

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ УСЛОВНО "ФОНОВЫХ" ТЕРРИТОРИЙ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

ARTIFICIAL RADIONUCLIDES SPECIATION IN SOILS OF CONVENTIONALLY "BACKGROUND" TERRITORIES AT THE SEMIPALATINSK TEST SITE

*A. Kunduzbayeva
A. Kabdyrakova
S. Lukashenko*

Annotation

The work provides results of research of artificial radionuclides speciation in soils of conventionally "background" territories of the STS. These territories include "northern", "western", "southeastern" and "southern" parts of the STS. In spite being closely located to testing spots, radiological situation at the most of conventionally "background" territories mainly depends on global fallouts, except for zones of "plumes" from local fallouts of surface nuclear tests, conducted at the "Experimental Field". "Plumes" of fallouts, crossing "southeastern" and "southern" parts of the STS, could determine another character of radioactive contamination of the soil cover.

Identified changes in the relative content of ^{137}Cs and $^{239+240}\text{Pu}$ radionuclides speciation in soils of conventionally "background" territories of the STS are insignificant. The main forms of ^{137}Cs and $^{239+240}\text{Pu}$ in soils of conventionally "background" territories of the STS is strongly bound. Radionuclide ^{241}Am represented in the soil mainly in strongly bound form and mobile form.

Regular change of ^{90}Sr radionuclide speciation was found for conventionally "background" territories. A tendency for decrease of biological availability parameters of radionuclide was found at the territory adjacent to "plumes" and in the zone of "plumes" of surface nuclear tests at the STS. Under conditions of the STS ^{90}Sr speciation can be used as a diagnostic feature to characterize radioactive contamination of background territories and detect fallout plumes of local surface nuclear tests.

Keywords: radionuclides, Semipalatinsk proving ground, soil, artificial radionuclides, nuclear tests, pollution of a soil cover.

*Кундузбаева Асия Еркебековна
Вед. инженер Лаборатории физико-химических исследований, Институт радиационной безопасности и экологии
НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
Кабдыракова Алуа Мырзагазиновна
Нач. Лаборатории физико-химических исследований, Институт радиационной безопасности и экологии
НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
Лукашенко Сергей Николаевич
Директор Института радиационной безопасности и экологии
НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Аннотация

В работе представлены результаты исследования форм нахождения искусственных радионуклидов в почвах условно "фоновых" территорий СИП. Данные территории включают в себя "северную", "западную", "юго-восточную" и "южную" части СИП. Несмотря на близкое расположение испытательных площадок, радиоактивное загрязнение условно "фоновых" территорий в основном обусловлено глобальными выпадениями, за исключением зон следов выпадений от наземных ядерных испытаний, проведенных на площадке "Опытное поле". Следы выпадений от наземных ядерных испытаний, пролегающие через территорию "юго-восточной" и "южной" части СИП могли определить иной характер радиоактивного загрязнения почвенного покрова.

Выявленные изменения относительного содержания радионуклидов ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах условно "фоновых" территорий СИП незначительны. Радионуклиды ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах условно "фоновых" территорий СИП представлены в прочносвязанной форме. Радионуклид ^{241}Am представлен в почве, главным образом, в прочносвязанной и подвижной форме.

Распределение форм нахождения ^{90}Sr на условно "фоновых" территориях неоднородно. Выявлена тенденция уменьшения параметров биодоступности и подвижности ^{90}Sr в почвах территории, прилегающей к следам выпадений и непосредственно в зоне следов. В условиях СИП ^{90}Sr может быть использован в качестве параметра для характеристики радиоактивного загрязнения фоновых территорий и выявления следов выпадений от наземных ядерных испытаний.

Ключевые слова:

Радионуклиды, Семипалатинский испытательный полигон, почва, искусственные радионуклиды, ядерные испытания, загрязнение почвенного покрова.

ВВЕДЕНИЕ

В пределах официальной границы СИП имеются зна-

чительные по площади условно "фоновые" территории, практически не подвергшиеся влиянию выпадений от испытаний на СИП, и на которых возможно проведение хо-

зяйственной деятельности человека. В целях оценки возможности передачи "фоновых" территорий СИП в хозяйственный оборот с 2009 года проводятся масштабные комплексные исследования в этом направлении. Одним из этапов данных мероприятий является изучение форм нахождения искусственных радионуклидов в почвах. В отличие от определения валового содержания радионуклидов в почве, преимуществом данного метода является возможность оценки реальной потенциальной степени опасности радионуклидов в почвах загрязненных территорий. Результаты данных исследований имеют большое практическое значение для качественной оценки подвижности и биологической доступности радионуклидов в почвах [1].

Целью данной работы явилось исследование форм нахождения искусственных радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{90}Sr в почвах условной "фоновой" территории СИП. Природно-климатические условия и особенности формирования радионуклидного загрязнения почв в результате испытаний ядерного оружия на Семипалатинском полигоне, длительность взаимодействия радионуклидов с почвой обусловили его уникальность как объекта исследования. Выявление особенностей форм нахождения радионуклидов в почвах условно фоновых" территорий СИП, в различной степени подвергшихся загрязнению выпадениями от ядерных испытаний, позволит по-иному взглянуть на методологию построения дальнейших исследований условно "фоновых" территорий СИП. Результаты исследований "фоновых" территорий СИП имеют практическое значение для оценки подвижности и биологической доступности радионуклидов в почвах территорий, прилегающих к полигону и подобных ей территорий.

В настоящее время исследованы "фоновые" участки территории СИП, расположенные в северной, западной, юго-восточной и южной части СИП. Продолжаются исследования территорий в юго-западной части СИП. Ранее исследования форм нахождения радионуклидов в почвах "фоновых" территорий СИП не проводились..

Материалы и методы исследования

Объект исследования

Объекты исследования – "северная", "западная", "юго-восточная" и "южная" части СИП, названные так в соответствии с их географическим расположением на территории полигона (Рис.1).

В таблице (Табл. 1) представлены данные о среднем содержании техногенных радионуклидов в почвах условно "фоновых" территорий СИП с различными механизмами формирования радионуклидного загрязнения [2–5].

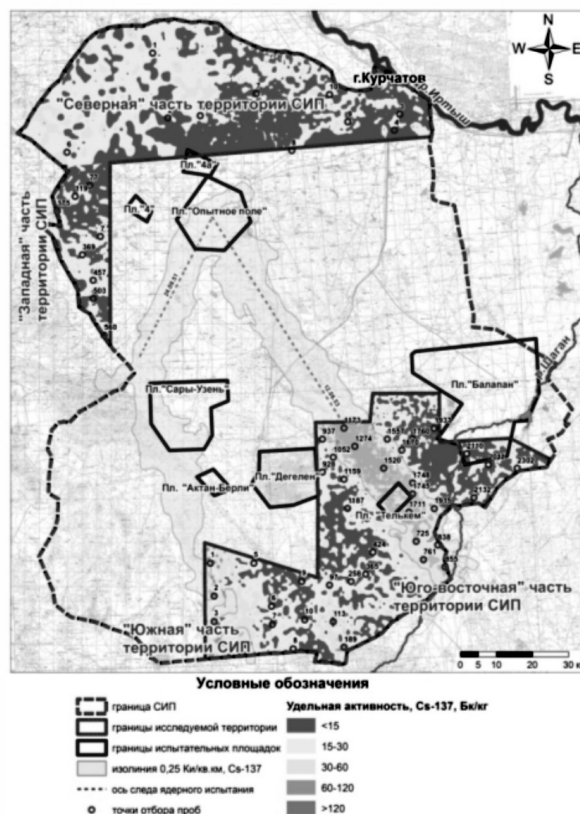


Рисунок 1. Схема расположения точек отбора на условно "фоновой" территории СИП.

Было предусмотрено разделение условно "фоновых" территорий на две категории по типу формирования радиационного загрязнения на них – "фоновые" территории и зоны "следов" выпадений от двух наземных ядерных испытаний, проведенных 24.09.1951 г (мощностью 38 кт) 12.08.1953 г (мощностью 400 кт), проведенных на площадке "Опытное поле" СИП.

Из представленных данных видно, что содержание исследуемых радионуклидов в почвах "фоновых" территорий СИП находится в пределах глобальных уровней. На "следе" выпадений от наземного испытания (38 кт, 24.09.1951), пролегающем через территорию "южной" части СИП, уровни значительно выше значений диапазона фоновых значений. Максимальный уровень содержания радионуклидов в почвах отмечен на "следе" выпадений от термоядерного испытания (400 кт, 12.08.1953 г.).

Исследуемая территория Семипалатинского полигона находится в природно-климатической зоне степей и представляет собой в географическом отношении часть Казахского мелкосопочника. Ландшафты территории представлены низкорослыми массивами, отдельными горными грядами, сопками и межсочными равнинами, понижениями под сухими и опустыненными степями на

Таблица 1.

