

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ПО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИМ ФРАКЦИЯМ ПОЧВ НА УСЛОВНО "ФОНОВЫХ" ТЕРРИТОРИЯХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

INVESTIGATION OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN PARTICLE-SIZE FRACTION OF SOILS AT CONDITIONALLY "BACKGROUND CONTAMINATED" AREAS OF SEMIPALATINSK TEST SITE

*A. Kabdyrakova  
A. Kunduzbayeva  
S. Lukashenko  
N. Larionova  
T. Baiserkenova  
A. Mendubaev*

## Annotation

Peculiarities of artificial radionuclides distribution in particle-size fractions of soils at conditionally "background contaminated" territories of Semipalatinsk Test Site (STS) and fallout plumes of ground nuclear explosions conducted 24.09.1951 and 12.08.1953 (thermonuclear) at the test site are examined. Conditionally "background contaminated" territories are some parts of Semipalatinsk Test Site territory where nuclear tests were not conducted but radiation situation was caused by local and global fallouts. Enrichment factor (EF) was used for quantitative assessment of radionuclides distribution in particle-size fractions of soils which was calculated as a ratio of particle-size fraction-to-soil activity concentrations. On the conditionally "background contaminated" territories the rising trend of activity concentrations of radionuclides and the highest accumulation in fraction <1  $\mu$ m were revealed (EF = 1,9–3,9). On the fallout plumes of ground nuclear explosions fractions enriched with radionuclides were identified. The size of enriched fraction on the fallout plume of ground nuclear explosion of 24.09.1951 is 40–8  $\mu$ m, on the fallout plume of ground nuclear explosion of 12.08.1953 г – 500–250  $\mu$ m. The average values of EF are 1,7–2,2 and 1,5–3,0 respectively. The signs of presence of enriched fractions were also observed on the conditionally "background contaminated" territories what can indicative of ground nuclear explosions impact on this territories. Alternative method of calculation of radionuclide's activity concentrations in air by using average value of EF, average activity concentration in soils and average annual dustiness of air was suggested.

**Keywords:** artificial radionuclides, distribution, soil, particle-size fractions, Semipalatinsk Test Site, conditionally "background contaminated" territories, fallout plumes.

*Кабдыракова Алуа Мырзагазиновна  
Нач. лаборатории  
Кундузбаева Асия Еркебековна  
Нач. лаборатории  
Лукашенко Сергей Николаевич  
Рук. филиала – зам. Ген. директора  
Ларионова Наталья Владимировна  
Нач. лаборатории  
Байсеркенова Тогжан Нурматовна  
Инженер  
Меньдубаев Аян Тюлюгенович  
Инженер*

*Филиал "Институт радиационной безопасности и экологии" Республиканского Государственного Предприятия "Национальный Ядерный Центр Республики Казахстан", Курчатов, Казахстан*

## Аннотация

Рассмотрены особенности распределения искусственных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  по гранулометрическим фракциям почвы на условно "фоновых" территориях Семипалатинского испытательного полигона (СИП) и следах радиоактивных выпадений от наземных ядерных испытаний, проведенных 24.09.1951 г. и 12.08.1953 г. (термоядерный) на полигоне. Условно "фоновые" территории это части территории СИП, непосредственно на которых не проводились ядерные испытания, но радиационная обстановка обусловлена местными и глобальными выпадениями. Для количественной оценки распределения искусственных радионуклидов по гранулометрическим фракциям почвы был использован безразмерный параметр – коэффициент обогащения ( $K_0$ ), определяемый как отношение удельной активности радионуклида в гранулометрической фракции к удельной активности того же радионуклида в соответствующей исходной почве. На условно "фоновых" территориях выявлена тенденция роста концентрации радионуклидов с уменьшением размеров фракции и наибольшего накопления во фракции размером <1  $\mu$ m ( $K_0 = 1,9–3,9$ ). На следах радиоактивных выпадений наземных испытаний выявлены "обогащенные" радионуклидами фракции – носители активности характерных размеров. На следе наземного испытания от 24.09.1951 г размер "обогащенной" фракции составляет 40–8  $\mu$ m, на следе термоядерного взрыва, произведенного 12.08.1953 г – 500–250  $\mu$ m. Средние значения  $K_0$ , составляют 1,7–2,2 и 1,5–3,0 соответственно. Признаки присутствия "обогащенных" фракций также отмечены на условно "фоновых" территориях, свидетельствующие о воздействии наземных ядерных испытаний на данные территории. Предложен альтернативный расчетный способ определения объемной активности искусственных радионуклидов в воздухе используя значения  $K_0$  фракций почвы размером <10  $\mu$ m, среднее содержание радионуклидов в почве и среднюю запыленность воздуха.

## Ключевые слова:

Искусственные радионуклиды, распределение, почва, гранулометрические фракции, Семипалатинский испытательный полигон, условно "фоновые" территории, следы выпадений

## Введение

Атмосферные выпадения радиоактивных веществ на земную поверхность в зависимости от их дисперсности и форм нахождения радионуклидов формируют определенный характер распределения последних между структурными компонентами почвы. Особенности взаимодействия радионуклидов с компонентами почвенного комплекса определяют их миграционную способность и темпы включения в остальные экологические звенья.

Анализ литературных данных показал, что множество авторов отмечают наибольшее концентрирование радионуклидов в тонких почвенных фракциях. Исследователями США и Казахстана в разное время исследований было обнаружено, что в зонах локальных выпадений (следов) от ядерных взрывов по мере отдаленности от эпицентра взрыва количество  $Pu$  в тонких фракциях почвы возрастает. Так, на участках следа взрыва "Тринити" в шт. Нью-Мексико (США) на расстояниях от 1 до 45 км доля активности  $Pu$  во фракции размером  $<53$  мкм возросла от 0,8 % до 73% [1]. На расстоянии более 100 км от эпицентра термоядерного взрыва 1953 г (село Саржал) на Семипалатинском испытательном полигоне (Казахстан) содержание  $^{239+240}Pu$  во фракции почвы  $<100$  мкм достигало 95 % от удельной активности [2].

Обогащение тонких почвенных фракций ( $<100$  мкм) радионуклидами отмечено и в местах, подвергшихся загрязнению в результате аварий на АЭС (Чернобыль, Ураина; Фукусима, Япония) [3], [4], [5]. Наряду с этим обогащена радионуклидами чернобыльских выпадений и крупная фракция размером  $>500$  мкм. Авторы [1] выражают мнение, что причиной отмечаемого факта является сорбция крупными почвенными частицами и агрегатами или мелкими растительными остатками и органическим веществом почвы высокоактивных аэрозольных частиц более мелкого класса дисперсности.

Факты аккумуляции радионуклидов в тонких фракциях почвы также установлены в зонах влияния объектов атомной промышленности и исследовательских лабораторий (Красноярский горно-химический комбинат (Россия), Лос-Аламосская национальная лаборатория (США)) [6], [7].

