

ОЦЕНКА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА УСЛОВНО «ФОНОВЫХ» ТЕРРИТОРИЙ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Ларионова Н.В.¹, Лукашенко С.Н.¹

¹Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр» Республики Казахстан, Курчатов, e-mail: larionova@nnc.kz

В статье представлены результаты исследования параметров накопления искусственных радионуклидов растениями и оценка радиоактивного загрязнения растительного покрова условно «фоновых» территорий Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Приведены количественные данные параметров накопления радионуклидов ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu растениями (коэффициенты накопления – Кн). Получен ряд радионуклидов по их способности к накоплению растениями: Кн ⁹⁰Sr > Кн ¹³⁷Cs > Кн ²³⁹⁺²⁴⁰Pu. Установлены средние величины Кн ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu для условно «фоновых» территорий СИП, которыми принято считать средние геометрические (GM) – Кн ⁹⁰Sr = 0,25; Кн ¹³⁷Cs = 0,030; Кн ²³⁹⁺²⁴⁰Pu = 0,019. Предложены рекомендации и выполнена оценка радиоактивного загрязнения растительного покрова с использованием Кн, правильность которой подтверждена фактическими данными.

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон (СИП), радиоэкология, радиоактивное загрязнение, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, почвы, растения, коэффициенты накопления (Кн).

ASSESSMENT OF RADIOACTIVE CONTAMINATION IN VEGETATION COVER AT CONVENTIONALLY “BACKGROUND” TERRITORIES OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE

Larionova N.V.¹, Lukashenko S.N.¹

¹Branch “Institute of Radiation Safety and Ecology”, Republican State Enterprise “National Nuclear center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, e-mail: larionova@nnc.kz

The article presents findings for parameters of artificial radionuclides build-up by plants and assessment of radioactive contamination in the vegetation cover at conventionally “background” territories of the Semipalatinsk test site (STS). Figures for parameters of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu artificial radionuclides build-up in plants (accumulation factors – Af) have been provided. A number of radionuclides have been obtained by their accumulation capacity in plants: ⁹⁰Sr Af > ¹³⁷Cs Af > ²³⁹⁺²⁴⁰Pu Af. Means of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu Af for conventionally “background” territories of STS which are commonly believed to be geometrical means (GM) – ⁹⁰Sr Af = 0.25; ¹³⁷Cs Af = 0.030; ²³⁹⁺²⁴⁰Pu Af = 0.019. Recommendations were proposed and assessment made of radioactive contamination of vegetation cover using Af correctness of which is confirmed by factual data.

Keywords: Semipalatinsk test site (STS), radioecology, radioactive contamination, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, soils, plants, accumulation factors (Af).

Оценка радиоактивного загрязнения растительного покрова – один из важнейших этапов при проведении радиоэкологических работ, так как растения являются неотъемлемой частью пищевой цепи «почва-растение-животное-человек». Определяющим параметром в этом случае выступает удельная активность радионуклидов в надземной части растений, которая может быть установлена непосредственно прямым измерением или рассчитана на основании удельной активности радионуклидов в почве. Для количественной оценки поступления радионуклидов из почвы в растения используется один из наиболее широко применяемых показателей – коэффициент накопления (Кн) – отношение содержания радионуклида в единице массы растений и почвы соответственно.

Учитывая большую площадь Семипалатинского испытательного полигона (СИП), которая составляет 18 300 км², более экономически выгодно для оценки радиоактивного загрязнения растительного покрова использовать именно Кн. Исходя из природы процессов, происходящих при проведении ядерных испытаний либо испытаний с использованием радиоактивных веществ, обусловивших характер радиоактивного загрязнения различных территорий СИП, можно предположить, что Кн для них могут существенно различаться. Чтобы получить достоверные средние значения Кн радионуклидов для всех территорий СИП, их исследование должно основываться на учете видов проведенных испытаний и механизмов формирования радиоактивного загрязнения.

Средние значения Кн радионуклидов ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am на территории СИП ранее были получены для эпицентров наземных испытаний, «следов» радиоактивных выпадений, зон радиоактивных водотоков и мест испытаний боевых радиоактивных веществ (БРВ) [4] (табл. 1).