Концентрация искусственных радионуклидов в почвах рассматриваемых объектов, Бк/кг.

Объект	^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am	$^{239+240}\text{Pu}$
<i>"Фоновые" территории СИП</i>				
"Северная" территория"	17,2	10,0	0,8	4,1
"Западная" территория"	18,0	5,8	1,1	6,5
"Юго-восточная" территория"	18,0-30,2	3,4-15,0	0,7-1,0	3,7-7,4
"Южная" территория"	20,3	14,4	0,7	3,5
<i>Зоны прохождения "следов" выпадений от наземных ядерных испытаний на условно "фоновой" территории СИП</i>				
"Юго-восточная" территория"	140	460	2,5	30
"Южная" территория"	44,5	31,6	1,4	14,5
<i>Глобальные выпадения</i>				
Северное полушарие	4-29	1-19	-	0,02-5,0

зональных каштановых и светло-каштановых нормальных, неполноразвитых и малоразвитых почвах, которые на территории полигона имеют наиболее широкое распространение. На юго-востоке территории встречаются низкогорье и высокий мелкосопочник, основными зональными почвами которых являются горные светло-каштановые почвы (Гк1) и светло-каштановые щебнистые малоразвитые (К1щ). По всей территории встречаются и лугово-каштановые, луговые почвы в комплексе и сочетании с солонцеватыми и солончаковатыми, солонцами и солончаками. Для почвенного покрова территории характерны незначительная мощность покровных рыхлых отложений, защебненность, небольшое содержание органического вещества [6–8]. По содержанию гумуса эти почвы можно отнести к среднегумусным. Почвы, в основном, промыты от легкорастворимых солей. Почвы исследуемой территории карбонатные, что свойственно этой зоне, но в различной степени. По механическому составу почвы, в большей степени, среднесуглинистые, щебнистые.

Отбор проб

Отбор проб почвы проводили в местах с повышенным содержанием изучаемых радионуклидов.

На каждом участке образцы почвы отбирали на глуби-

ну 0–5 см методом конверта. Путем смешивания не менее пяти точечных проб, отобранных с одной пробной площадки, получали объединенную пробу. Объединенные почвенные образцы высушивали до воздушно – сухого состояния, разминали в фарфоровой ступке и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм, предварительно удалив из них включения – камни, корни и др. В анализе использовали навески массой 150 г.

Методика выделения различных форм радионуклидов из почв

Исследование форм нахождения радионуклидов в почвах проводили методом последовательной экстракции. Данный метод широко используется в исследованиях большого количества токсичных элементов в разных типах образцов [9].

Была использована схема последовательного экстрагирования, предложенная Павлоцкой Ф.И (Табл. 2), включающая определение водорастворимых, обменных и необменных форм радионуклидов в почве [2]. Схема была модифицирована добавлением промежуточной стадии выделения органически связанных радионуклидов раствором 0.1 NaOH на основе методики, разработанной Тюриным И.В [10].

Таблица 2.

Схема последовательного экстрагирования.

1M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$	Обменная форма
0.1M NaOH	Форма, связанная с органической частью, свободной или прочно связанной с минеральной частью почвы
1M HCl	Необменная (подвижная), потенциальный резерв
Смесь кислот $\text{HNO}_3\text{-HF}$	Прочносвязанная (остаточная) форма

Соотношение почвы и выщелачивающего раствора составляло 1:5 (г/мл). Время контакта почвы с выщелачивающим раствором на всех этапах эксперимента составляло не менее 12 часов. В полученных вытяжках и в почве после вытяжек определяли содержание радионуклидов.

Определение содержания радионуклидов ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am, ⁹⁰Sr и ²³⁹⁺²⁴¹Pu в почве и почвенных вытяжках

Определение содержания радионуклидов ¹³⁷Cs, и ²⁴¹Am в образцах почвы и почвенных вытяжек проводили на гамма-спектрометре Canberra GX-2020 [10].

Образцы почвы и образцы вытяжек анализировали радиохимическим методом в соответствии с аттестованными методическими указаниями с глубоким разложением образца (озоление) смесью минеральных кислот [12].

Определение содержания в пробах почвы и вытяжек ²³⁹⁺²⁴⁰Pu проводили в соответствии с радиохимической методикой выделения ²³⁹⁺²⁴⁰Pu с альфа-спектрометрическим измерением [13].

Предел обнаружения радионуклидов в исследуемых пробах почвы и вытяжек рассчитывался исходя из массы навески и объема вытяжек, взятых для анализа и временного измерения. Предел обнаружения для радионуклида ¹³⁷Cs, в среднем составлял 0,9 Бк/кг (в диапазоне от 0,1 до 2,0 Бк/кг), для ²⁴¹Am и ⁹⁰Sr – 0,3 Бк/кг (от 0,2 до 1,4 Бк/кг), ²³⁹⁺²⁴⁰Pu – 0,02 Бк/кг (от 0,01 до 4,2 Бк/кг). Погрешность аналитических измерений не превышала 30%.

Результаты и обсуждение

Формы нахождения радионуклидов в почвах

Результаты определения форм нахождения радионуклидов ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu и ⁹⁰Sr представлены в единицах удельной активности форм нахождения радионуклидов в расчете на 1 кг почвы и в процентах от суммарного содержания всех форм.

Для получения удельного содержания растворимых форм радионуклидов в почве первичные результаты удельной активности растворимых форм радионуклидов в вытяжках пересчитывалась на почву с учетом использованных в методике пропорциональных отношений почвы и выщелачивающего раствора (1:5). Суммарное содержание форм нахождения радионуклидов (в вытяжках и в почве после вытяжек) принимали за общее (суммарное) содержание радионуклида в почве, т.е. за 100%.

Во многих случаях определение относительного содержания форм нахождения радионуклидов осложнялось наличием большого количества значений удельного содержания радионуклидов в вытяжках менее предела обнаружения используемого метода. Во избежание занижения результатов данные на уровне предела обнаружения при расчетах приравнивались к пределу обнаружения. Соответственно, данные относительного содержания растворимых форм радионуклидов представляют собой оценку сверху.

Формы нахождения радионуклида ¹³⁷Cs

В таблице (Табл. 3) представлены результаты исследования радионуклида ¹³⁷Cs.

Таблица 3/1.

Содержание форм нахождения радионуклида ¹³⁷Cs (Бк/кг, % доля от суммарного содержания всех форм).

№ точки	Содержание ¹³⁷ Cs в почве	Обменная форма (1М CH ₃ COONH ₄)		Органическая форма (0,1 н NaOH)		Подвижная форма (1М HCl)		Прочносвязанная форма (почва)	
		Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%
<i>"Фоновые" территории</i>									
<i>Северная часть СИП</i>									
6	41 ± 8	< 0,9	< 1,7	-	-	< 0,7	< 1,4	50 ± 10	>96,9
2	24 ± 4	< 0,8	< 3,3	-	-	< 0,7	< 2,9	23 ± 4	>93,8
5	17,2*	< 0,8	< 3,4	-	-	< 0,7	< 2,7	23 ± 4	>93,9
1	19 ± 8	< 0,9	< 4,3	-	-	0,6	< 2,8	20 ± 4	>92,9
7	56 ± 10	3,2 ± 0,6	6,6	-	-	< 0,7	< 1,5	45 ± 10	>91,9
10	16 ± 3	< 0,8	< 5,0	-	-	< 0,6	< 4,2	14 ± 3	>90,8
9	19 ± 4	< 0,8	< 3,8	-	-	< 0,8	< 3,8	18 ± 3	>92,5
8	27 ± 5	< 0,8	< 3,0	-	-	< 0,6	< 2,3	26 ± 5	>94,7
4	19 ± 4	< 0,8	< 4,4	-	-	< 0,6	< 3,0	17 ± 3	>92,5
3	20 ± 4	< 0,9	< 4,2	-	-	< 0,7	< 3,2	20 ± 4	>92,6
<i>Среднее, %**</i>			<4,0		-		< 2,8		>93,3

Таблица 3/2.

Содержание форм нахождения радионуклида ^{137}Cs (Бк/кг, % доля от суммарного содержания всех форм).

