

## ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ $^{90}\text{Sr}$ В ПОЧВАХ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ БОЕВЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА СЕМИПАЛАТИНСКОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ

Кундузбаева А.Е.<sup>1</sup>, Кабдыракова А.М.<sup>1</sup>, Лукашенко С.Н.<sup>1</sup>, Ларионова Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан, e-mail: irbe@nnc.kz*

Целью данной работы является изучение форм нахождения  $\text{Sr}^{90}$  в почвах некоторых участков площадки «4а» – места проведения испытаний БРВ. В работе представлены данные относительного содержания форм нахождения  $\text{Sr}^{90}$  – основного компонента радиоактивного загрязнения данной площадки. Выявлен неоднородный характер распределения  $\text{Sr}^{90}$  в почвах. В целом, радионуклид  $\text{Sr}^{90}$  находится в почвах площадки «4а», в основном, в обменной форме (55,2 %). Содержание легкодоступной для растений водорастворимой формы незначительно (0,4 %), однако с учетом высокого уровня валового содержания  $\text{Sr}^{90}$  в почвах, удельное содержание водорастворимой формы в почвах площадки «4а» может достигать внушительных значений (до 1000 Бк/кг). Установлено, что на СИП почвы площадки испытаний БРВ характеризуются максимальными параметрами биодоступности и подвижности радионуклида  $\text{Sr}^{90}$ , наряду с почвами радиоактивных водотоков площадки «Дегелен» и условно «фоновых» территорий СИП.

Ключевые слова: СИП, площадка «4а», испытания БРВ, формы нахождения радионуклидов,  $^{90}\text{Sr}$ , последовательное экстрагирование.

## $^{90}\text{Sr}$ SPECIATION IN SOILS OF THE TESTING SITE FOR WARFARE RADIOACTIVE AGENTS OF SEMIPALATINSK TEST SITE

Kunduzbayeva A.E.<sup>1</sup>, Kabdyrakova A.M.<sup>1</sup>, Lukashenko S.N.<sup>1</sup>, Larionova N.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of radiation safety and ecology of National Nuclear Centre of RK, Kurchatov, e-mail: irbe@nnc.kz*

The work is aimed at studying  $\text{Sr}^{90}$  speciation in soils of several sites of «4а» test site, where the WRA were tested. The work provides concentrations of  $\text{Sr}^{90}$  speciation in soils, which is the main radioactively contaminated component of the site. Anon-uniform character of  $\text{Sr}^{90}$  distribution in soils was revealed.  $\text{Sr}^{90}$  mainly presents in soils of «4а» site in exchangeable form (55.2%). The content of watersoluble form easily accessible for plants is insignificant (0.4%), however, taking into account the total  $\text{Sr}^{90}$  content in soils, specific concentration of water soluble form in soils of «4а» site can reach magnifical values (up to 1,000 Bq/kg). It was revealed that soils of WRA testing site at the STS have maximal parameters of  $\text{Sr}^{90}$  radionuclide bioavailability and mobility, as well as water stream soils of «Degelen» site and conditionally «background» STS territories.

Keywords: STS, «4а» site, WRA testing, speciation of radionuclides,  $^{90}\text{Sr}$ , sequential extraction.

В 50-е годы прошлого столетия в Советском Союзе проводились исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию радиологического оружия в ракетном и бомбовом исполнении. В качестве боевого снаряжения использовали жидкие и порошкообразные боевые радиоактивные вещества (БРВ), представлявшие собой радиоактивные отходы атомной промышленности, а также продукты, полученные после облучения специальных образцов в промышленном реакторе. На Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) испытания БРВ проводили на двух специально выделенных площадках – «4» и «4а». По имеющимся данным, испытания БРВ вследствие переноса радиоактивных веществ, оказали влияние на радиоактивное загрязнение северо-западной части территории полигона помимо собственно территории площадок [4]. Основным загрязнителем почвенного покрова данных площадок является радионуклид  $^{90}\text{Sr}$  [6].

До настоящего момента на СИП исследования форм нахождения радионуклидов в местах проведения испытаний боевых радиоактивных веществ не проводились. Результаты изучения миграционных свойств радионуклидов в почвах площадки «4а» имеют большое практическое значение при оценке биологической доступности и подвижности радионуклидов в почвах, а также выборе технологии рекультивации данной территории, имеющей уникальные особенности радионуклидного загрязнения.

Целью работы является исследование форм нахождения радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  в почвах площадки испытания БРВ на СИП.

### Материал и методы исследования

#### Характеристика объекта исследования

Испытательная площадка «4а» находится в северо-западной части Семипалатинского испытательного полигона (рисунок 1).