В результате различных ядерных испытаний на Семипалатинском испытательном полигоне (Казахстан) продукты взрыва поступали в окружающую среду в виде высокоактивных полидисперсных частиц. Ранее проведенные исследования распределения долгоживущих искусственных радионуклидов как  $^{137}Cs$ ,  $^{90}Sr$ ,  $^{241}Am$  и  $^{239+240}Pu$  по гранулометрическим фракциям почвы на полигоне в основном были приурочены к местам с довольно высоким уровнем радиоактивного загрязнения и носили эпизодический характер.

Изучение распределения радионуклидов по гранулометрическим фракциям почвы имеет существенное значение для оценки реального риска загрязнения воздушного бассейна, ингаляционной опасности тех или иных радиационноопасных объектов, вторичного ветрового переноса радиоактивных веществ, особенно трансуранических радионуклидов, поступающих в организм в основном ингаляционно. Целью данной работы являлась определение особенностей распределения основных дозобразующих радионуклидов Семипалатинского испытательного полигона по почвенным фракциям различной степени дисперсности на некоторых его условно "фоновых" территориях.

456 ядерных испытаний, проведенных с 1949 по 1989 годы, обусловили современное радиоэкологическое состояние Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Территория Семипалатинского испытательного полигона занимает площадь 18,3 тыс. км<sup>2</sup>, из которых лишь около 10% приходится на долю основных испытательных площадок. Непосредственно на всей остальной части территории СИП какие-либо ядерные испытания не проводились. Данные территории получили название "условно "фоновые" территории".

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

## 1.1. Объекты исследования.

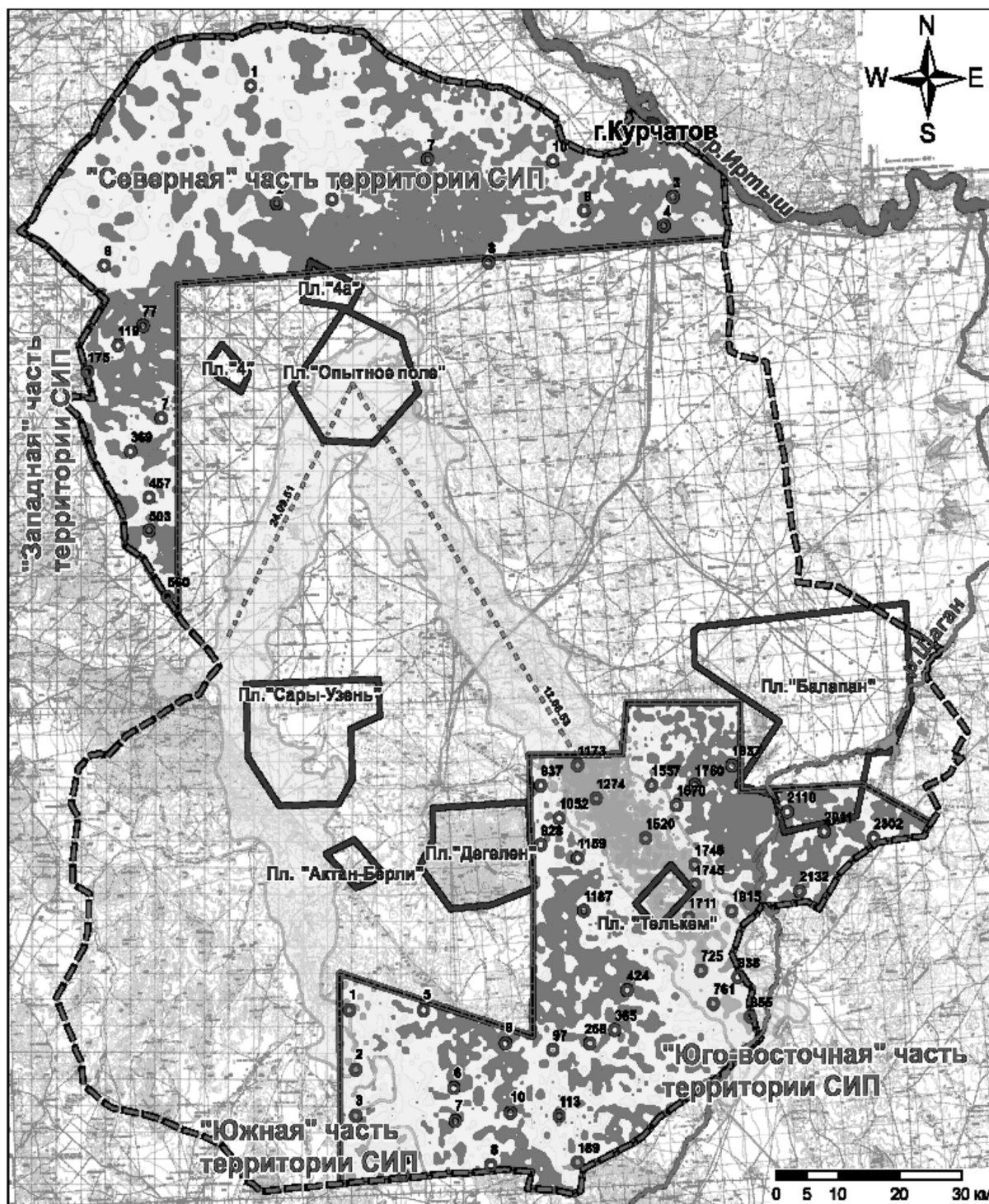
Объектом исследования являлись условно "фоновые" "северной", "западной", "юго-восточной" и "южной" территорий СИП. Географическое расположение исследованных территорий, карта площадного распределения удельной активности  $^{137}Cs$  в почвенном покрове и схема расположения точек отбора проб почвы представлены на Рис. 1.

## 1.2. Отбор проб.

Для исследований отбирались пробы верхнего 5 см слоя почвы методом "конверт" или точно. Площадь отбора составляла 600–800 см<sup>2</sup>. Масса отобранных образцов составляла в среднем около 3 кг. В каждой точке отбора определялись географические координаты (широта и долгота) с помощью GPS – навигатора (Garmin), также измерялись мощность экспозиционной дозы (МЭД) и плотность потока  $\beta$ -частиц с использованием дозиметра-радиометра МКС-АТ 6130 фирмы "Атомтех". Общая схема расположения точек отбора проб на исследуемых территориях представлена на Рис. 1.

## 1.3. Подготовка образцов к анализу.

Образцы почвы высушивались в сушильном шкафу при температуре не более 60 оС. Из высушенного образца почвы удалялись крупные камни и растительные включения, после чего сухая проба пропусклась через сито с размером ячеек 1 мм.



**Условные обозначения**

	граница СИП		Удельная активность, Св-137, Бк/кг
	границы исследуемой территории		<15
	границы испытательных площадок		15-30
	изолиния 0,25 Ки/кв. км, Св-137		30-60
	ось следа ядерного испытания		60-120
	точки отбора проб		>120

Рисунок 1. Схема расположения точек отбора проб на условно "фоновых" территориях СИП.

**1.4. Фракционирование почвы.**

При исследовании гранулометрического (зернового) состава и разделении почв на гранулометрические фракции были последовательно использованы два метода: "мокрый" ситовой рассев и седиментация. Методом "мокрого" ситового отсева были выделены фракции 1000–500; 500–250; 250–100; 100–63, 63–40 мкм, седиментационным методом – фракции 40–8 мкм, 8–5 мкм, 5–1 мкм и <1 мкм.