№ точки	Содержание ^{137}Cs в почве	Обменная форма (1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$)		Органическая форма (0,1 н NaOH)		Подвижная форма (1М HCl)		Прочносвязанная форма (почва)	
		Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%
<i>"Фоновые" территории</i>									
<i>Западная часть СИП</i>									
369	58 ± 12	< 1,0	< 2,1	-	-	< 0,9	< 2,0	44 ± 12	> 95,9
119	11 ± 2	< 0,9	< 6,5	-	-	< 0,8	< 5,6	12 ± 3	> 87,9
77	49 ± 10	< 1,1	< 2,9	-	-	< 0,9	< 2,3	35 ± 7	> 94,8
175	49 ± 10	< 1,8	< 5,0	-	-	< 1,3	< 3,7	32 ± 6	> 91,3
560	42 ± 8	< 2,0	< 4,9	-	-	< 0,9	< 2,3	37 ± 7	> 92,9
457	32 ± 6	< 0,9	< 3,1	-	-	< 0,9	< 3,1	26 ± 5	> 93,8
503	30 ± 6	< 0,9	< 2,3	-	-	< 0,9	< 2,4	37 ± 7	> 95,3
7	32 ± 6	< 1,0	< 4,0	-	-	< 0,8	< 3,0	24 ± 5	> 93,0
<i>Среднее, %**</i>			< 3,9		-		< 3,0		> 93,1
<i>Юго-восточная часть СИП</i>									
937	83 ± 17	1,2 ± 0,2	1,6	< 0,5	< 0,6	< 0,4	< 0,6	72 ± 14	97,2
1052	30 ± 6	0,6 ± 0,1	1,8	< 0,5	< 1,5	< 0,4	< 1,3	31 ± 1	> 95,4
928	61 ± 10	< 0,9	< 1,5	< 0,2	< 0,4	0,7 ± 0,1	1,1	57 ± 9	> 97,1
1159	41 ± 11	1,1 ± 0,2	3,2	< 0,5	< 1,6	< 0,4	< 1,3	32 ± 6	> 94,0
1557	22 ± 5	< 0,7	< 4,6	< 0,3	< 1,9	< 0,4	< 2,5	14 ± 3	> 91,0
1670	62 ± 12	0,9 ± 0,2	1,5	< 0,2	< 0,4	0,6 ± 0,1	1,0	60 ± 10	97,1
1760	23 ± 5	< 0,5	< 2,1	< 0,5	< 2,2	< 0,4	< 1,7	20 ± 4	> 93,9
424	95 ± 19	3,3 ± 0,3	3,5	0,7 ± 0,1	0,8	1,4 ± 0,3	1,5	90 ± 18	94,3
365	23 ± 5	< 0,4	< 1,8	< 0,2	< 0,7	< 0,4	< 1,6	24 ± 5	> 95,9
258	66 ± 13	2,9 ± 0,3	4,4	< 0,2	< 0,3	1,2 ± 0,2	1,9	63 ± 12	93,5
97	27 ± 5	< 0,4	< 1,8	< 0,4	< 1,6	< 0,3	< 1,4	24 ± 5	> 95,2
113	76 ± 15	2,2 ± 0,2	3,0	< 0,4	< 0,5	1,4 ± 0,2	2,0	70 ± 14	94,5
189	42 ± 8	0,8 ± 0,1	< 1,8	< 0,1	< 0,3	< 0,5	< 1,1	43 ± 8	> 96,8
1187	34 ± 6	< 0,5	< 1,5	< 0,5	< 1,7	< 0,4	< 1,4	28 ± 5	> 95,3
<i>Среднее, %**</i>			2,3		< 1,0		1,4		95,4
<i>Южная часть СИП</i>									
5	49 ± 10	1,8 ± 0,4	3,5	< 0,3	< 0,6	0,5 ± 0,1	1,0	50 ± 10	94,8
7	31 ± 6	< 0,1	< 0,5	< 0,2	< 0,7	< 0,2	< 0,5	28 ± 5	> 98,3
8	34 ± 7	0,5 ± 0,1	1,8	< 0,2	< 0,7	< 0,1	< 0,4	29 ± 6	> 97,1
9	42 ± 8	1,6 ± 0,4	3,9	< 0,2	< 0,5	0,8 ± 0,2	1,9	38 ± 7	93,6
10	49 ± 10	0,6 ± 0,1	1,3	< 0,2	< 0,4	< 0,2	< 0,3	48 ± 10	> 98,0
<i>Среднее, %**</i>			2,2		< 0,6		0,8		96,4

Таблица 3/3.

Содержание форм нахождения радионуклида ¹³⁷Cs (Бк/кг, % доля от суммарного содержания всех форм).

№ точки	Содержание ¹³⁷ Cs в почве	Обменная форма (1М CH ₃ COONH ₄)		Органическая форма (0,1 н NaOH)		Подвижная форма (1М HCl)		Прочносвязанная форма (почва)	
		Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%
<i>"Фоновые" территории</i>									
<i>Зоны прохождения "следов"</i>									
Термоядерное испытание от 12.08.1953г (400 кт) (юго-восточная территория СИП)									
1173	335 ± 65	1,7 ± 0,2	0,5	< 0,4	< 0,1	0,6 ± 0,1	0,2	330 ± 65	99,2
1274	475 ± 100	2,7 ± 0,5	0,5	< 0,6	0,1	1,4 ± 0,3	0,3	490 ± 100	99,1
1520	580 ± 110	2,4 ± 0,5	0,4	< 0,2	0,03	2,2 ± 0,4	0,4	580 ± 110	99,2
1748	130 ± 30	1,2 ± 0,2	0,9	< 0,5	< 0,3	0,6 ± 0,1	0,4	140 ± 30	98,4
1745	210 ± 40	1,7 ± 0,3	0,9	< 0,4	< 0,2	< 0,4	0,2	200 ± 40	> 98,7
1711	240 ± 45	1,1 ± 0,1	0,5	< 0,3	< 0,2	1,6 ± 0,2	0,7	215 ± 40	98,6
1915	85 ± 17	< 0,5	< 0,6	< 0,5	< 0,6	< 0,4	< 0,4	90 ± 20	> 98,4
725	40 ± 7	< 0,2	< 0,7	< 0,1	< 0,4	< 0,4	< 0,9	37 ± 7	> 98,0
838	140 ± 30	< 0,6	< 0,4	< 0,4	< 0,2	0,8 ± 0,2	0,5	160 ± 30	> 98,9
761	90 ± 10	0,7 ± 0,1	0,8	< 0,4	0,5	< 0,4	< 0,5	84 ± 10	> 98,2
855	180 ± 35	3,5 ± 0,7	2,0	< 0,4	< 0,2	< 0,5	< 0,3	180 ± 35	> 97,5
<i>Среднее, %**</i>			0,7		<0,3		0,4		98,6
Наземное ядерное испытание от 24.09.1951г (38 кт) (южная территория СИП)									
1	100 ± 20	1,0 ± 0,2	1,1	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	90 ± 18	> 98,1
2	100 ± 20	0,6 ± 0,1	0,5	< 0,2	< 0,2	< 0,3	< 0,3	103 ± 20	> 98,9
3	93 ± 19	1,9 ± 0,2	2,1	< 0,3	< 0,3	0,5 ± 0,1	0,6	87 ± 17	97,0
4	150 ± 30	2,7 ± 0,3	2,1	< 0,3	< 0,3	0,4 ± 0,1	0,3	126 ± 25	97,4
6	56 ± 11	0,6 ± 0,1	1,1	< 0,3	< 0,5	< 0,2	< 0,3	52 ± 11	> 98,1
<i>Среднее, %**</i>			1,4		<0,3		<0,4		97,9

* - среднее содержание радионуклида в почвах исследуемой зоны СИП

** - не определяли

** - При расчетах относительного содержания форм нахождения радионуклидов результаты определения удельной активности радионуклидов в вытяжках менее предела обнаружения методики принимались равными пределу обнаружения

Полученные количественные данные относительного содержания обменной и подвижной формы радионуклида ¹³⁷Cs в почвах выявили уменьшение растворимости радионуклида в почвах зон "следов" в сравнении с фоновыми участками "юго-восточной" и "южной" части СИП. Содержание обменной формы ¹³⁷Cs в почвах "юго-восточной" уменьшается в 3 раза (от 2,3% до 0,7%), подвижной формы – в 3,5 раза (от 1,4% до 0,4%). В "южной" части СИП снижение доли обменной формы отмечается в 1,5 раза (от 2,2% до 1,4%), подвижной формы – не менее чем в 2 раза (от 0,8% до 0,4%). В зоне "следа" от термоядерного испытания 1953 г, изменение более выражено, чем на "следе" от наземного ядерного испытания 1951 г. Ряд авторов считают подвижным и доступным для растений

суммарное количество радиоцезия, вытесняемого растворителями нейтральных солей и разбавленными кислотами (кислоторастворимого) [15–17]. Полученные нами данные согласуются с данными исследования накопления радионуклида ¹³⁷Cs зональными растениями на исследуемых территориях, выявивших различие в значениях коэффициентов накопления на "следах" выпадений и "фоновых" территориях [12–15].