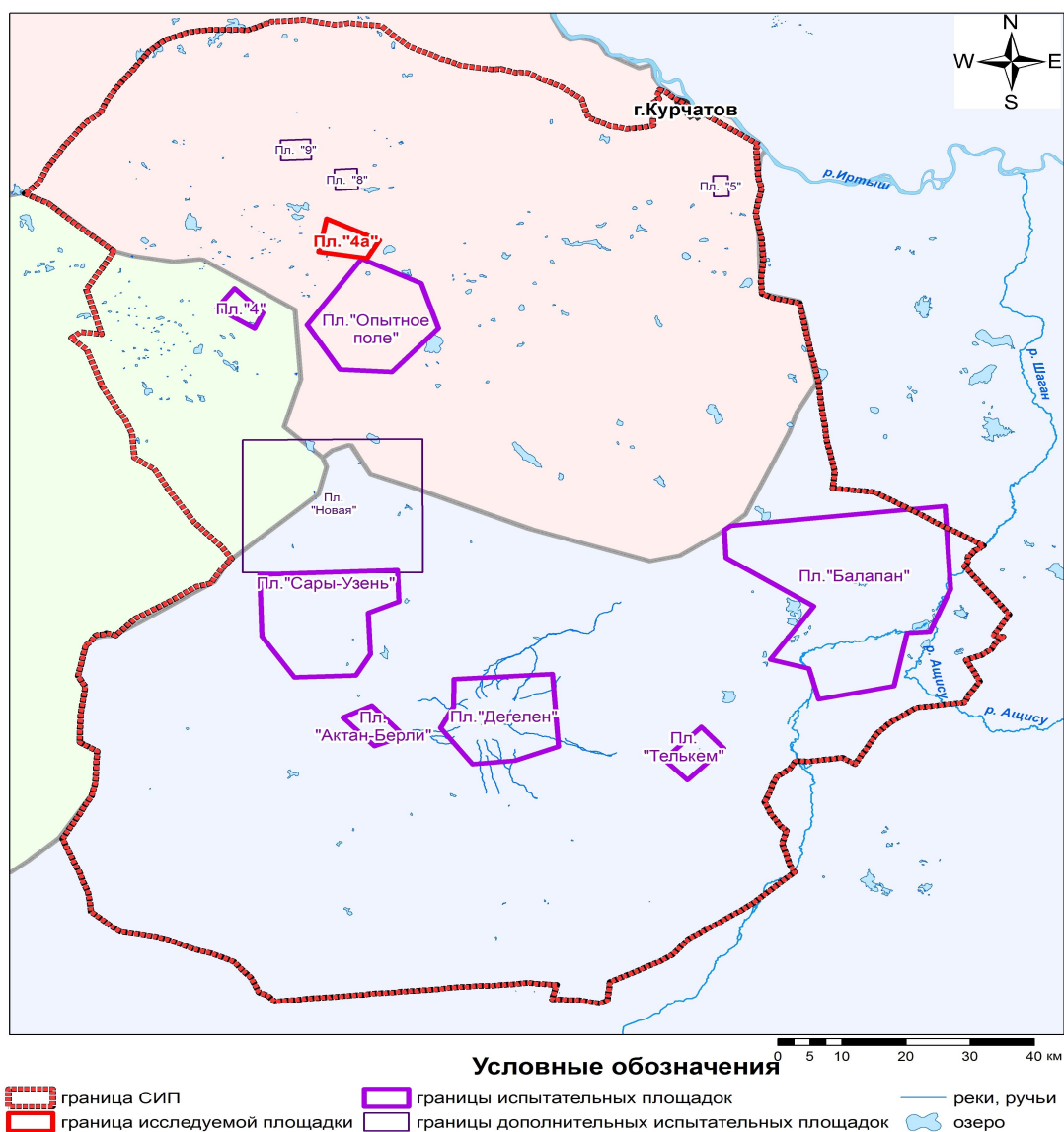


Рис. 1. Семипалатинский испытательный полигон

Почвы данной территории относятся к зональным каштановым и светло-каштановым нормальным, неполноразвитым и малоразвитым типам. 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.

Каштановые и светло-каштановые зональные малоразвитые и неполноразвитые почвы распространены на склонах сопок, сложенных плотными коренными породами, выходы которых нередко отмечаются на вершинах. Почвообразующими породами для них служат маломощные элювиально-делювиальные щебнистые суглинки, мощность которых постепенно увеличивается от вершины сопок к их подножью, а вместе с тем уменьшается степень скелетности почв. Нормальные, т.е. с полноразвитым профилем каштановые почвы встречаются на рассматриваемой территории редко, в основном, на делювиально-пролювиальном шлейфе, оконтуривающем мелкосопочник на севере и северо-востоке.