Выделенные седиментационным методом гранулометрические фракции почвы исследовались под оптическим микроскопом с целью определения размеров частиц и чистоты выделения фракции. Размеры частиц определялись с помощью микроной сетки. На рис. 2 представлены фрагменты микрофотографий исследованных образцов фракций.

**1.5. Радионуклидный анализ.**

В каждой выделенной фракции определялось содержание исследуемых радионуклидов.

Определение содержания радионуклидов <sup>137</sup>Cs и <sup>241</sup>Am проводилось гамма-спектрометрическим методом, <sup>90</sup>Sr и <sup>239+240</sup>Pu – радиохимическим согласно стандартным методикам [8], [9], [10].

**2. РЕЗУЛЬТАТЫ**

**2.1. Гранулометрический состав исследованных почв.**

При изучении распределения радионуклидов в гранулометрических фракциях почвы наибольший интерес представлял почвенный мелкозем (фракция меньше 1000 мкм), а каменистая фракция (10000–1000 мкм) была отсеяна и исключена из дальнейших исследований. Массовая доля (ω, %) каждой гранулометрической фракции входящей в состав почвенного мелкозема была определена от общей массы сухого образца.

Результаты гранулометрического анализа почв исследованных территорий представлены в Табл. 1.

Таблица 1.

Содержание гранулометрических фракций в почвах "северной" и "западной" территорий СИП, %.

Фракция, мкм	"Северная" территория (n=10)			"Западная" территория (n=8)			"Юго-восточная" территория (n=30)			"Южная" территория (n=10)					
	мин.	макс.	среднее	мин.	макс.	среднее	мин.	макс.	среднее	мин.	макс.	среднее			
1000-500	40,6	63,7	52,5	41,4	70,5	53,9	14	39,2	25,4	28,8	55,9	40,3			
500-250	4,2	13,6	9,6	7,91	13,3	11	10,2	24,9	17,3						
250-100	6,5	15,4	9,7	5,3	12,5	8,5	9,3	22	16,1	23,1	44,9	32,5			
100-63	13,8	31,3	22,3	11,5	24,4	17,7	4,2	21,2	11,3						
63-40							3,4	14,8	9,3						
40-8							5,4	16,1	10,6				4,3	12,5	7,8
8-5							3,1	11,6	7				2,7	8,13	5,6
5-1							4,3	9,4	6,4				3,5	9,2	6,4
<1							0,5	3,7	2,1	1,5	3,5	2,4			

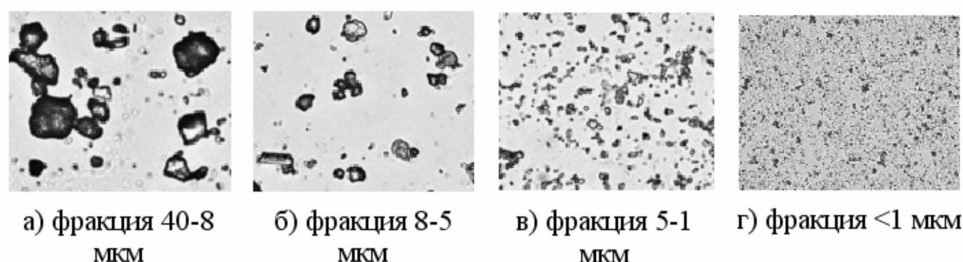


Рисунок 2. Внешний вид пылевых фракций почвы различного размера, увеличенный в 400 раз.

Гранулометрический анализ показал, что почвы исследованных территорий с поверхности характеризуются преобладанием песчаной фракции, составляющей около 70% массы почвы. На долю пылеватой и илистой фракций приходится оставшаяся массовая часть почвы. Массовая доля илистой фракции (<1 мкм) низка и варьирует в пределах 0,5–3,5%.

**2.2. Концентрация искусственных радионуклидов в почве.**

Оценка содержания радионуклидов <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>241</sup>Am и <sup>239+240</sup>Pu в исходных почвах проводилась как аналитическим, так и расчетным способом. Расчет удельной активности радионуклидов в почве проводился по содержанию радиоизотопов в каждой выделенной фракции почвы с учетом их массы согласно следующей формуле:

$$\bar{A}_{y\phi}^n = \frac{\sum_{i=1}^i A_{y\phi i}^{\phi} \times m_i^{\phi}}{m^n},$$

- где  
 $A_{y\phi}$  – удельная активность радионуклида в почве, Бк/кг;  
 $A_{y\phi i}^{\phi}$  – удельная активность радионуклида в i-й гранулометрической фракции, Бк/кг;  
 $m_i^{\phi}$  – масса i-й гранулометрической фракции, кг;  
 $m^n$  – масса аналитического образца почвы, кг.

Воспроизводимость результатов аналитического и расчетного определения удельной активности радионуклидов в почве составляла в среднем 80%. При оценке распределения радионуклидов по гранулометрическим фракциям почвы использовались расчетные удельные активности радионуклидов в исходной почве.

В Табл. 2 представлены средние значения удельных активностей радионуклидов в почвах исследованных территорий.

**2.3. Распределение радионуклидов по гранулометрическим фракциям почвы.**

Для количественной оценки распределения искусственных радионуклидов <sup>137</sup>Cs, <sup>241</sup>Am, <sup>239+240</sup>Pu и <sup>90</sup>Sr по гранулометрическим фракциям почвы был использован безразмерный параметр – коэффициент обогащения ( $K_o$ ), определяемый как отношение удельной активности радионуклида в гранулометрической фракции ( ) к удельной активности того же радионуклида в соответствующей исходной почве

$$(\bar{A}_{y\phi}^n) : K_o = A_{уд.}^{фр.} / \bar{A}_{уд.}^п.$$

Данный параметр является показателем степени обогащенности или обедненности гранулометрических фракций относительно среднего содержания радионуклидов в почве. Значение  $K_o > 1$  свидетельствует о концентрировании радионуклидов в данной фракции, а при  $K_o < 1$  фракция обеднена радиоизотопами.

**2.3.1. Распределение радионуклидов по гранулометрическим фракциям почвы на условно "фоновых" участках.**

Распределение искусственных радионуклидов между гранулометрическими фракциями почвы условно "фоновых" территорий более наглядно представлены в графическом виде на рис. 2–8.

Распределение радионуклидов по гранулометрическим фракциям почвы на всех исследованных условно "фоновых" участках имеет общую тенденцию возрастания концентрации радионуклидов в тонких почвенных фракциях. Наряду с этим, во всех исследованных территориях также проявляется некоторое увеличение значения  $K_o$  в некоторых фракциях почвы, свидетельствующее об их обогащенности искусственными радионуклидами. Повышенные значения  $K_o$  отмечается во фракциях 500–

Таблица 2.

Средние удельные активности <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>241</sup>Am и <sup>239+240</sup>Pu в почвах исследованных территорий, Бк/кг.