Основное содержание радионуклида находится в прочносвязанном состоянии (не менее 93,1%), являющимся характерным для данного радионуклида. Это определено, в том числе, механизмом взаимодействия данного радионуклида с почвой.

Как известно, радионуклид ^{137}Cs прочно сорбируется глинистыми минералами и слюдами, изоморфно замещающий в кристаллических структурах элемент К. Различия относительного содержания прочносвязанной формы ^{137}Cs на "фоновой" территории и в зоне "следов" незначительны и находятся на уровне погрешности из-

мерений.

Формы нахождения радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$

Результаты исследования радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$ представлены в таблице (Табл. 4)

Таблица 4/1.

Содержание форм нахождения радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$ (Бк/кг, % доля от суммарного содержания всех форм).

Точка отбора	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в почве	Обменная форма (1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$)		Органическая форма (0,1 н NaOH)		Подвижная форма (1М HCl)		Прочносвязанная форма (почва)	
		Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%
<i>"Фоновые" территории</i>									
<i>Северная часть СИП</i>									
6	3,4 ± 0,6	< 0,02	< 0,8	-	-	< 0,02	< 0,7	2,5 ± 0,3	> 98,5
2	5,2 ± 1,0	< 0,02	< 0,3	-	-	0,06	0,9	6,9 ± 1,4	> 98,8
5	4,1*	< 0,02	< 0,9	-	-	< 0,04	< 1,7	2,3 ± 0,5	> 97,4
1	2,7 ± 0,5	< 0,02	< 1,7	-	-	< 0,05	< 3,9	1,1 ± 0,2	> 94,5
7	4,1*	< 0,02	< 0,1	-	-	< 0,02	< 0,1	20 ± 3	> 99,8
10	4,9 ± 0,9	< 0,02	< 0,9	-	-	< 0,02	< 1,0	2,0 ± 0,3	> 98,1
9	12 ± 2,5	< 0,02	< 0,3	-	-	0,05	0,8	7,0 ± 1,3	> 98,9
8	14 ± 3	< 0,02	< 0,1	-	-	0,05	0,2	20 ± 4	> 99,7
4	3,5 ± 0,6	< 0,02	< 0,5	-	-	< 0,02	< 0,7	3,2 ± 0,6	> 98,8
3	12 ± 2	< 0,03	< 0,3	-	-	0,09	1,0	8,9 ± 1,7	> 98,7
<i>Среднее, %**</i>			< 0,6				< 1,1		> 98,3
<i>Западная часть СИП</i>									
369	6,6 ± 1,3	< 0,02	< 0,5	-	-	< 0,02	< 0,4	4,6 ± 0,9	> 99,1
119	1,2 ± 0,2	< 0,02	< 0,3	-	-	< 0,02	< 0,2	0,8 ± 0,15	> 99,5
77	6,5*	< 0,02	< 0,4	-	-	< 0,02	< 0,4	5,9 ± 1,2	> 99,3
175	1,5 ± 0,2	< 0,03	< 2,0	-	-	< 0,02	< 1,8	1,3 ± 0,2	> 96,2
560	6,5*	< 0,03	< 0,4	-	-	< 0,04	< 0,5	7,5 ± 1,5	> 99,1
457	6,5*	< 0,03	< 0,2	-	-	< 0,02	< 0,2	14 ± 3	> 99,6
503	6,5*	< 0,04	< 0,8	-	-	< 0,02	< 0,4	4,8 ± 0,9	> 98,8
7	6,5*	< 0,02	< 1,5	-	-	< 0,02	< 1,4	1,4 ± 0,3	> 97,1
<i>Среднее, %**</i>			< 0,7				< 0,7		> 98,6
<i>Юго-восточная часть СИП</i>									
1052	20 ± 4	< 0,02	< 0,1	< 0,04	< 0,2	0,2 ± 0,01	0,6	23 ± 3	99,1
1159	7,7 ± 7	< 0,01	< 0,1	< 0,04	< 0,4	< 0,02	< 0,2	10 ± 2	> 99,3
1557	5,4*	< 0,02	< 0,04	0,3 ± 0,02	0,8	< 0,04	< 0,1	39 ± 5	> 99,0
1670	5,4*	< 0,02	< 0,1	0,3 ± 0,02	1,3	0,1 ± 0,02	0,5	20 ± 3	98,1
2132	7,4 ± 1,5	< 0,03	< 0,2	0,1 ± 0,01	0,6	< 0,03	< 0,2	16 ± 3	> 99,0
2110	18 ± 3	< 0,02	< 0,1	0,7 ± 0,03	3,0	0,07 ± 0,01	0,3	22 ± 3	96,6
2302	13 ± 3	< 0,02	< 0,1	0,1 ± 0,02	0,7	0,2 ± 0,02	1,1	19 ± 3	98,1
1187	< 4,2	< 0,01	< 0,2	0,1 ± 0,01	3,0	< 0,03	< 0,8	4,0 ± 0,8	> 96,1
<i>Среднее, %**</i>			< 0,1		1,6		0,5		> 98,2

Таблица 4/2.

Содержание форм нахождения радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$ (Бк/кг, % доля от суммарного содержания всех форм).

№ точки	Содержание ^{137}Cs в почве	Обменная форма (1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$)		Органическая форма (0,1 н NaOH)		Подвижная форма (1М HCl)		Прочносвязанная форма (почва)	
		Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%
<i>"Фоновые" территории</i>									
<i>Южная часть СИП</i>									
5	9,0 ± 1,9	< 0,01	< 0,17	< 0,02	< 0,19	< 0,01	< 0,16	8,1 ± 1,6	> 99,5
7	4,6*	< 0,01	< 0,15	< 0,01	< 0,18	< 0,05	< 0,6	7,4 ± 1,5	> 99,0
8	4,7 ± 1,2	< 0,01	< 0,36	< 0,01	< 0,41	< 0,01	< 0,23	3,6 ± 0,7	> 99,0
9	5,4 ± 1,7	< 0,01	< 0,20	< 0,04	< 0,64	< 0,05	< 0,8	5,8 ± 1,1	> 98,3
10	9,2 ± 2,2	< 0,013	< 0,13	0,06 ± 0,01	0,6	< 0,01	< 0,09	9,8 ± 1,9	> 99,1
<i>Среднее, %**</i>			< 0,2		< 0,4		< 0,4		> 99,0
<i>Зоны прохождения "следов"</i>									
Термоядерное испытание от 12.08.1953г (400 кт) (юго-восточная территория СИП)									
1173	72 ± 8	< 0,01	< 0,02	< 0,08	< 0,1	0,07 ± 0,01	0,1	88 ± 8	99,8
1274	77 ± 10	< 0,01	< 0,01	0,4 ± 0,03	0,3	0,1 ± 0,02	0,1	130 ± 30	99,6
1520	137 ± 11	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,04	0,1 ± 0,01	0,1	117 ± 10	99,9
1745	31 ± 6	< 0,01	< 0,03	0,7 ± 0,05	1,5	0,8 ± 0,06	1,8	43 ± 5	96,7
1711	58 ± 8	< 0,01	< 0,01	0,3 ± 0,02	0,6	< 0,04	< 0,1	55 ± 11	99,3
1915	29 ± 4	< 0,01	< 0,1	< 0,05	< 0,2	< 0,04	< 0,2	22 ± 3	> 99,5
725	7,0 ± 1,5	0,3 ± 0,02	2,2	0,4 ± 0,03	3,1	0,4 ± 0,04	3,2	11 ± 3	91,4
838	31 ± 6	0,1 ± 0,02	0,2	0,1 ± 0,02	0,2	0,1 ± 0,02	0,3	43 ± 7	99,2
761	19 ± 3	0,2 ± 0,02	0,9	0,2 ± 0,02	1,0	0,2 ± 0,03	1,0	18 ± 3	97,1
855	45 ± 5	< 0,05	< 0,1	0,1 ± 0,02	0,3	0,1 ± 0,02	0,3	37 ± 7	99,2
<i>Среднее, %**</i>			0,4		0,7		0,7		98,2
Наземное ядерное испытание от 24.09.1951г (38 кт) (южная территория СИП)									
1	19,3*	< 0,01	< 0,03	< 0,01	< 0,04	< 0,016	< 0,04	36 ± 7	> 99,9
2	19,3*	< 0,01	< 0,02	< 0,01	< 0,03	< 0,03	< 0,06	52 ± 11	> 99,9
3	33 ± 4	< 0,01	< 0,04	0,06 ± 0,01	0,2	< 0,05	< 0,14	32 ± 4	> 99,6
4	55 ± 6	< 0,02	< 0,04	< 0,02	< 0,04	< 0,01	< 0,02	42 ± 6	> 99,9
6	18 ± 3	< 0,01	< 0,07	< 0,01	< 0,09	< 0,01	< 0,06	17 ± 3	> 99,8
<i>Среднее, %**</i>			< 0,04		< 0,01		< 0,01		> 99,8

* - среднее содержание радионуклида в почвах исследуемой зоны СИП

** - не определяли

** - При расчетах относительного содержания форм нахождения радионуклидов результаты определения удельной активности радионуклидов в вытяжках менее предела обнаружения методики принимались равными пределу обнаружения

Особенностью поведения радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах исследуемых территорий является различие, хоть и незначительное, в содержании органических форм в зоне "следов" и фоновых территорий "юго-восточной".