Таблица 1

Средние значения коэффициентов накопления (Кн) радионуклидов ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am для отдельных территорий СИП

Территории СИП	Средние значения Кн радионуклидов			
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am
	n = 275	n = 276	n = 159	n = 96
Эпицентры наземных испытаний	0,0028	0,023	0,0014	0,00052
«Следы» радиоактивных выпадений	0,020	0,026	0,0068	0,0056
Зоны радиоактивных водотоков	0,20	1,7	0,0059	-
Места испытаний БРВ	-	1,2	-	-

n – общее число случаев

Основной целью данной работы стало обобщение средних Кн и оценка радиоактивного загрязнения растительного покрова условно «фоновых» территорий СИП.

Материалы и методы исследования

Для получения Кн на условно «фоновых» территориях СИП всего было заложено 55 исследовательских площадок: 14 – в «северной» его части, 22 – в «западной» и 19 – в «юго-восточной» (рис. 1). На каждой площадке произведен отбор смешанной пробы почвы (методом «конверта» на глубину 5 см) и надземной части растений (площадь отбора ~ 2 кв. м). Травостой представлен степным разнотравьем с доминированием ковылей (*Stipa capillata*, *S. sareptana*, *S. lessingiana*), типчака (*Festuca valesiaca*) и полыней (*Artemisia gracileccens*, *A. frigida*). Для прямой оценки радиоактивного загрязнения растительного покрова дополнительно заложено 15 исследовательских площадок в «южной» части СИП (рис. 1): на 10 произведен отбор надземной части растений, представленных двумя видами (ковыль (*Stipa sareptana*) и полынь (*Artemisia gracileccens*)), на 5 – смешанных образцов степного разнотравья.