Радионуклид	Территория					
	условно "фоновые" территории				следы	
	Северная (n=10)	Западная (n=8)	Юго-восточная (n=17)	Южная (n=6)	След термоядерного взрыва 12.08.1953 г (n=12)	След наземного взрыва 24.09.1951 г (n=4)
<sup>137</sup> Cs	25	31	43	42	190	115
<sup>90</sup> Sr	31	5,9	45	5,6	720	20
<sup>241</sup> Am	1,7	1,3	2,0	<3	2,4	<3
<sup>239+240</sup> Pu	8,6	8,6	15	13	48	39

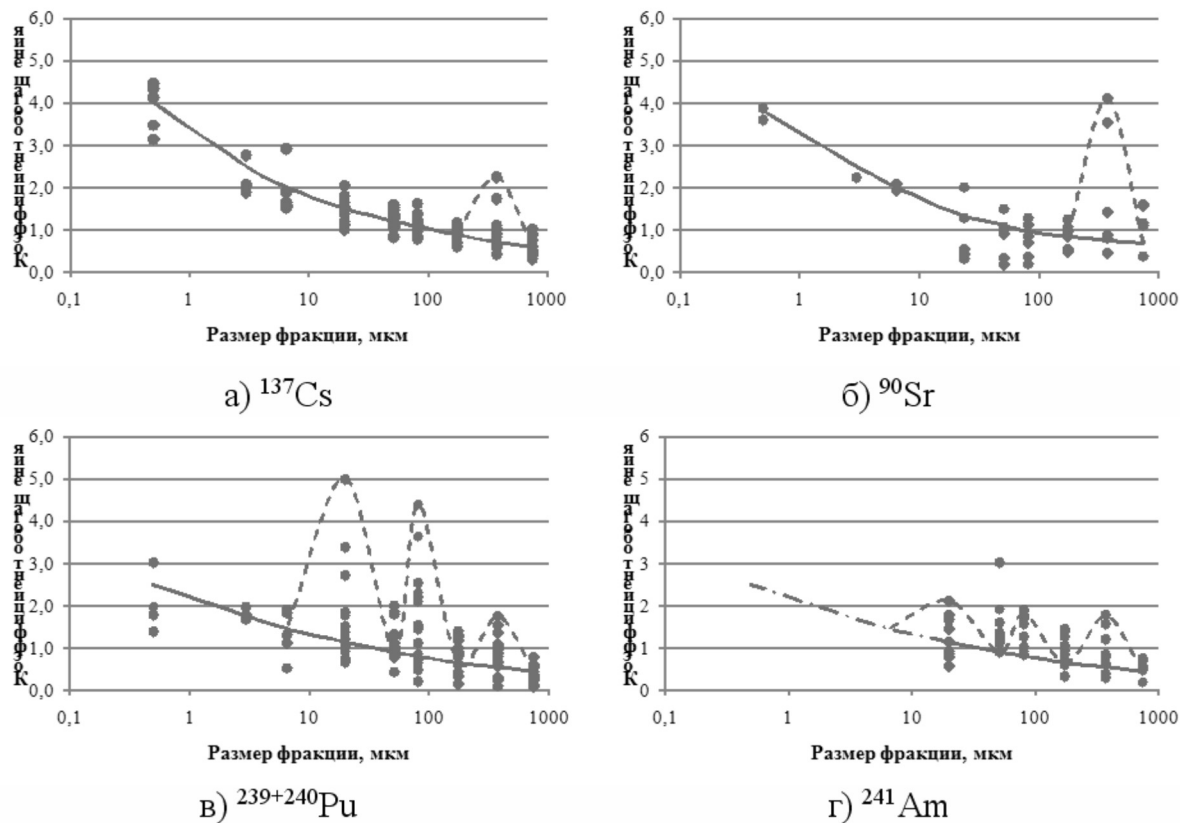


Рисунок 3. Распределение искусственных радионуклидов в гранулометрических фракциях почвы юго-восточной части СИП.

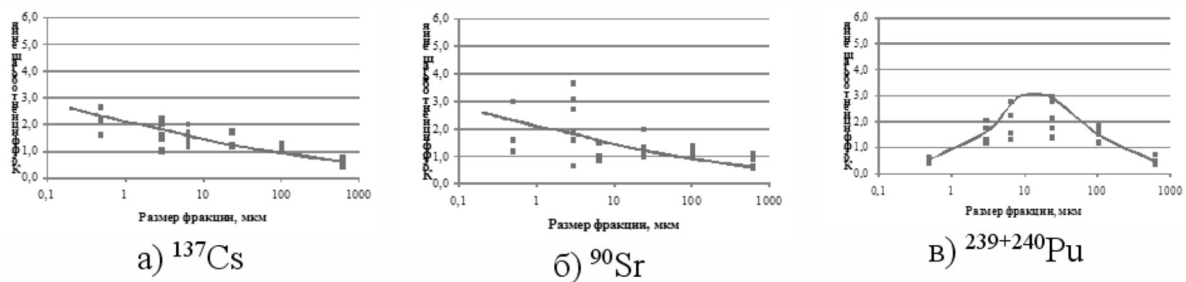


Рисунок 4. Распределение искусственных радионуклидов в гранулометрических фракциях почвы южной части СИП.

250 мкм, 100–63 мкм, 40–8 мкм и 40–5 мкм. Фракция размером 500–250 мкм отмечена во всех исследованных условно "фоновых" территориях, фракция 100–63 мкм и 40–8 мкм – только на "юго-восточной" территории, а фракция 40–5 мкм – на "южной" территории.

**2.3.2. Распределение радионуклидов по гранулометрическим фракциям почвы на следах ядерных взрывов.** Исследованные территории претерпели в различной сте-

пени воздействие и наземных испытаний, проведенных 29.08.1949 г (первый атомный), 24.09.1951 г и 12.08.1953 г (термоядерный) на площадке "Опытное поле". Следы радиоактивных выпадений двух взрывов расположены на "южной" (24.09.1951 г.) и "юго-восточной" (12.08.1953 г) территориях [11], [12], [13].

Графики распределения радионуклидов по гранулометрическим фракциям почвы на следах представлены на Рис. 7 и Рис. 8.