Основными морфологическими признаками неполноразвитых и малоразвитых почв является малая мощность гумусового горизонта (15–25 см) при мощности всего рыхлого слоя не более 40–60 см. В подзоне каштановых почв отсутствует проявления белоглазки, тогда как в светло-каштановых почвах отмечается непосредственно под гумусовым горизонтом карбонатный иллювиальный горизонт. Все почвы легко- или среднесуглинистые, но, как правило, опесчаненные. Наиболее распространенными среди каштановых почв являются среднегумусные (3–4 % гумуса) виды. Содержание гумуса в светло-каштановых почвах в верхнем горизонте достигает 2–3 %. Реакция почвенного раствора на поверхности близка к нейтральной, но далее вниз по профилю меняется на слабощелочную или щелочную, что особенно характерно для светло-каштановых почв [9, 10, 11].

Было исследовано 9 из 25 участков площадки «4а», на которых были непосредственно проведены испытания БРВ (рисунок 2).



Рис. 2. Схема расположения исследуемых участков на площадке "4а"

### Отбор проб

Отбор точечных проб почвы проводили на 9 участках с максимальными уровнями радиоактивного загрязнения, на глубину 0–5 см с площади 600 см<sup>2</sup>. Основным загрязнителем почв исследуемых участков является радионуклид <sup>90</sup>Sr [6]. Данные о содержании радионуклида <sup>90</sup>Sr в почвах исследуемых участков приведены в таблице 1.

Таблица 1

Содержание радионуклида <sup>90</sup>Sr в почвах исследуемых участков (0–5 см)

№ п/п	№ участка	Содержание радионуклида <sup>90</sup> Sr, Бк/кг
4	уч. 1	$3,6 \cdot 10^4 \pm 0,4 \cdot 10^4$
1	уч. 2	$3,8 \cdot 10^4 \pm 0,4 \cdot 10^4$
3	уч. 3	$9,3 \cdot 10^4 \pm 1,0 \cdot 10^4$
7	уч. 4	$5,5 \cdot 10^4 \pm 0,6 \cdot 10^4$
8	уч. 9	$4,1 \cdot 10^4 \pm 0,5 \cdot 10^4$
5	уч. 13	$1,5 \cdot 10^5 \pm 0,2 \cdot 10^5$
10	уч. 19	$2,7 \cdot 10^5 \pm 0,3 \cdot 10^5$
2	уч. 20	$1,3 \cdot 10^5 \pm 0,1 \cdot 10^5$
6	уч. 24	$3,1 \cdot 10^5 \pm 0,3 \cdot 10^5$

## Определение форм нахождения радионуклидов в почве

Исследование форм нахождения радионуклидов в почвах проводили методом последовательной экстракции. Данный метод широко используется в исследованиях большого количества токсичных элементов в разных типах образцов [7, 8].

В работе была использована схема последовательного экстрагирования, предложенная Ф.И. Павлоцкой (таблица 2) [9]. Схема была модифицирована добавлением промежуточной стадии выделения органически связанных радионуклидов раствором 0.1 NaOH на основе методики, разработанной И.В. Тюриным [10].

Таблица 2

Схема последовательного экстрагирования

Форма	Экстрагент	Группа соединений
Обменная форма (легкодоступная форма)	1M CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub>	Водорастворимые соли неорганических кислот и органические соединения (соли, комплексы), несвязанные фульваты элемента, соединения, сорбированные почвой по механизму ионного обмена, в карбонатных почвах частично углесоли элемента (карбонаты)
Органическая форма (потенциальный резерв)	0.1N NaOH	Связанные с органической частью (фракции гуминовых кислот и фульвокислот), свободной или непрочно связанной с минеральной частью почвы
Подвижная форма (потенциальный резерв)	1M HCl	Карбонаты, непрочно сорбированные соединения элемента окислами железа и алюминия, глинистыми минералами, фульваты, труднообменные ионы, свежесозаженные гидроокиси
Прочносвязанная форма (остаточная, недоступная форма)	Смесь кислот HNO <sub>3</sub> -HF	В составе полуторных окислов железа и алюминия, ионы связанные прочно (необменно) органическим веществом почвы, адсорбированные по типу изоморфного замещения в кристаллических решетках [5]

На всех этапах эксперимента соотношение почвы и экстрагента составляло 1:5. Непосредственно в остатках почвы после выщелачивания определяли прочносвязанные формы радионуклида. Содержание форм нахождения радионуклида рассчитывали в процентных долях от суммарного содержания всех форм.