На "северной" и "западной" территории СИП данных о содержании органической формы нет, так как исследование форм нахождения определяли по сокращенной схеме, исключающей выделение органически связанных

форм. В зоне "следа" от термоядерного испытания содержание органически связанной формы $^{239+240}\text{Pu}$ в среднем равно 0,7%, на "фоновой" территории вдвое больше – 1,6% от суммарного содержания. Данный факт не противоречит данным, выявившим более низкие значения параметров перехода радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$ в зональные растения, произрастающие на "следе" выпадения от термоядерного испытания относительно фоновых территорий "юго-восточной" части СИП [14, 15].

Нельзя исключать влияние относительного содержания органически связанной формы радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$ в почве на корневое поступление радионуклида

в зональные растения данных территорий. Преобладающей формой радионуклида в почве является прочносвязанная форма (98,2% – 99,8%). В легкодоступной (обменной) форме радионуклид не обнаружен.

Формы нахождения радионуклида ^{241}Am

В таблице (Табл. 5) представлены результаты исследования форм нахождения радионуклида ^{241}Am .

В связи с низким содержанием изучаемого радионуклида ^{241}Am и характерной для данного радионуклида низкой растворимостью, определение растворимых форм радионуклида в почвах является сложной задачей.

Таблица 5/1.

Содержание форм нахождения радионуклида ^{241}Am (Бк/кг).

Точка отбора	Содержание ^{241}Am в почве	Обменная форма (1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$)	Органическая форма (0,1 н NaOH)	Подвижная форма (1М HCl)	Прочносвязанная форма (почва)
<i>"Фоновые" территории</i>					
<i>Северная часть СИП</i>					
6	0,6 ± 0,2	< 0,3	-	< 0,6	< 0,5
2	0,6 ± 0,2	< 0,3	-	< 0,3	< 0,6
5	< 0,7	< 0,3	-	< 0,6	< 0,6
1	1,1 ± 0,3	< 0,3	-	< 0,3	< 0,5
7	1,7 ± 0,4	0,2	-	< 0,6	1,9 ± 0,3
10	1,3 ± 0,3	0,4	-	< 0,3	< 0,7
9	0,7 ± 0,2	0,2	-	< 0,3	< 0,5
8	2,2 ± 0,4	< 0,3	-	< 0,4	2,5 ± 0,4
4	0,9 ± 0,3	< 0,3	-	< 0,2	< 0,4
3	1,2 ± 0,2	0,4	-	0,8 ± 0,2	< 0,5
<i>Западная часть СИП</i>					
369	1,3 ± 0,3	< 0,3	-	< 0,3	< 0,6
119	1,0 ± 0,3	< 0,6	-	< 0,3	< 0,5
77	< 0,8	< 0,5	-	0,9 ± 0,2	< 0,5
175	1,0 ± 0,4	< 0,8	-	< 0,3	< 0,5
560	1,4 ± 0,3	< 0,3	-	< 0,3	1,0 ± 0,3
457	0,7 ± 0,2	< 0,3	-	< 0,3	< 0,5
503	3,0 ± 0,4	< 0,4	-	0,9 ± 0,2	1,1 ± 0,4
7	1,3 ± 0,4	< 0,6	-	< 0,3	< 0,4
<i>Южная часть СИП</i>					
5	< 1,8	< 0,1	< 0,1	< 0,2	1,1 ± 0,2
7	< 2,4	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,5
8	< 1,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,6 ± 0,1
9	< 1,3	< 0,1	< 0,1	< 0,4	< 0,2
10	< 1,8	< 0,1	< 0,18	< 0,2	0,8 ± 0,2

Таблица 5/2.

Содержание форм нахождения радионуклида ²⁴¹Am (Бк/кг).

Точка отбора	Содержание ²⁴¹ Am в почве	Обменная форма (1М СН ₃ СООNH ₄)	Органическая форма (0,1 н NaOH)	Подвижная форма (1М HCl)	Прочносвязанная форма (почва)
<i>"Фоновые" территории</i>					
<i>Юго-восточная часть СИП</i>					
937	4,4 ± 0,6	< 0,2	< 0,2	1,8 ± 0,1	3,6 ± 0,3
1052	4,4 ± 0,3	< 0,1	< 0,1	0,8 ± 0,1	3,1 ± 0,3
928	2,3 ± 0,5	< 0,2	< 0,2	0,6 ± 0,1	1,2 ± 0,3
1159	< 0,5	< 0,1	< 0,2	< 0,4	< 0,4
1557	< 0,52	< 0,1	< 0,2	< 0,2	< 0,3
1670	0,8 ± 0,2	< 0,1	< 0,2	0,5 ± 0,1	< 1,9
1760	1,8 ± 0,4	< 0,3	< 0,2	0,5 ± 0,1	< 1,7
2132	0,8 ± 0,2	< 0,1	< 0,3	< 0,3	< 0,3
2110	1,1 ± 0,4	< 0,1	< 0,2	0,7 ± 0,1	< 0,2
2011	2,2 ± 0,5	< 0,1	< 0,3	0,4 ± 0,1	1,7 ± 0,3
2302	0,8*	< 0,1	< 0,1	0,3 ± 0,1	< 0,2
424	2,4 ± 0,4	< 0,1	< 0,1	< 0,4	4,2 ± 0,4
365	1,0 ± 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,1 ± 0,3
258	< 0,7	< 0,1	< 0,1	0,5 ± 0,1	< 0,7
97	0,8 ± 0,2	< 0,1	< 0,2	< 0,3	< 0,6
113	1,7 ± 0,3	< 0,1	< 0,2	< 0,3	1,0 ± 0,3
189	0,9 ± 0,2	< 0,1	< 0,2	< 0,3	< 1,0
1187	0,8 ± 0,2	< 0,3	< 0,1	< 0,5	< 0,4
<i>Зоны прохождения "следа"</i>					
Термоядерное испытание от 12.08.1953г (400 кт) (юго-восточная территория СИП)					
1173	4,0 ± 0,8	< 0,2	< 0,2	0,3 ± 0,1	4,3 ± 0,4
1274	2,5*	< 0,2	< 0,2	0,5 ± 0,1	9,5 ± 0,6
1520	4,2 ± 0,6	< 0,1	< 0,2	0,9 ± 0,1	5,4 ± 0,6
1748	0,7 ± 0,2	< 0,1	< 0,2	0,6 ± 0,1	< 1,9
1745	3,2 ± 0,8	< 0,1	< 0,2	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,3
1711	4,5±1,0	< 0,1	< 0,2	0,5 ± 0,1	2,0 ± 0,4
1915	1,8 ± 0,4	< 0,2	< 0,3	0,5 ± 0,1	< 1,8
725	< 0,8	< 0,2	< 0,1	< 0,2	< 0,4
838	< 3,0	< 0,2	< 0,2	0,7 ± 0,1	1,2 ± 0,3
761	< 0,6	< 0,1	< 0,2	0,3 ± 0,1	< 0,4
855	< 3,0	< 0,1	< 0,2	0,5 ± 0,1	1,2 ± 0,3
Наземное ядерное испытание от 24.09.1951г (38 кт) (южная территория СИП)					
1	< 3,7	< 0,1	< 0,2	< 0,3	2,4 ± 0,1
2	< 3,7	< 0,1	< 0,1	0,4 ± 0,1	3,2 ± 0,2
3	< 3,3	< 0,1	< 0,2	< 0,2	2,0 ± 0,2
4	< 7,2	< 0,2	< 0,1	< 0,1	3,8 ± 0,3
6	< 1,9	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,4 ± 0,2

*- среднее содержание радионуклида в почвах исследуемой зоны СИП

*- не определяли

Жирным шрифтом выделены количественные данные

Недостаточные пределы обнаружения используемой аппаратуры и методики исследования не позволили достоверно рассчитать относительное содержание форм нахождения радионуклида ^{241}Am в почвах.

В связи с этим, в таблице представлены только значения удельного содержания форм радионуклида.