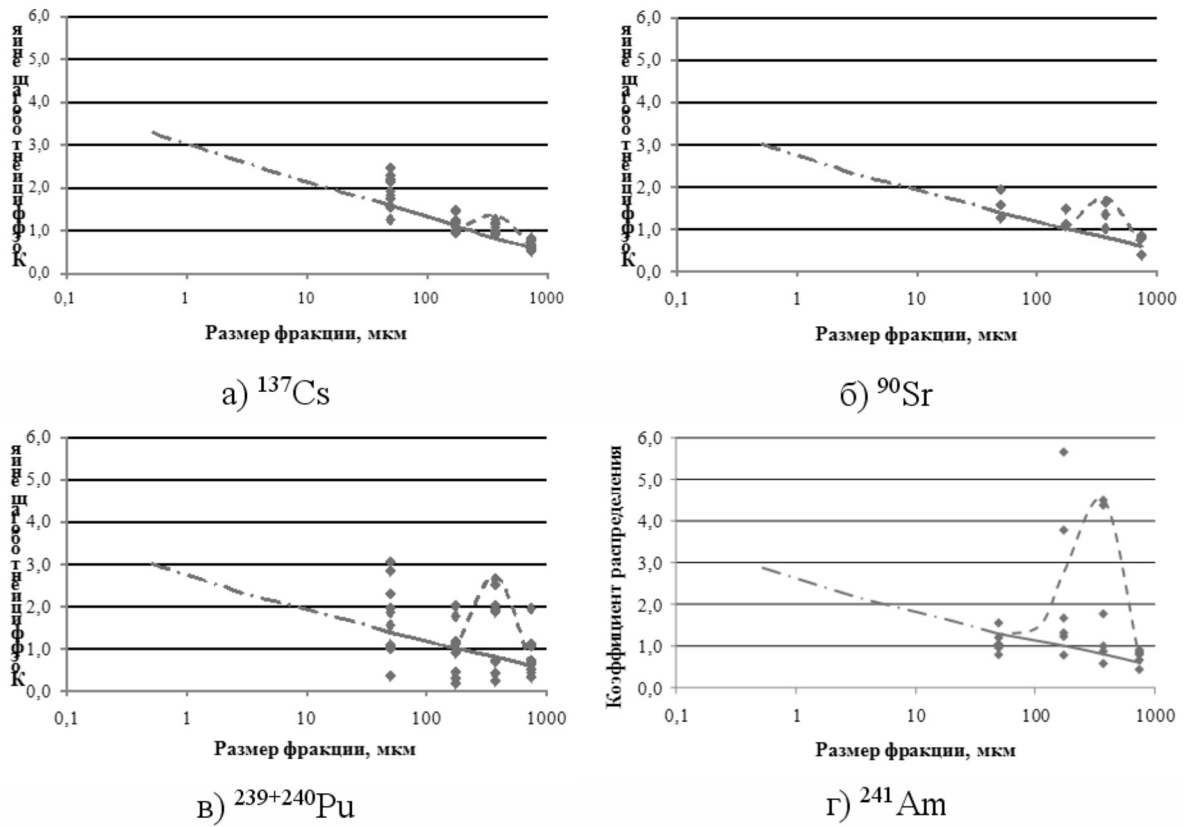


Рисунок 5. Распределение искусственных радионуклидов в гранулометрических фракциях почвы северной территории СИП.

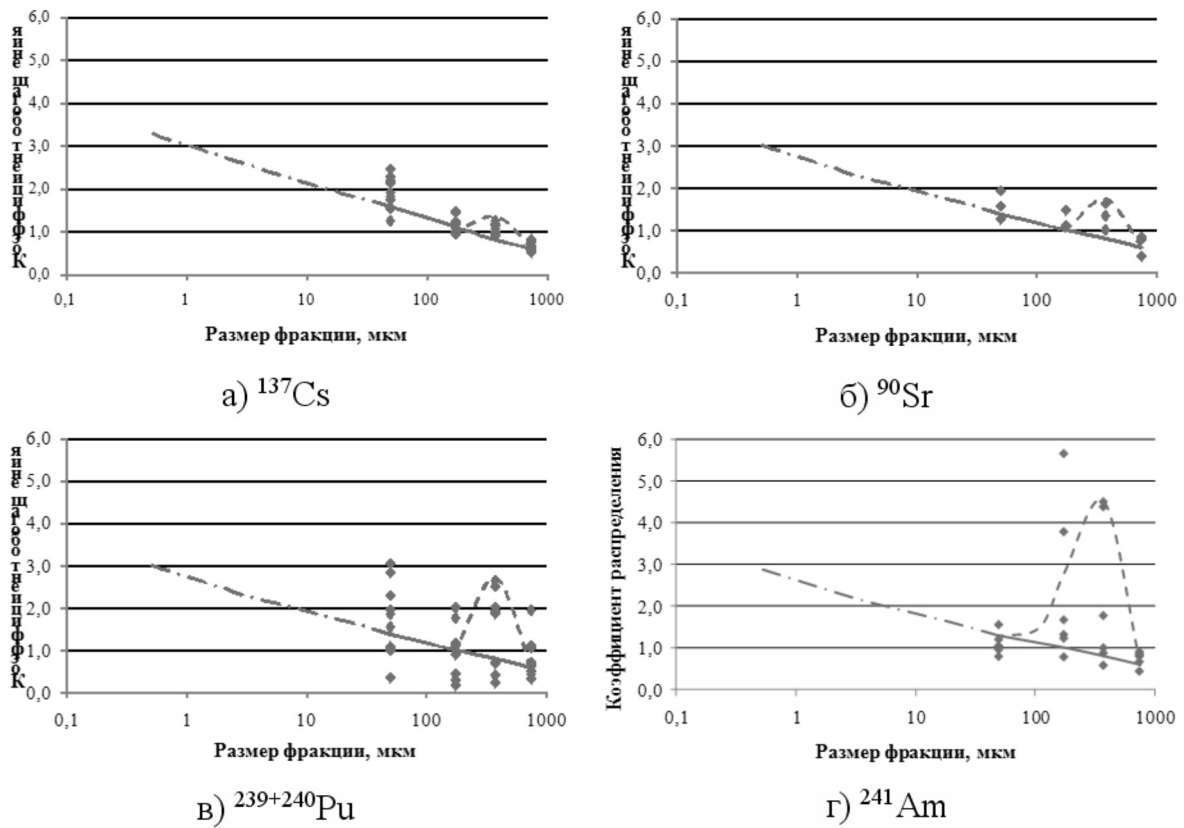


Рисунок 6. Распределение искусственных радионуклидов в гранулометрических фракциях почвы западной территории СИП.