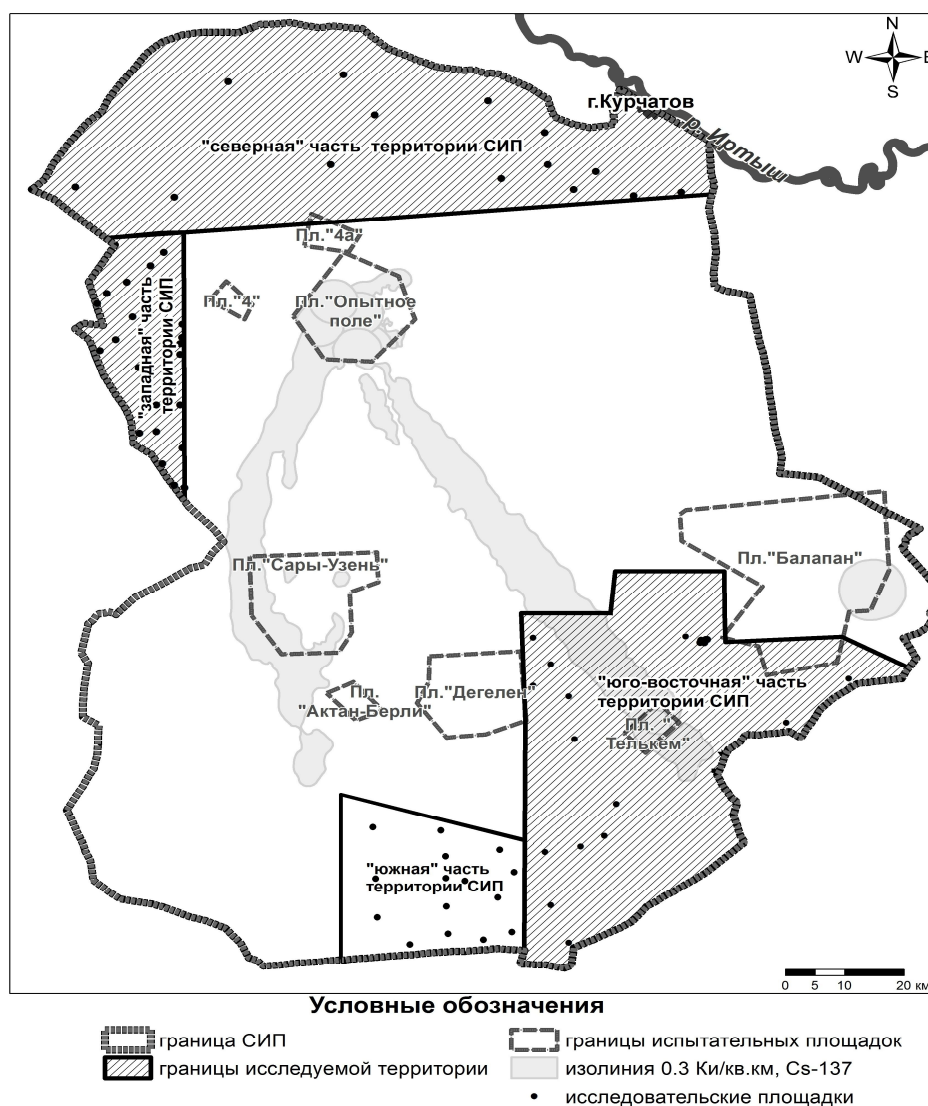


Рис. 1. Схема территории СИП

Определение удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am [1] проводилось на гамма-спектрометре Canberra GX-2020, ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ [6] – радиохимическим выделением с последующим измерением на бета-спектрометре TRI-CARB 2900 TR и альфа-спектрометре Canberra (мод. 7401) соответственно. Концентрация радионуклидов в растениях определялась в золе, с последующим пересчетом на сухое вещество. Предел обнаружения по ^{137}Cs составлял 1 Бк/кг (для проб растений) и 4 Бк/кг (для проб почвы), ^{241}Am – 0,02 и 0,5 Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,1 и 1 Бк/кг, ^{90}Sr – 1 и 5 Бк/кг соответственно. Дополнительно для определения ^{90}Sr применяли бета-спектрометр «Прогресс» [5], предел обнаружения по ^{90}Sr составил 100 Бк/кг. Погрешность измерений для ^{137}Cs и ^{241}Am не превышала 10-20%, ^{90}Sr – 15-25%, $^{239+240}\text{Pu}$ – 30%.

Результаты исследования и их обсуждение

Коэффициенты накопления (Кн) для условно «фоновых» территорий СИП

По данным проведенного радионуклидного анализа, значения удельной активности ^{137}Cs в почвах «северной», «западной» и «юго-восточной» территорий составили от 4,5 до 110

Бк/кг, ^{241}Am – не превысило 17 Бк/кг. Содержание в почвах радионуклидов ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в отдельных случаях достигало 200 Бк/кг (табл. 2).

Таблица 2

Удельная активность радионуклидов в почвах

Территория	Диапазон значений удельной активности, Бк/кг							
	^{137}Cs		^{90}Sr		^{241}Am		$^{239+240}\text{Pu}$	
	min	max	min	max	min	max	min	max
«Северная» часть СИП	24±1	110±2	-*	13±6,4	0,5±0,2	7,3±0,4	5,2±0,3	14,2±0,7
«Западная» часть СИП	4,5±0,	79±2	-*	28±8	-*	17±4	-*	101±6
«Юго-восточная» часть	24±2	87±2	-*	200±10	-*	5,3±0,5	1,7±0,2	190±6

* – ниже предела обнаружения

Значения Кн получены для радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$, для ^{241}Am – установить не удалось из-за отсутствия количественных величин удельной активности данного радионуклида в растениях (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты накопления (Кн) ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$

Радионуклиды	n	min – max	GM	GSD	AM	SD
<i>«Северная» часть СИП</i>						
^{137}Cs	15	0,003 – 0,056	0,014	2,6	0,020	0,016
^{90}Sr	1	–	–	–	–	–
$^{239+240}\text{Pu}$	9	0,012 – 0,095	0,024	2,1	0,033	0,031
<i>«Западная» часть СИП</i>						
^{137}Cs	12	0,01 – 0,15	0,034	2,6	0,052	0,050
^{90}Sr	3	0,15 – 1,73	0,53	3,4	0,81	0,82
$^{239+240}\text{Pu}$	13	0,002 – 0,21	0,018	4,1	0,042	0,060
<i>«Юго-восточная» часть СИП</i>						
^{137}Cs	13	0,012 – 0,3	0,063	2,8	0,10	0,10
^{90}Sr	14	0,0079 – 0,84	0,22	4,2	0,39	0,29
$^{239+240}\text{Pu}$	11	0,00075 – 0,11	0,018	3,6	0,031	0,031

n – число случаев; GM – среднее геометрическое, GSD – стандартное отклонение от среднего геометрического, AM – среднее арифметическое, SD – стандартное отклонение