Радионуклид <sup>90</sup>Sr в почвах определяли по методике с использованием β-спектрометра «Прогресс» [14]. Содержание <sup>90</sup>Sr в вытяжках анализировали радиохимическим методом в соответствии с аттестованными методическими указаниями [15]. Предварительный этап радиохимического анализа радионуклида <sup>90</sup>Sr в почвах предусматривал глубокое разложение образца (озоление) смесью минеральных кислот.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований форм нахождения <sup>90</sup>Sr в почвах площадки «4а» представлены в таблице 3.

Относительное содержание форм нахождения радионуклида  $^{90}\text{Sr}$ , % от суммарного содержания всех форм

№ п/п	№ участка	Водорастворимая форма, %	Обменная форма, %	Органическая форма, %	Подвижная форма, %	Прочносвязанная форма, %
1	уч.2	0,27 ±0,04	67,5 ±9,4	1,2 ±0,2	18,9 ±2,7	12,1 ±2,4
2	уч.20	0,29 ±0,04	62,9 ±10,5	1,9 ±0,3	25,1 ±3,7	9,7 ±1,6
3	уч.3	0,26 ±0,05	61,8 ±9,4	1,1 ±0,1	23,1 ±3,7	13,7 ±1,2
4	уч.1	0,20 ±0,03	57,2 ±9,3	0,8 ±0,1	27,8 ±4,6	13,9 ±2,2
5	уч.13	0,08 ±0,01	50,9 ±7,9	0,6 ±0,1	18,2 ±2,4	30,3 ±3,6
6	уч.24	0,37 ±0,06	65,4 ±9,3	18,7 ±3,7	4,7 ±0,8	10,8 ±1,3
7	уч.4	0,13 ±0,01	24,8 ±3,9	0,7 ±0,1	10,8 ±1,5	63,5 ±9,3
8	уч.9	0,19 ±0,03	44,3 ±6,6	13,2 ±1,9	2,7 ±0,4	39,6 ±7,5
9	уч.19	0,34 ±0,07	61,7 ±8,5	1,3 ±0,2	25,5 ±4,2	11,1 ±1,3
min-max		0,1-0,4	24,8-67,5	0,6-18,7	2,7-27,8	9,7-63,5
$\bar{X}$		0,2	55,2	4,4	17,4	22,8
$\sigma$		0,09	13,5	6,7	9,3	18,4
CV, %		39,8	24,5	152	53,3	81,0

По данным исследования основное содержание радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  в почвах площадки «4а» находится в обменной форме (55,2 %). Доля водорастворимой формы наименьшая и не превышает 0,4 % от суммарного содержания всех форм. Однако с учетом высокого уровня валового содержания  $^{90}\text{Sr}$  в почвах удельное содержание водорастворимой формы в расчете на 1 кг почвы достигает высоких значений (до 1000 Бк/кг). Содержание органической формы незначительно (в среднем 4,4 %), при этом отмечается максимальное варьирование значения данного параметра (коэффициент вариации составляет 152 %) в исследуемых почвах. Среднее содержание подвижной и прочносвязанной форм имеет близкие значения (17,4 % и 22,8 %, соответственно), однако параметры подвижной формы характеризуется меньшей вариативностью.

Сравнительный анализ форм нахождения радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  в почвах площадки «4а» с другими, ранее исследованными, испытательными площадками СИП («Опытное поле», условно «фоновые» территории, «Дегелен»), выявил некоторые особенности. Установлено, что на СИП радионуклид  $^{90}\text{Sr}$  в почвах площадки «4а» характеризуется наибольшими параметрами подвижности и биологической доступности, по аналогии с площадкой «Дегелен» и условно «фоновыми» территориями, характеризующимися значительным содержанием обменной формы  $^{90}\text{Sr}$  в почве (52,0 % и 61,8 %, соответственно) [1]. Отметим, что на СИП наименьшей биологической доступностью и подвижностью в почвах  $^{90}\text{Sr}$  характеризуется на территории площадки «Опытное поле» (93,1 % в прочносвязанной форме), что обусловлено первоначальными формами нахождения радионуклида в выпадениях от проведенных на данной площадке испытаний и сопутствующим им механизмам образования радиоактивных частиц [2].

Высокий уровень валового содержания и суммарного содержания водорастворимой и обменной формы  $^{90}\text{Sr}$  обуславливают значительный переход  $^{90}\text{Sr}$  из почвы в растения при корневом поступлении. По данным исследования накопления радионуклидов растениями, произрастающими на СИП, наибольшие значения коэффициента накопления  $^{90}\text{Sr}$  характерны для мест испытания БРВ [3].