Практически во всех образцах обменной и органической формы содержание радионуклида было определено на уровнях ниже предела обнаружения используемой методики и аппаратуры. Количественные содержания ^{241}Am отмечены в кислотных вытяжках и в прочносвязанной форме. В зоне "следов" практически во всех образцах максимум содержания радионуклида приурочен к прочносвязанной форме, доля подвижной формы составляет от 5,0% до 36,8% от содержания прочносвязанной формы, за исключением точки 1745, где содержание прочносвязанной формы сопоставимо с подвижной формой радионуклида.

На "фоновых" территориях в большинстве образцов удельное содержание подвижной формы составляет долю не менее половины от содержания прочносвязанной формы, а в некоторых случаях превышает ее содержание. Сравнительный анализ форм нахождения исследуемых трансурановых радионуклидов позволяет сделать вывод о большей растворимости в почвах радионуклида ^{241}Am относительно изотопов $^{239+240}\text{Pu}$.

Формы нахождения радионуклида ^{90}Sr

Особый интерес представляют результаты исследования радионуклида ^{90}Sr . Как правило, в почвах радионуклид ^{90}Sr характеризуется высокой подвижностью и биологической доступностью, что обусловлено физико-химическими свойствами радионуклида и механизмами взаимодействия его с почвенными компонентами.

Результаты исследования по ^{90}Sr представлены в таблице (Табл. 6).

Таблица 6/1.

Содержание форм нахождения радионуклида ^{90}Sr (Бк/кг, % доля от суммарного содержания всех форм).

Точка отбора	Содержание ^{90}Sr в почве	Обменная форма (1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$)		Органическая форма (0,1 н NaOH)		Подвижная форма (1М HCl)		Прочносвязанная форма (почва)	
		Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%
<i>"Фоновые" территории</i>									
<i>Северная часть СИП</i>									
6	12 ± 3	4,7 ± 0,4	51,4	-	-	< 2,0	< 21,5	2,5 ± 0,7	27,2
2	10*	5,1 ± 0,4	> 63,3	-	-	< 1,1	< 13,1	< 1,9	< 23,6
5	61 ± 12	44 ± 4	77,0	-	-	10 ± 1	17,7	3,0 ± 1,0	5,3
1	10*	4,7 ± 0,5	> 57,7	-	-	< 1,3	< 16,3	< 2,1	< 26,0
7	10*	6,0 ± 0,7	56,2	-	-	2,2 ± 0,6	20,3	< 2,5	< 23,4
10	10*	3,8 ± 0,4	> 57,5	-	-	< 1,1	< 16,9	< 1,7	< 25,6
9	10*	3,3 ± 0,5	46,2	-	-	< 1,4	< 20,1	< 2,4	< 33,6
8	19 ± 3	4,5 ± 0,5	> 60,9	-	-	< 1,2	< 16,1	< 1,7	< 23,0
4	10*	3,7 ± 0,4	> 63,8	-	-	< 0,7	< 11,9	< 1,4	< 24,3
3	10*	4,0 ± 0,5	> 62,4	-	-	< 1,0	< 15,7	< 1,4	< 22,0
<i>Среднее, %**</i>			>59,6%		-		< 17,0		< 23,4
<i>Западная часть СИП</i>									
369	8,1 ± 3,0	6,6 ± 0,7	60,4	-	-	2,3 ± 0,6	21,3	< 2,0	< 18,3
119	16 ± 3	3,8 ± 0,6	28,1	-	-	< 1,5	< 11,2	8,0 ± 3,0	60,7
77	6 ± 1,2	5,1 ± 0,6	50,4	-	-	2,8 ± 0,5	27,7	< 2,2	< 21,9
175	5,8*	1,5 ± 0,6	5,1	-	-	3,6 ± 0,5	11,9	25 ± 2	83,0
560	7,9 ± 3,0	4,1 ± 0,6	40,8	-	-	2,9 ± 0,8	29,2	3,0 ± 1,0	30,0
457	5,8*	2,0 ± 0,6	18,5	-	-	6,0 ± 0,6	56,8	< 2,6	< 24,6
503	8,2 ± 0,8	3,5 ± 2,0	35,2	-	-	2,6 ± 0,6	25,6	4,0 ± 1,0	39,2
7	2,8 ± 0,5	2,8 ± 0,6	> 42,8	-	-	< 1,5	< 23,2	< 2,2	< 34,0
<i>Среднее, %**</i>			35,2		-		25,9		39,0

Таблица 6/2.

Содержание форм нахождения радионуклида ⁹⁰Sr (Бк/кг, % доля от суммарного содержания всех форм).

№ точки	Содержание ¹³⁷ Cs в почве	Обменная форма (1М CH ₃ COONH ₄)		Органическая форма (0,1 н NaOH)		Подвижная форма (1М HCl)		Прочносвязанная форма (почва)	
		Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%
<i>"Фоновые" территории</i>									
<i>Юго-восточная часть СИП</i>									
937	119 ± 20	2,6 ± 0,3	2,6	<0,6	< 0,6	1,1 ± 0,3	1,0	99 ± 19	95,8
1052	84,5 ± 20	< 0,3	< 0,5	6,5 ± 0,5	10,6	1,8 ± 0,3	2,9	53 ± 8	86,0
928	8,8 ± 1,3	4,6 ± 0,3	26,4	<0,4	< 2,3	2,5 ± 0,3	14,5	< 9,8	< 56,7
1159	21 ± 5	3,8 ± 0,3	16,4	<0,5	< 2,0	2,0 ± 0,4	8,6	17 ± 2,6	73,0
1557	5,5 ± 1,4	2,5 ± 0,4	34,4	<0,5	< 7,4	2,8 ± 0,3	37,9	2,0 ± 0,5	20,3
1670	< 8,3	1,5 ± 0,3	24,1	<0,5	< 7,6	1,5 ± 0,3	24,1	3,0 ± 1,0	44,1
1760	< 8,3	2,1 ± 0,3	42,5	<0,5	< 10,7	< 0,7	< 14,7	< 1,6	< 32,1
2132	11 ± 2	4,5 ± 0,4	50,1	<0,5	< 5,5	3,0 ± 0,3	34,2	< 0,9	< 10,1
2110	3,4 ± 0,8	1,9 ± 0,4	37,9	<0,5	< 9,3	1,3 ± 0,3	26,5	< 1,3	< 26,3
2011	4,0 ± 1,0	2,5 ± 0,3	46,1	<0,5	< 10,0	1,4 ± 0,3	25,3	< 1,0	< 18,5
2302	4,4 ± 0,9	2,9 ± 0,4	48,3	<0,6	< 9,2	1,3 ± 0,3	21,3	< 1,3	< 21,3
424	6,2*	5,3 ± 0,4	26,2	<0,5	< 2,6	3,7 ± 0,3	18,3	11 ± 3	52,8
365	6,2*	2,6 ± 0,3	13,8	<0,3	< 1,7	1,5 ± 0,3	8,2	< 14,4	< 76,3
258	8,5 ± 0,9	5,4 ± 0,4	31,4	<0,4	< 2,2	3,2 ± 0,3	18,8	< 8,2	< 47,7
97	8,3 ± 1,1	1,9 ± 0,3	17,1	<0,3	< 2,9	0,8 ± 0,2	7,4	< 8,0	< 72,6
113	6,2*	6,1 ± 0,4	23,0	<0,3	< 1,3	3,3 ± 0,3	12,2	17 ± 5	63,5
189	10,2 ± 2,0	5,1 ± 0,4	32,8	<0,4	2,5	2,4 ± 0,3	15,4	< 7,6	< 49,4
1187	4,1 ± 1,0	2,7 ± 0,3	21,3	<0,4	< 3,5	1,0 ± 0,3	7,7	< 8,7	< 67,5
<i>Среднее,%**</i>			27,5		< 5,1		16,6		50,8
<i>Южная часть СИП</i>									
5	5,1 ± 0,8	2,9 ± 0,3	19,3	< 0,5	< 3,6	1,5 ± 0,3	9,9	< 10,1	< 67,2
7	14,4*	1,3 ± 0,3	10,3	< 0,3	< 4,1	< 0,8	< 6,4	10 ± 4	79,2
8	14,4*	2,9 ± 0,3	14,5	< 0,6	< 3,2	< 0,6	< 2,8	16 ± 4	79,5
9	14,4*	3,6 ± 0,3	18,9	< 0,6	< 3,0	2,8 ± 0,4	14,6	12 ± 4	63,5
10	14,4*	3,6 ± 0,3	17,8	< 0,7	< 3,3	1,4 ± 0,3	7,1	14 ± 4	71,8
<i>Среднее,%**</i>			16,2		< 3,4		8,2		72,3
<i>Зоны прохождения "следа"</i>									
Термоядерное испытание от 12.08.1953г (400 кт) (юго-восточная территория СИП)									
1173	1750 ± 350	9,2 ± 0,4	0,6	< 1,0	< 0,1	4,2 ± 0,3	0,3	1500 ± 300	99,0
1274	2500 ± 400	3,9 ± 0,3	0,2	< 0,5	< 0,02	3,7 ± 0,4	0,2	2170 ± 390	99,6
1520	2400 ± 400	6,3 ± 0,4	0,3	< 0,5	< 0,02	4,3 ± 0,4	0,2	2400 ± 360	99,5
1745	650 ± 130	6,0 ± 0,4	0,9	< 0,7	< 0,1	2,2 ± 0,3	0,3	660 ± 130	98,7
1711	810 ± 160	2,7 ± 0,3	0,3	< 0,5	< 0,05	2,1 ± 0,3	0,2	1020 ± 150	99,5
725	118 ± 24	3,8 ± 0,3	2,7	< 0,4	< 0,3	2,6 ± 0,4	1,9	130 ± 25	95,1
838	430 ± 90	4,9 ± 0,3	0,8	< 0,4	< 0,1	3,9 ± 0,4	0,7	580 ± 130	98,4
761	240 ± 50	5,0 ± 0,4	2,3	< 0,7	< 0,3	4,2 ± 0,4	2,0	204 ± 40	95,4
855	520 ± 855	6,9 ± 0,4	1,1	48	7,9	5,1 ± 0,3	0,8	550 ± 110	90,2
<i>Среднее,%**</i>			1,0		< 1,0		0,7		97,3