Результаты показывают, что параметры накопления радионуклидов растениями на перечисленных условно «фоновых» территориях СИП изменяются в широких пределах. Диапазон значений Кн ^{137}Cs варьирует до 2-х порядков, ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ достигает 3-х порядков. В наибольшей степени в растениях накапливается радионуклид ^{90}Sr , в наименьшей степени – $^{239+240}\text{Pu}$. Для большей наглядности проведено обобщение всех полученных данных по Кн для условно «фоновых» территорий. Сравнительное распределение полученных Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ представлено в виде гистограммы частоты встречаемости их значений, выраженных в виде десятичных логарифмов (lg Кн) (рис. 2).

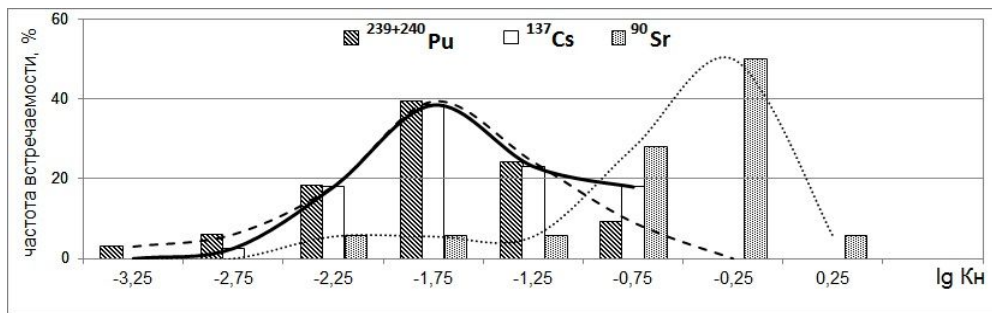


Рис. 2. Распределение значений $\lg K_n$ ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$

Представленная гистограмма наглядно демонстрирует, что накопление всех исследуемых радионуклидов изменяется в следующем ряду убывания:

$$K_n \text{ } ^{90}\text{Sr} > K_n \text{ } ^{137}\text{Cs} > K_n \text{ } ^{239+240}\text{Pu}.$$

Для количественной оценки разницы в накоплении радионуклидов растениями рассчитаны отношения: $K_n \text{ } ^{90}\text{Sr} / K_n \text{ } ^{137}\text{Cs} \approx 8,3$; $K_n \text{ } ^{137}\text{Cs} / K_n \text{ } ^{239+240}\text{Pu} \approx 1,6$.

Таким образом, если накопление радионуклида ^{90}Sr растениями принять за единицу, то установленный ряд убывания имеет следующий вид:

$$\begin{array}{ccc} K_n \text{ } ^{90}\text{Sr} & > & K_n \text{ } ^{137}\text{Cs} & > & K_n \text{ } ^{239+240}\text{Pu} \\ 1 & & 0,12 & & 0,075 \end{array}$$

Характер распределения $\lg K_n$ для условно «фоновых» территорий близок к нормальному, поэтому в качестве средних величин K_n наиболее верно будет использовать средние геометрические (GM): $K_n \text{ } ^{137}\text{Cs} = 0,030$; $K_n \text{ } ^{90}\text{Sr} = 0,25$; $^{239+240}\text{Pu} = 0,019$.

Рекомендации по оценке радиоактивного загрязнения растительного покрова

Учитывая разницу в K_n для различных территорий СИП, для оценки радионуклидного загрязнения растительного покрова рекомендуется выделить собственно условно «фоновых» территорий, а также участков, сформировавшихся в результате наземных испытаний, радиоактивных выпадений, выноса радионуклидов с водотоками и проведения испытаний БРВ.