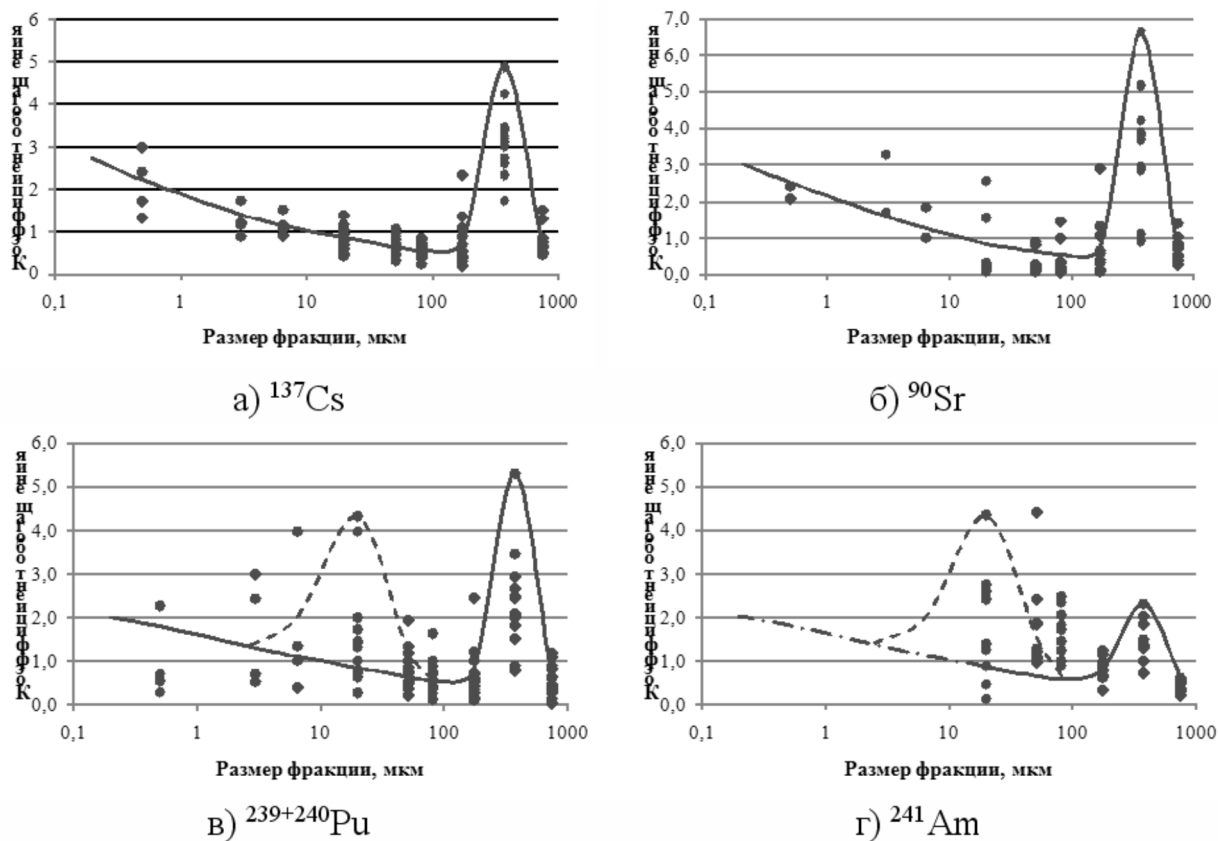


Рисунок 7. Распределение искусственных радионуклидов в гранулометрических фракциях почвы на следе термоядерного взрыва 1953 г.

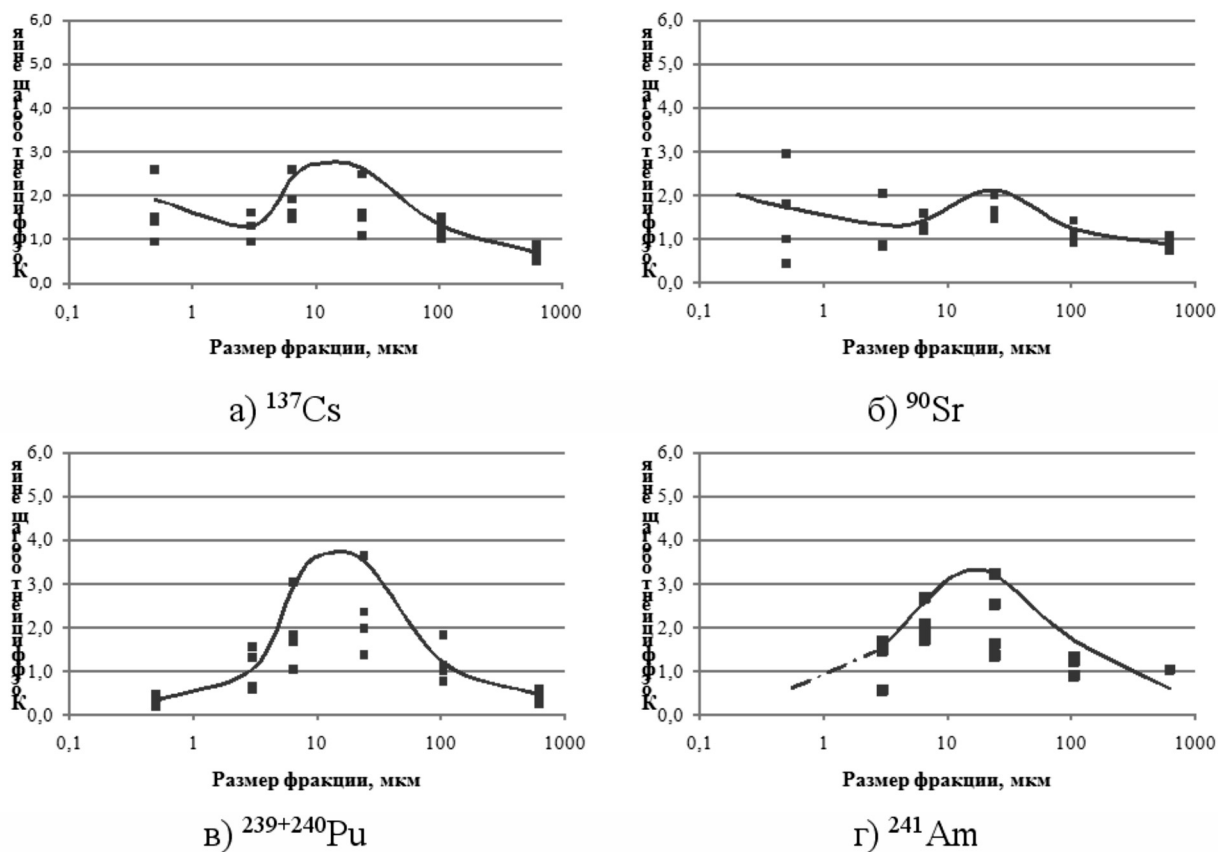


Рисунок 8. Распределение искусственных радионуклидов в гранулометрических фракциях почвы на следе наземного испытания 1951 г.



Результаты исследования показали, что на исследуемых следах наземных испытаний в почве обнаруживаются некоторые фракции, в наибольшей степени обогащенные радионуклидами. Так, на исследуемом участке следа термоядерного взрыва (70–100 км от эпицентра взрыва) существенное концентрирование всех исследуемых радионуклидов отмечается во фракциях 500–250 мкм,  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  к тому же и во фракции 40–8 мкм (рис. 2). В свою очередь, "обогащенная" фракция, обнаруженная на следе наземного испытания 24.09.1951 г, имеет размер частиц от 40 до 5 мкм.

Помимо наличия "обогащенной" фракции также наблюдается тенденция увеличения концентрации радионуклидов с уменьшением размера фракций. Данную тенденцию более отчетливо можно увидеть на примере следа термоядерного испытания (Рис. 7).

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что формирование радиоактивных выпадений при ядерном взрыве обусловлено образованием радиоактивных частиц (носителей активности) в результате физико-химических, ядерно-физических процессов, протекающих в светящейся области взрыва.

Исходя из этого, наличие в исследуемых почвах фракций, обогащенных искусственными радионуклидами, по-видимому, связано с присутствием в них радиоактивных частиц вышеупомянутых наземных ядерных взрывов. Альфа-авторадиографические исследования, проведенные коллегами из НП "Лаборатория анализа микрочастиц" (Москва, Россия) нескольких образцов 500–250 мкм фракции почвы на следе термоядерного взрыва 12.08.1953 г показали, что одиночные альфа-треки на экспонированных детекторах оставлены отдельными частицами. На Рис. 9 показана характерная область с треками на поверхности одного из детекторов.