Таблица 6/3.

Содержание форм нахождения радионуклида ^{90}Sr (Бк/кг, % доля от суммарного содержания всех форм).

№ точки	Содержание ^{137}Cs в почве	Обменная форма (1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$)		Органическая форма (0,1 н NaOH)		Подвижная форма (1М HCl)		Прочносвязанная форма (почва)	
		Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%	Бк/кг	%
<i>"Фоновые" территории</i>									
<i>Зоны прохождения "следа"</i>									
Наземное ядерное испытание от 24.09.1951г (38 кт) (южная территория СИП)									
1	31,6*	5,3 ± 0,4	8,6	< 0,6	< 1,0	1,9 ± 0,4	3,1	54 ± 6	87,3
2	31,6*	4,4 ± 0,4	5,7	< 0,9	< 1,3	2,8 ± 0,6	3,7	68 ± 7	89,3
3	31,6*	3,5 ± 0,4	7,2	< 0,6	< 1,3	< 0,8	< 1,5	44 ± 9	89,9
4	66 ± 16	3,6 ± 0,3	4,6	< 0,4	< 0,5	2,3 ± 0,3	2,9	72 ± 8	92,0
6	31,6*	2,8 ± 0,3	8,8	< 0,5	< 1,6	< 0,4	< 1,2	29 ± 7	88,4
<i>Среднее, %**</i>			7,0		< 1,1		2,5		89,4
<i>Площадка "Опытное поле"</i>									
1	29000±3800	105 ± 15	0,3	< 2,6	< 0,01	126 ± 17	0,4	35000±4200	99,3
2	7600±1200	55 ± 5	0,7	< 1,3	< 0,02	55 ± 5	0,7	7800±1200	98,6

* - среднее содержание радионуклида в почвах исследуемой зоны СИП

* - не определяли

** - При расчетах относительного содержания форм нахождения радионуклидов результаты определения удельной активности радионуклидов в вытяжках менее предела обнаружения методики принимались равными пределу обнаружения

Таблица 6. Содержание форм нахождения радионуклида ^{90}Sr (Бк/кг, % доля от суммарного содержания всех форм).

Результаты исследования ^{90}Sr выявили, наряду с прочносвязанными формами, наличие в почве значительных концентраций легкодоступных форм (обменная форма) и форм, представляющих потенциально доступный резерв для растений (подвижная форма). Причем, соотношение обменных и необменных форм радионуклида различно как для фоновых участков, так и для зон повышенного радиационного фона.

Максимальное содержание обменных и подвижных форм ^{90}Sr отмечается в "северной" и "западной" территориях, в наименьшей степени подвергшихся влиянию выпадений от испытаний на СИП. Содержание обменной формы на "северной" территории составляет более 59,6 %, на "западной" территории – не менее 35,2 % от суммарного содержания всех форм. Доля подвижной формы составляет около 17% на "северной" и 25,9% на "западной" территории. Соответственно, данные территории характеризуются минимальными значениями содержания прочносвязанной формы ^{90}Sr (менее 23,4 % и 39,0 %, соответственно). Для "западной" территории характерен значительный разброс данных относительно средних значений. На фоновые участки "юго-восточной" и "южной" территории СИП определенное влияние оказало

прохождение вблизи зон выпадений от наземных испытаний на площадке "Опытное поле". Так, на "юго-восточной" территории среднее содержание обменной формы радионуклида ^{90}Sr снижается до 27,5 %. Причем, минимальное содержание обменной формы ^{90}Sr отмечается в точках, наиболее близко расположенных к границе "следа" (т. 1052, т. 937). Прочносвязанная форма составляет долю менее 51,6 %. В "южной" части СИП влияние "следа" более выражено: доля обменной формы здесь минимальна – 16,2 %, а доля прочносвязанной формы максимальна для рассматриваемых зон и достигает в среднем 72,3 % от суммарного содержания всех форм. На "юго-восточной" территории отмечается значительная вариабельность данных содержания форм нахождения радионуклидов, что обусловлено неоднородностью характера радионуклидного загрязнения почв данной территории.

В зонах прохождения "следов" выпадений от наземных ядерных испытаний на площадке "Опытное поле" поведение радионуклида ^{90}Sr принципиально отличается. Доминирующей становится прочносвязанная форма, содержание которой достигает 97,3 % на "юго-восточной" территории и 89,4 % – на "южной" территории. Среднее значение доли обменной формы ^{90}Sr в зоне "следа" на "юго-восточной" территории уменьшается на два порядка относительно ее фоновых участков, а в "южной" части СИП – более чем в 2 раза. По характеру распределения

форм нахождения радионуклидов в почвах "следы" выпадений от наземных испытаний схожи с площадкой "Опытное поле", что является закономерным. Отметим, что площадка "Опытное поле" характеризуется минимальными значениями параметров относительной подвижности и биологической доступности радионуклидов в почвах на СИП [18].

На рисунке (Рис. 2) показана зависимость растворимости радионуклида ^{90}Sr в почве на оси "следа" термоядерного наземного испытания 1953 г от расстояния от площадки П-1 – места проведения испытания. На оси "следа" от термоядерного испытания было выявлено тенденция увеличения доли обменной и подвижной форм радионуклида на участках, максимально удаленных от эпицентра испытания (точки 838, 855). Представленные результаты исследования согласуются с результатами исследований, выявивших увеличение параметров накопления радионуклидов зональными растениями вдоль оси данного "следа" по мере удаления от эпицентра испытания [19].

Таким образом, формы нахождения радионуклида ^{90}Sr выявляют принципиально иной характер радионуклидного загрязнения почв условно "фоновых" территорий СИП, подвергшихся глобальным выпадениям и радиоактивным выпадениям от местных наземных ядерных испытаний.

Заключение

На основании результатов, полученных в ходе исследования условно "фоновых" территорий СИП, подвергшихся различным источникам загрязнения – глобальным выпадениям и радиоактивным выпадениям от местных наземных ядерных испытаний на площадке "Опытное поле", были выявлены следующие особенности:

- отмечены различия в содержании обменной и подвижной формы радионуклида на "фоновых" территориях и зонах "следов", которые могут обуславливать различную биологическую доступность ^{137}Cs , для растений, произрастающих на данных территориях. Выявлено

- уменьшение доли обменной и подвижной формы радионуклида в зоне "следов" выпадений от наземных ядерных испытаний "юго-восточной" (в 3 и 3,5 раза, соответственно) и "южной" (в 1,5 и 2 раза, соответственно) части СИП относительно их "фоновых" территорий, не подвергшихся влиянию местных испытаний. При этом в зоне "следа" от термоядерного испытания 1953г, данное изменение более выражено, чем на "следе" от наземного ядерного испытания 1951г. Преобладающее содержание радионуклида ^{137}Cs в почвах исследуемых территорий находится в прочносвязанной форме (не менее 93%), что является для данного радионуклида характерным;

- выявлено незначительное различие в количественном содержании органической фракции радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$ на "юго-восточной" части СИП, которая в зоне "следа" от термоядерного наземного испытания 1953 г составляет 0,7%, на "фоновой" части данной территории в два раза больше – 1,6%. В легкодоступной (обменной) форме радионуклид не обнаружен. Радионуклид $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах условно "фоновой" территорий СИП представлен преимущественно в прочносвязанной форме (не менее 98%);