В случае исследования радионуклидного загрязнения растительного покрова территории, сформировавшегося в результате наземных испытаний, рекомендуется использовать K_n , полученные для эпицентров наземных испытаний: $K_n \text{ } ^{137}\text{Cs} - 0,0028$; $^{90}\text{Sr} - 0,023$; $^{239+240}\text{Pu} - 0,0014$; $^{241}\text{Am} - 0,00052$. Для оценки радионуклидного загрязнения растительного покрова, сформировавшегося в результате радиоактивных выпадений, рекомендуется использовать K_n , полученные для так называемых следов радиоактивных выпадений: $K_n \text{ } ^{137}\text{Cs} - 0,020$; $^{90}\text{Sr} - 0,026$; $^{239+240}\text{Pu} - 0,0068$; $^{241}\text{Am} - 0,0056$. Оценку радионуклидного загрязнения растительного покрова в зонах выноса радионуклидов с водотоками рекомендуется проводить с использованием K_n , полученных в зонах радиоактивных водотоков штолен: $K_n \text{ } ^{137}\text{Cs} - 0,20$; $^{90}\text{Sr} - 1,7$; $^{239+240}\text{Pu} - 0,0059$. В качестве $K_n \text{ } ^{90}\text{Sr}$ для мест испытания БРВ рекомендуется использовать значение 1,2 (табл. 1).

На условно «фоновых» территориях для оценки радионуклидного загрязнения растительного покрова рекомендуется использовать Кн, полученные в «северной», «западной» и «юго-восточной» частях СИП: Кн ^{137}Cs – 0,030; ^{90}Sr – 0,25; $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,019. Эти же значения Кн ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ рекомендуется использовать на участках проведения испытаний БРВ, поскольку предполагается, что данная территория загрязнена лишь радионуклидом ^{90}Sr .

Из-за отсутствия количественных величин Кн ^{241}Am для условно «фоновых» территорий, зон радиоактивных водотоков и мест испытания БРВ в качестве средних значений рекомендуется использовать значение 0,002, приведенное для пастбищных трав на характерных для территории СИП суглинистых почвах в материалах МАГАТЭ (2009 г.) [7].

Оценка радиоактивного загрязнения растительного покрова условно «фоновых» территорий СИП

Для оценки радиоактивного загрязнения условно «фоновых» территорий рассмотрена «южная» часть СИП (рис. 1), для которой, по данным площадного распределения радионуклидов в почве, выделено две зоны: 1 – зона «следа» радиоактивных выпадений и 2 – непосредственно условно «фоновые» территории (рис. 3).

