq/kg. It depends on the species and ecological conditions. The higher plants accumulate primary ^{90}Sr as mosses and lichens - ^{137}Cs .