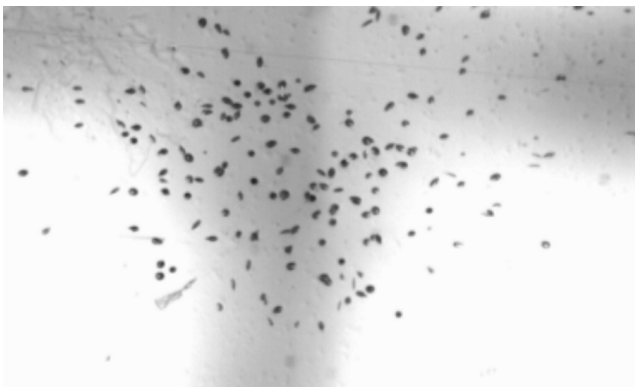


Рисунок 9. Фрагмент детектора, экспонированного над препаратом фракции почвы 500-250 мкм, отобранной на следе термоядерного взрыва 1953 г.

Как уже было отмечено в предыдущем разделе, кроме присутствия в почве определенных "обогащенных фракций" (радиоактивных частиц) распределение радионуклидов по гранулометрическим фракциям почвы характеризуется увеличением их концентрации с уменьшением размера почвенных частиц. Такая тенденция наиболее характерна для "фоновых" территорий, хотя, как показали результаты, может иметь место и на следах радиоактивных выпадений ядерного испытания. Непрерывно повторяющиеся процессы поглощения (сорбция) и обратного перехода в раствор (десорбция) в почве приводят к перемещению нуклидов, рассеиванию или концентрированию. Так как, сорбционно-десорбционные процессы в почве протекают в гетерогенной системе, концентрация радионуклидов возрастает прямо пропорционально удельной поверхности частиц, т.е. чем меньше фракция, тем больше она концентрирована радионуклидами.

Накопление активности техногенных радионуклидов в тонких почвенных фракциях может быть обусловлено не только их "сорбционно-десорбционным перераспределением", но и выпадением тонкодисперсных частиц-носителей радиоактивности, образованных при воздушных ядерных взрывах. По некоторым экспериментальным данным размеры таких частиц распределены в диапазоне от 0,01 до 40 мкм.

Сравнительный анализ распределения радионуклидов по гранулометрическим фракциям показал, что размеры "обогащенных фракций" выявленных на следах наземных испытаний совпадают с размерами фракций с повышенными значениями  $K_0$  на прилегающих к ним условно "фоновых" территориях (рис. 10).

Из рис. 10 видно, что на следе термоядерного испытания выявляются две специфические (обогащенные) фракции – 500–250 мкм и 40–8 мкм. Фракция 500–250 мкм отмечается повсеместно как на следе, так и на прилегающей к ней условно "фоновой" юго-восточной территории. Фракция же размером 40–8 мкм выявлена лишь на северо-восточной периферии следа (т. 1557, 1748, 1670, 1915) и в нескольких точках на юго-восточной территории (т. 2110, 2011, 2302). В этих точках в почве имеются две обогащенные фракции одновременно – 500–250 мкм и 40–8 мкм.

Наряду с этим, в почвах условно "фоновой" юго-восточной территории присутствует значительно обогащенная плутонием фракция размером 100–63 мкм, которая не выявлена на термоядерном следе (т. 97, 113, 189, 1187, 424, 2132, 1760). Данный факт может свидетельствовать о том, что имеется еще один неидентифицированный источник радиоактивного загрязнения юго-восточной территории СИП, кроме термоядерного взрыва.

Несмотря на то, что граница между юго-восточной и

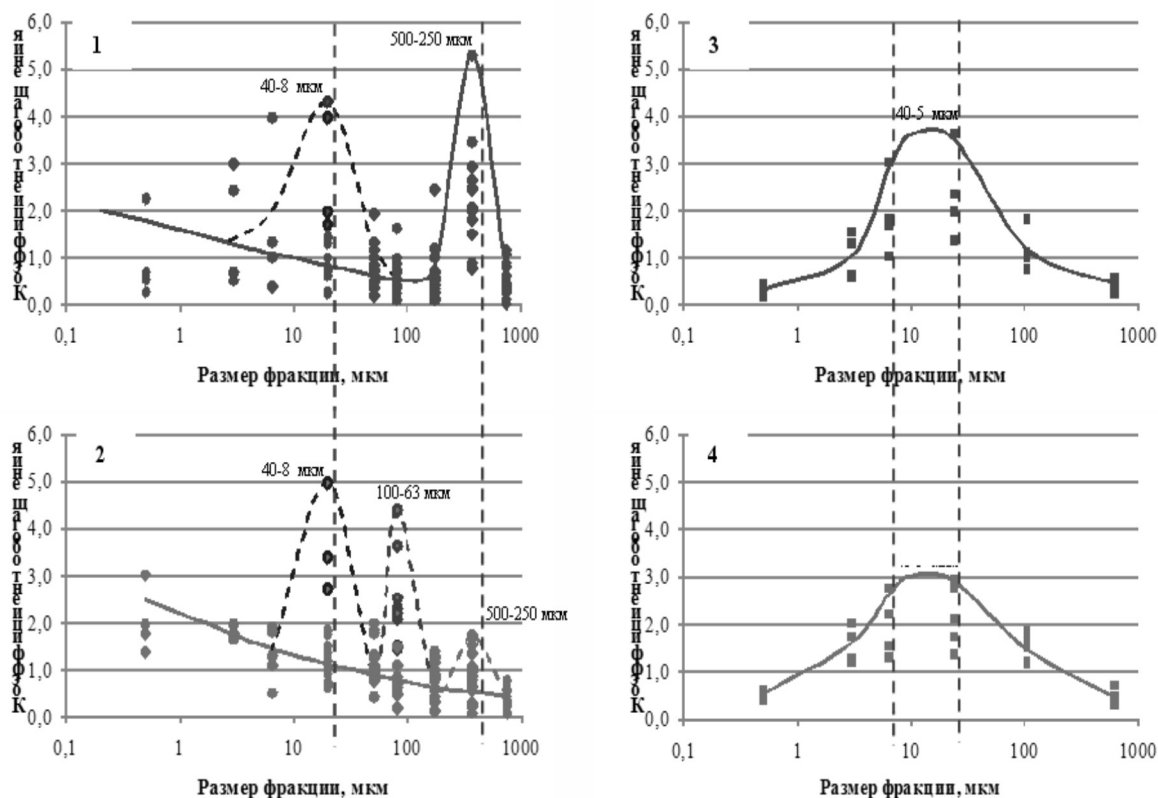


Рисунок 10. Распределение  $^{239+240}\text{Pu}$  по гранулометрическим фракциям почвы на следе термоядерного взрыва 12.08.1953 г. (1) и прилегающей к нему юго-восточной территории (2), на следе наземного взрыва 24.09.1951 г. (3) и прилегающей к нему южной территории (4).

южной частей СИП условная, на территории последней выявлена лишь одна "обогащенная фракция" (40–5 мкм), присутствующая как на следе наземного взрыва 1951 года, так и в условно "фоновой" области (рис. 10).