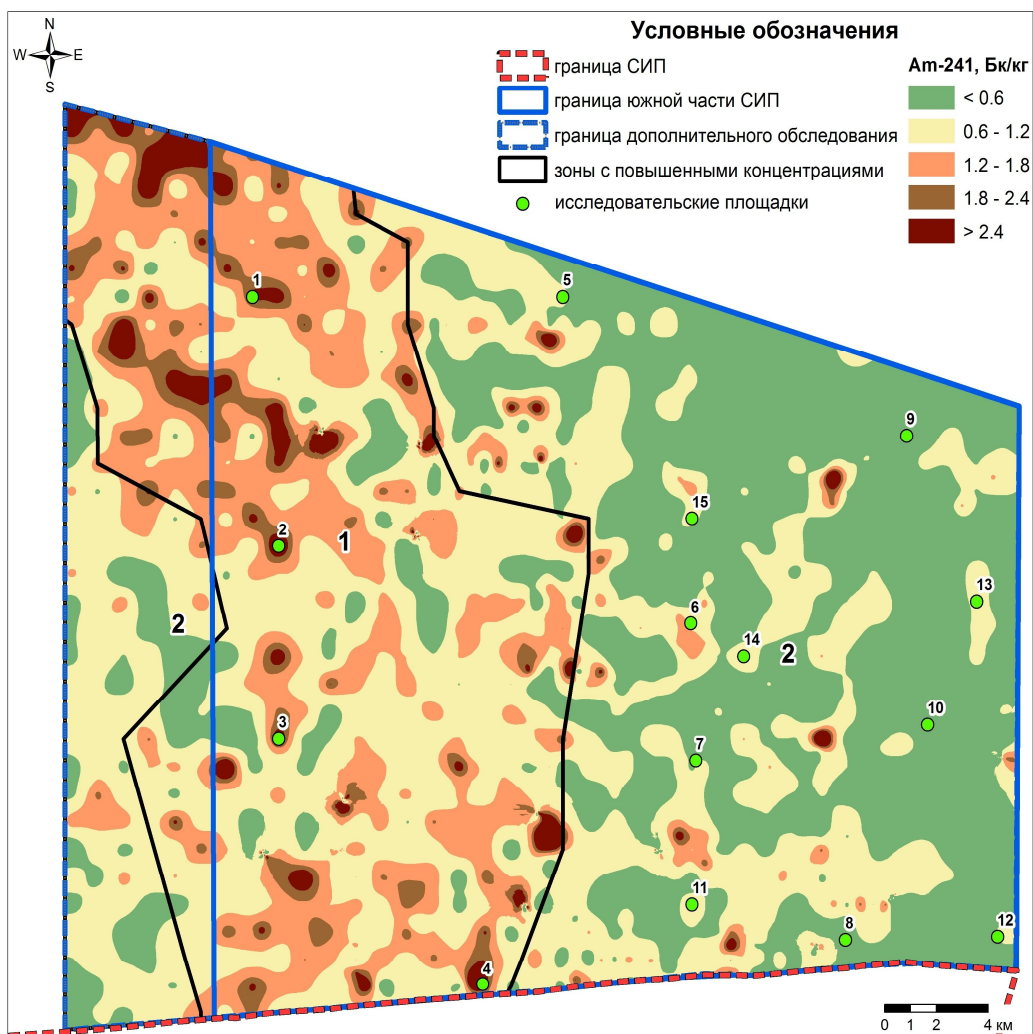


Рис. 3. Схема расположения исследовательских площадок

Для теоретической оценки радионуклидного загрязнения растительного покрова 1-й зоны «южной» части СИП использованы Кн, полученные ранее для «следов» радиоактивных выпадений, 2-й зоны – для условно «фоновых» территорий СИП. В качестве средних значений Кн ^{241}Am из-за отсутствия количественных величин для условно «фоновых» территорий использованы Кн данного радионуклида, приведенные в материалах МАГАТЭ (2009 г.) [7]. Учитывая принятые значения Кн и средние значения удельной активности (УА) радионуклидов в почве, рассчитано среднее содержание ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в растениях (табл. 4).

Таблица 4

Расчет удельной активности искусственных радионуклидов в растениях

Зона	Средние значения	Искусственные радионуклиды			
		^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$	^{241}Am
1	Кн	0,020	0,026	0,0068	0,0056
	Средняя УА в почве, Бк/кг	44,5	31,6	19,3	1,4
	Расчетная УА в растениях, Бк/кг	0,89	0,082	0,1	0,0078
2	Кн	0,030	0,25	0,019	0,002
	Средняя УА в почве, Бк/кг	20,3	14,4	4,6	0,7
	Расчетная УА в растениях, Бк/кг	0,6	3,6	0,087	0,0014

Для оценки правильности представленного расчета для исследуемой территории «южной» части СИП получены значения удельной активности ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{241}Am в дополнительно отобранных 15 пробах растений. В таблице 5 представлены значения удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{241}Am в отобранных пробах растений, средние значения удельной активности данных радионуклидов в растениях (при расчете значения ниже предела обнаружения приняты за количественные) и средние расчетные значения.

Таблица 5

Удельная активность радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{241}Am в растениях

Зона	Точка отбора	Растения	Удельная активность (УА) радионуклидов, Бк/кг		
			^{241}Am	^{137}Cs	^{90}Sr
1	1	КОВЫЛЬ	< 0,2	$0,5 \pm 0,1$	< 100
		ПОЛЫНЬ	< 0,1	$0,8 \pm 0,2$	< 100
	2	КОВЫЛЬ	< 0,4	< 0,7	< 100
		ПОЛЫНЬ	< 0,6	< 2,3	< 100
	3	ПОЛЫНЬ	< 0,1	< 0,13	< 100
		КОВЫЛЬ	< 0,1	< 0,2	< 100
	4	КОВЫЛЬ	< 0,1	< 0,4	< 100
		ПОЛЫНЬ	< 0,4	< 1	< 100
<i>Средняя УА в растениях, Бк/кг</i>			<i>0,25</i>	<i>0,75</i>	<i>100</i>
<i>Расчетная УА в растениях, Бк/кг</i>			<i>0,0078</i>	<i>0,89</i>	<i>0,082</i>
2	5	КОВЫЛЬ	< 0,1	< 0,1	$3 \pm 0,7$
		ПОЛЫНЬ	< 0,1	< 0,5	< 100
	6	КОВЫЛЬ	< 0,1	< 1	< 100