- количественные содержания ^{241}Am отмечены в кислотных вытяжках и в прочносвязанной форме. В зоне "следов" максимум содержания радионуклида приурочен к прочносвязанной форме. На "фоновых" территориях отмечено незначительное увеличение доли подвижной формы радионуклида относительно зон "следов", а в некоторых случаях преобладание ее по содержанию над прочносвязанной формой. В обменной и органической форме радионуклид ^{241}Am не обнаружен;

- количественное соотношение форм нахождения радионуклида ^{90}Sr в почвах на условно "фоновых" территориях СИП неоднородно. На фоновых зонах ("северная" и "западная" части) СИП почвы характеризуются максимальным содержанием обменной (в среднем не менее 59,6% и 35,2%) и подвижной (17,0% и 25,9%) форм радионуклида. На участках, расположенных вблизи зон прохождения "следов" радиоактивных выпадений от наземных ядерных испытаний ("юго-восточная" и "южная" часть СИП), содержание обменной (27,5% и 16,2%) и по-

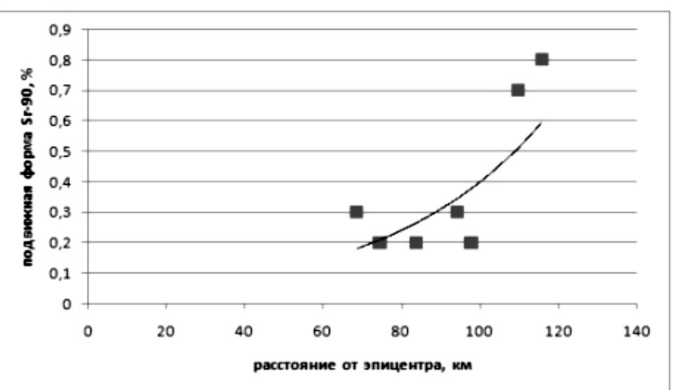
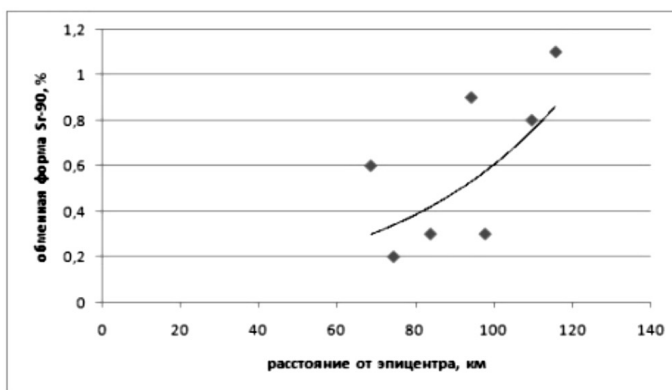


Рисунок 2. Увеличение относительного содержания обменной и подвижной формы радионуклида ^{90}Sr в почве на оси "следа" по мере удаления от эпицентра взрыва.

движной (16,6% и 8,2%) форм значительно снижается. Зоны прохождения "следов" выпадений на "юго-восточной" и "южной" части СИП характеризуются минимальными значениями содержания обменной (1,0 и 7,0%) и подвижной (0,7% и 2,5%) форм радионуклида и преобладанием прочносвязанной (97,3% и 89,4%) формы, что соответствует по характеру площадке "Опытное поле" – месту проведения рассматриваемых наземных ядерных взрывов. Соответствующее изменение форм нахождения радионуклида ^{90}Sr отмечено вдоль оси "следа" от термоядерного наземного испытания 1953 года по мере удаления от эпицентра испытания (П–1). С увеличением расстояния выявлено незначительное увеличение доли обменной и подвижной форм радионуклида.

Из всего вышесказанного определены следующие выводы:

- ◆ Выявленные различия форм нахождения данных

радионуклидов ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в зонах "следов" наземных испытаний и на "фоновых" территориях, с содержанием радионуклидов на уровне глобальных выпадений незначительны. Имеющиеся данные применимы в качестве базовых критериев для характеристики форм нахождения данных радионуклидов в почвах условно "фоновых" территорий СИП. Это позволит оптимизировать работы по изучению форм нахождения радионуклидов ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в рамках дальнейших работ по исследованию условно "фоновых" территорий СИП.

- ◆ В условиях СИП формы нахождения радионуклида ^{90}Sr в почвах являются показателем, определяющим различие характера радионуклидного загрязнения выпадениями от наземных ядерных испытаний и глобальными выпадениями. Данный показатель может быть применен в качестве дополнительного параметра для идентификации "следов" выпадений от наземных ядерных взрывов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлоцкая Ф.И. Относительная подвижность, состояние и формы нахождения стронция-90, стабильного стронция и кальция в почвах / Ф.И.Павлоцкая .– Москва, 1973. – 39с.
2. Актуальные вопросы радиозологии Казахстана [Радиозологическое состояние "Северной" части территории Семипалатинского испытательного полигона] / под рук. Лукашенко С.Н.– вып. 1. – Павлодар: Дом печати, 2010. – 234с. – ISBN 978-601-7112-28-8.
3. Стрильчук Ю.Г. Радиозологическое состояние "западной" части территории СИП / Ю.Г. Стрильчук, О.В. Тоневская, Ю.Ю. Яковенко // Актуальные вопросы радиозологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2010 г.] / под ред. С.Н. Лукашенко. – Т.2. – Вып. 3. – Павлодар: Дом печати, 2011. – С. 81–164.
4. Стрильчук Ю.Г. Радиозологическое состояние "юго-восточной" части территории СИП / Ю.Г. Стрильчук и др. // Актуальные вопросы радиозологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012 гг.] / под ред. С.Н. Лукашенко. – Т.1. – Вып. 4. – Павлодар: Дом печати, 2013. – С. 15–116.
5. Республиканская Бюджетная программа 005 "Обеспечение радиационной безопасности на территории Республики Казахстан": отчет о РБП 005 (информационный) по договору № 2/3 20.02.2012 / ИРБЭ НЯЦ РК; рук. Лукашенко С.Н. – Курчатов: ИРБЭ НЯЦ РК, 2012. – 178 с.
6. Почвы Казахской ССР. Павлодарская область. – Алма-Ата: Наука, 1960. – Вып. 3. – С. 265.
7. Почвы Казахской ССР. Карагандинская область. – Алма-Ата: Наука, 1967. – Вып. 8. – С. 330.
8. Почвы Казахской ССР. Семипалатинская область. – Алма-Ата: Наука, 1968. – Вып. 10. – С. 474.
9. Jeffrey R. Is there a future for sequential chemical extraction? / R. Jeffrey, Bacon, Christine M. Davidson // Analyst. – 2008. – P.25–46.
10. Пономарева В.В. Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения) / В.В. Пономарева, Т.А. Плотникова. – Л.: Наука, 1980. – 222с.
11. МИ 2143–91 № 5.06.001.98 Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. – Введ. 1998–06–02. – 1991. – 17с.
12. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного β -спектрометра с программным обеспечением "Прогресс" МВИ №40090.4Г006.
13. Методика выполнения измерений активности радионуклидов плутоний–238, плутоний–239+плутоний–240 в счетных образцах, приготовленных из проб объектов окружающей среды. Разработана ФГУП НПО Радиевый Институт им. В.Г. Хлопина.
14. Гребенщикова Н.В. Исследование закономерностей поведения радиоцезия в почвенно–растительном покрове Белорусского полесья после аварии на ЧАЭС / Н.В. Гребенщикова, С.К. Фирсакова, А.А. Новик [и др.] // Агрехимия. – 1992. – № 1. – С. 91–99.
15. Марей А.Н. Глобальные выпадения цезия–137 и человек / А.Н. Марей, Р.М. Бархударов, Н.Я. Новикова. – М.: Атомиздат, 1974. – 166 с.
16. Книжников В.А. Глобальные выпадения цезия как фактор облучения населения СССР после аварии на Чернобыльской АЭС / Книжников В.А., Бархударов Р.М., Брук Г.Я. // Материалы науч. конф. – Киев: Здоров'я, 1988. – С. 66.
17. Кундузбаева А.Е. Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах на территории площадки "Опытное поле". / А.Е. Кундузбаева, С.Н. Лукашенко, Р.Ю. Магашева // Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012 гг. / под ред. С.Н. Лукашенко. – Т.2. – Вып. 4. – Павлодар: Дом печати, 2013. – С. 181–208.
18. Ларионова Н.В. Поступление радионуклидов из почвы в растения в зоне радиоактивных выпадений при прохождении радиоактивного облака ("след" от взрыва 1953 года. / Н.В. Ларионова [и др.] // Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012 гг. / под ред. С.Н. Лукашенко. – Т.2. – Вып. 4. – Павлодар: Дом печати, 2013. – С. 159–166.