Из сказанного следует, что вероятнее всего исследованная южная часть территории СИП претерпела воздействие лишь наземного ядерного испытания, проведенного 24.09.1951 года.

Представленные выше факты дают основание полагать, что распределение радионуклидов по почвенным гранулометрическим фракциям может послужить дополнительным диагностирующим признаком происхождения радиоактивного загрязнения почвы.

Таким образом, в большинстве рассмотренных случаев установлен факт наличия почвенных фракций обогащенных/обедненных радионуклидами. Степень обогащения/обеднения лежит в диапазоне значений от 0,1 до 5,0. Средние значения  $K_0$  наиболее обогащенных фракций, характерных для некоторых территорий представлены в Табл. 3.

Следует отметить, что фактов наличия фракций с "аномально" высоким обогащением искусственными радионуклидами не выявлено. Максимальное значение  $K_0$ , полученное в ходе исследования не превысило 5,0.

Опираясь на массив статистических данных ( $n=58$ ), использованных в данных исследованиях, можно сказать, что чрезмерно высокого обогащения радионуклидами гранулометрических фракций почвы, в том числе и ингаляционноопасных ( $<10$  мкм), не ожидается. Однако, не исключается возможность колебания значений  $K_0$  в небольшом диапазоне в зависимости от изменения массовой доли гранулометрических фракций в почве, т.е. уменьшение массовой доли фракции может привести к ее большему обогащению или наоборот.

Наличие информации о величине  $K_0$  гранулометрических фракций позволяет предложить альтернативный расчетный способ определения содержания искусственных радионуклидов в воздухе. Кроме значений  $K_0$  фракций для расчета необходимы среднее содержание искусственных радионуклидов в почве и средняя запыленность воздуха, что определяется достаточно просто.

Таблица 3.

Средние значения коэффициентов обогащения фракций.

Территория	Фракция, мкм	Радионуклид			
		$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
Юго-восточная (n=6)	<1	3,9	3,6	2,1	3,3
Южная (n=6)	<1	2,1	1,9	0,5	-
След ТЯ взрыва 12.08.1953 г (n=13)	500-250	3,0	3,3	2,6	1,5
След наземного взрыва 24.09.1951 г (n=4)	40-8	1,7	1,5	2,3	2,2

Формула для расчета объемной активности радионуклидов в воздухе имеет следующий вид:

$$C_{air} = C_{soil} \cdot K_o \cdot \rho_{sus} \cdot 10^{-9}$$

где:

$C_{air}$  – объемная активность радионуклидов в воздухе, Бк/м<sup>3</sup>

$C_{soil}$  – средняя удельная активность радионуклидов в почве, Бк/кг

$K_o$  – коэффициент обогащения гранулометрической фракций почвы

$\rho_{sus}$  – среднегодовая запыленность воздуха, мкг/м<sup>3</sup>

$10^{-9}$  – коэффициент пересчета кг в мкг

Для оценки содержания радионуклидов в воздухе наиболее значимо значение  $K_o$  фракций <10 мкм, так как она считается потенциально ингаляционноопасной.

В результате проведенных исследований можно дать следующие рекомендации для дальнейшего исследования распределения радионуклидов по гранулометричес-

ким фракциям почвы СИП.

Решение о необходимости подробного исследования распределения радионуклидов по гранулометрическим фракциям почвы необходимо принимать исходя из характера радионуклидного загрязнения местности:

1. при условии отсутствия следов радиоактивных выпадений от ядерных испытаний и/или локальных загрязнений можно ожидать, что наибольшая концентрация радионуклидов будет сконцентрирована в тонких фракциях почвы. В данной ситуации можно провести лишь несколько заверочных исследований, сократив количество выделяемых фракций до необходимого минимума;

2. в случае если на местности имеются признаки наличия следов радиоактивных выпадений и/или локальных загрязнений целесообразно провести детальные исследования, так как имеется вероятность того, что в почве может присутствовать специфическая "обогащенная" фракция.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трансурановые элементы в окружающей среде: Пер. с англ./Под ред. У.С. Хэнсона. М.: Энергоатомиздат, 1985 – 344 с.
2. Артемьев О.И. Изучение форм нахождения  $^{239}/^{240}\text{Pu}$  в радиоактивных выпадениях атмосферных ядерных взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне / О.И. Артемьев, М.А. Умаров, Т.В. Сидорич // Вестник НЯЦ РК. – 2003 – вып. 3 – С. 48–51
3. Круглов С.В. Распределение радионуклидов чернобыльских выпадений по фракциям гранулометрического состава дерново-подзолистых почв / С.В. Круглов, Н.А. Васильева, А.Д. Куринов, Р.М. Алексахин // Почвоведение, 1995 – №3 – С. 551–557
4. P. Spezzano. Distribution pre- and post-Chernobyl radiocesium with particle size fractions of soils / P. Spezzano // Journal of Environmental Radioactivity. – 2005. – Vol.83, Iss. 2. – P. 117–127
5. Hosoda M. Visualization of radiocesium distribution in contaminated soil from Kashiwa City, Chiba, Japan / M. Hosoda, M. Fukushi [at al.] // Radiation Energy Medicine. – 2012. – Vol. 1. – № 1–2. – P. 117–120
6. Korobova E.M. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation on different size fractions of the Yenisey floodplain soils / E.V. Korobova, V.G. Linnik [at al.] // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – № 142. – P. 49–59
7. Bihari A. Examination of the effect of particle size on the radionuclide content of soils / A. Bihari, Z. Dezso // Journal of Environmental Radioactivity. – 2008. – № 99. – P. 1083–1089

8. 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. – 17 с
9. Инструкция и методические указания по оценке радиационной обстановки на загрязненной территории: 17.03.89 г. – М.: Госкомгидромет СССР, 1989
10. Методика выполнения измерений активности радионуклидов плутоний –238, плутония–(239+240) в счетных образцах, приготовленных из проб объектов окружающей среды. – М.: ФГУП "НПО Радиевый институт им. В.Г. Хлопина"
11. Стрильчук Ю.Г. Радиэкологическое состояние "юго–восточной" (район с. Саржал) части территории СИП / Ю.Г. Стрильчук, С.Н. Лукашенко, В.В. Каширский и др. // Актуальные вопросы радиэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012 г.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2013. – Т.1. – Вып. 4. – С. 15–117. – ISBN 978–601–7112–74–5
12. Материалы комплексного исследования "юго–восточной части" территории СИП / ИРБЭ НЯЦ РК; рук. Лукашенко С.Н. – Курчатов: ИРБЭ НЯЦ РК, 2011
13. Ядерные испытания СССР. Семипалатинский полигон. Обеспечение общей и радиационной безопасности ядерных испытаний / под ред. Логачева В.А. – Москва: ИГЕМ РАН, 1997. – 344 с

© А.М. Кабдыракова, А.Е. Кундузбаева, С.Н. Лукашенко, Н.В. Ларионова, Т.Н. Байсеркенова, А.Т. Меньдубаев, ( Kabdyrakova@nnc.kz ),  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»,



"Национальный Ядерный Центр Республики Казахстан", Курчатов, Казахстан