Результаты форм нахождения радионуклидов в почвах могут быть также использованы в качестве научного обоснования при выборе методов рекультивации участков испытания БРВ. В частности, использование метода перепашки почвы с перемещением загрязненного поверхностного слоя вглубь (до 10–15 см), который в настоящее время применяется для рекультивации радиоактивно загрязненных участков на площадке «Опытное поле» (место проведения наземных и воздушных ядерных взрывов), нецелесообразно на площадке «4а», поскольку возможен вынос радионуклида растениями из более глубоких слоев в верхние.

### **Выводы**

Результаты исследований выявили неоднородный характер распределения форм нахождения радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  в почвах площадки «4а». Установлена высокая подвижность и биологическая доступность  $^{90}\text{Sr}$  в почвах исследуемых участков. Среднее содержание водорастворимой формы составляет 0,2 %, обменной – 55,2 %, органической – 4,4 %, подвижной – 17,4 %, прочносвязанной – 22,8 %. На СИП площадка испытания БРВ характеризуется наибольшими значениями параметров подвижности и биодоступности, что также подтверждается исследованиями накопления радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  зональными растениями, произрастающими на данной площадке.

Существует необходимость проведения дополнительных исследований территории площадки «4а» для изучения влияния физико-химических свойств почв на поведение  $^{90}\text{Sr}$  в почве, а также определения характера распределения форм нахождения радионуклидов в почвенном профиле.

Полученные результаты являются важным фактором при выборе технологии рекультивации участков испытания БРВ, а также накладывают определенные ограничения на дальнейшее обращение с загрязненными грунтами данной площадки.

### **Список литературы**

1. Кабдыракова А.М. Формы нахождения радионуклидов в почвах экосистем водотоков горного массива Дегелен / А.М. Кабдыракова, А.Е. Кундузбаева., С.Н. Лукашенко // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Института радиационной

безопасности и экологии за 2007–2009 гг.] / под рук. С.Н. Лукашенко. – Вып. 2. – Павлодар: Дом печати, 2010. – 527 с.

2. Кундузбаева А.Е. Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах на территории площадки «Опытное поле» / А.Е. Кундузбаева., С.Н.Лукашенко, Р.Ю. Магашева // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [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.

3. Ларионова Н.В. Сравнительный анализ параметров накопления радионуклидов растениями для различных участков бывшего СИП / Н.В. Ларионова [и др.]. //Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [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. 149-158.

4. Логачев В. Радиоэкологические последствия испытаний БРВ на Семипалатинском полигоне // Бюллетень по атомной энергии. – 2002. – № 12. – С. 62-67.

5. Миграция и трансформация физико-химических форм радионуклидов аварийных выпадений ЧАЭС в почвах и лесных подстилках / под ред. А. В. Трапезниковой, С. М. Вовка, Л. Н. Михайловская // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. – Заречный, 1999. – Вып. 2. – 359 с.

6. Осинцев А.Ю., Сальменбаев С.Е. Исследование характера и уровней радиоактивного загрязнения площадки испытаний боевых радиоактивных веществ // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6-2. – С. 279-287.

7. Speciation of radionuclides in the environment. B. Salbu, L. Skipperud // Journal of Environmental Radioactivity, 100 (2009), 281-282.

8. Analyst, 2008, 133, 25-46, Jeffrey R.Bacon, Christine M. Daidson. Is there a future for sequential chemical extraction?

9. Павлоцкая Ф.И. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах / Ф.И. Павлоцкая. – М.: Атомиздат, 1974. – 215 с.

10. Пономарева В.В. Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения) / В.В. Пономарева, Т.А. Плотникова. – Л.: Наука, 1980. – 222 с.

11. Почвы Казахской ССР. Павлодарская область. – Алма-Ата: Наука, 1960. – Вып. 3. – 265 с.

12. Почвы Казахской ССР. Карагандинская область. – Алма-Ата: Наука, 1967. – Вып. 8. – 330 с.

13. Почвы Казахской ССР. Семипалатинская область. – Алма-Ата: Наука, 1968. – Вып. 10. – 474 с.



14. KZ.07.00.00471-2005 Методика определения содержания искусственных радионуклидов  $\text{Pu}^{239+240}$  и  $\text{Sr}^{90}$  в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях). – Алматы: Изд-во стандартов, 2010. – 24 с.
15. KZ.07.00.00303-2004 Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». – Менделеево: ГНМЦ «ВНИИФТРИ», 2004. – 30 с.