Зона	Точка отбора	Растения	Удельная активность (УА) радионуклидов, Бк/кг		
			²⁴¹ Am	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
		полынь	< 0,1	< 0,7	< 100
	7	ковыль	< 0,2	< 1	< 100
		полынь	< 0,1	2,3 ± 0,5	< 100
	8	ковыль	< 0,1	< 0,4	< 100
		полынь	< 0,7	2,3 ± 0,5	< 100
	9	ковыль	0,33 ± 0,07	< 0,1	12 ± 2
		полынь	< 0,1	< 0,3	8,3 ± 1,2
	10	ковыль	< 0,1	1,2 ± 0,2	< 100
		полынь	< 0,2	1,4 ± 0,3	< 100
	11	разнотравье	< 0,084	< 0,5	-
	12	разнотравье	< 0,099	< 0,2	-
	13	разнотравье	< 0,08	< 0,3	-
	14	разнотравье	< 0,2	< 0,2	-
	15	разнотравье	< 0,068	< 0,4	-
<i>Средняя УА в растениях, Бк/кг</i>			<i>0,16</i>	<i>0,76</i>	<i>77</i>
<i>Расчетная УА в растениях, Бк/кг</i>			<i>0,0014</i>	<i>0,6</i>	<i>3,6</i>
- данные отсутствуют					

Полученные значения удельной активности радионуклидов в отобранных пробах растений для «следа» радиоактивных выпадений (1-я зона) оказались практически сравнимы с установленными средними значениями удельной активности, полученными в ходе теоретического расчета. Непосредственно же для условно «фоновых» территорий (2-я зона) отдельные значения удельной активности радионуклидов в отобранных пробах растений в некоторых случаях превышают среднюю расчетную удельную активность радионуклидов в растениях. Данное обстоятельство может быть связано с неравномерностью содержания радионуклидов в растительном покрове и характеризует возможные повышенные (или максимальные) значения их удельной активности в растениях на исследуемой территории. Однако в абсолютном большинстве случаев полученные значения удельной активности радионуклидов в отобранных пробах растений находятся ниже пределов обнаружения используемой аппаратуры и не противоречат расчетным величинам.

Выводы

По результатам проведенных исследований установлено, что для условно «фоновых» территорий СИП диапазон значений Кн ¹³⁷Cs варьирует до 2 порядков, ⁹⁰Sr и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu достигает 3 порядков. Ряд убывания радионуклидов по их способности к накоплению растениями имеет следующий вид: Кн ⁹⁰Sr > Кн ¹³⁷Cs > Кн ²³⁹⁺²⁴⁰Pu. Значения Кн ⁹⁰Sr в среднем в 8,3 раза превышают Кн ¹³⁷Cs и до 13 раз Кн ²³⁹⁺²⁴⁰Pu.

В качестве средних величин Кн ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu для условно «фоновых» территорий СИП принято считать средние геометрические (GM) – Кн ⁹⁰Sr = 0,25; Кн ¹³⁷Cs = 0,030; Кн ²³⁹⁺²⁴⁰Pu = 0,019. Предложенные рекомендации и оценка радиоактивного

загрязнения растительного покрова с использованием Кн оправдывают себя, подтверждены фактическими данными и являются оптимальными.

Список литературы

1. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре: МИ 2143-91. - Введ. 1998-06-02. - Рег. № 5.06.001.98. – М. : НПО ВНИИФТРИ, 1991. - 18 с.
2. Ларионова Н.В. Параметры накопления техногенных радионуклидов растениями на различных участках бывшего СИП // Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко // Тобольск научный - 2012: IX Всероссийская (науч.-практическая конф. с междунар. участием), 9-10 ноября 2012 г. – Тюмень : ОАО «Тюменский изд. дом», 2012. – С. 32-36.
3. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного бета-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». - Менделеево, 2004. - 20 с.
4. Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90 в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях) : Алматы, 2010. - 25 с.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments, IAEA -TECDOC-1616. – Vienna : IAEA, 2009.