

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-196-204>

УДК 502.51:539.16:504.5 (574.41)

СОВРЕМЕННЫЕ УРОВНИ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПЛОЩАДКИ «ТЕЛЬКЕМ»

А. К. Айдарханова*, Н. В. Ларионова, А. С. Мамырбаева, Ж. Е. Тлеуканова, Т. Ю. Богатырева, Р. Г. Ермакова

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП «НЯЦ РК», Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: almira@nnc.kz

В работе приводятся данные комплексных исследований уровней и характера распределения радионуклидного загрязнения в системе «донные отложения / почва - вода - растения» водных объектов площадки «Телькем» Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Объектами исследования являлись воронки «Телькем-1» и «Телькем-2», образованные в результате экскавационных взрывов, заполненные водой. В рамках данных исследований проведен сопряженный отбор проб донных отложений, почвы, воды, растений, в которых проводилось определение содержания техногенных ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и γ -излучающих радионуклидов. В результате установлено, что на текущий момент сохраняется высокий уровень радиоактивного загрязнения экосистемы водных объектов площадки «Телькем», как для донных отложений (для радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$), так и для воды (для ^{90}Sr). На основе полученных данных рассчитаны коэффициенты распределения (K_p) для системы «донные отложения - вода», а также коэффициенты накопления (K_{Hs-b}) для системы «донные отложения / почва - растения». Коэффициент распределения K_p для ^{90}Sr в среднем равен 10, K_p для $^{239+240}\text{Pu}$ – $3,7 \cdot 10^5$. Накопительная способность растений из донных отложений и почвы водных экосистем площадки «Телькем» по отношению к техногенным радионуклидам снижается в ряду $K_{Hs-b}^{90}\text{Sr} > K_{Hs-b}^{60}\text{Co} > K_{Hs-b}^{137}\text{Cs} > K_{Hs-b}^{152}\text{Eu} > K_{Hs-b}^{241}\text{Am} > K_{Hs-b}^{239+240}\text{Pu}$.

Ключевые слова: «Телькем», радионуклидное загрязнение, донные отложения, вода, растения, коэффициент распределения, коэффициент накопления.

ВВЕДЕНИЕ

В период с 1965 по 1988 гг. на территории бывшего СССР в рамках реализации государственной программы № 7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства» было произведено 124 промышленных «мирных» ядерных взрыва с подрывом 135 зарядов по данным профессора В.А. Логачева [1]. Из них 39 взрывов с подрывом 46 зарядов – на территории Казахской ССР, в том числе 7 взрывов (9 зарядов) – на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП). В то же время академик А.В. Яблоков приводит другие цифры: в 169 «мирных» ядерных взрывах было подорвано 186 ядерных устройств, в том числе, на территории Казахстана – 81 «мирный» ядерный взрыв (взорвано 95 взрывных устройств, включая СИП) [2].

Цели преследовались самые разные: сейсморазведка земной коры и поиск полезных ископаемых; интенсификация добычи нефти и газа и создание подземных резервуаров для их хранения; перекрытие аварийных газовых фонтанов; дробление рудных пластов; предотвращение выброса метана в угольных шахтах; захоронение отходов нефтехимического производства; выброс грунта для строительства каналов, плотин, водохранилищ и т.д.

Тем не менее, в экологическом отношении каждый «мирный» ядерный взрыв, независимо от целей его использования, представляет собой значительную опасность для окружающей среды и человека, так как является источником радиоактивного загрязнения. Объекты проведения ядерных взрывов в мир-

ных целях являются радиационно-неблагополучными из-за наличия радионуклидного загрязнения территорий или наличия приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов («Кристалл», «Тайга», «Глобус-1» и т.д.) [3–6]. Несмотря на то, что на многих объектах мирных ядерных взрывов проведены мероприятия по реабилитации и дезактивации загрязненных территорий, на текущий момент они могут представлять радиоэкологическую опасность при выходе техногенных радионуклидов на земную поверхность с водой или добываемой продукцией («Вега», «Кама-1», «Гелий» и т.д.) [7, 8]. Также существуют объекты, на которых вынос радионуклидов по природным факторам маловероятен и возможен в основном при бурении в зону взрыва («Агат», «Пирит» и т.д.) [9, 10].

К числу ядерных испытаний, проводимых в «мирных» целях, относятся и экскавационные взрывы на площадке «Телькем». В ходе проведения данных экспериментов отрабатывались технологии сооружения каналов, которые можно было бы использовать для отвода воды из арктических районов страны в бассейн реки Волга и в Каспийское море. Согласно литературным источникам, были получены данные, необходимые для планирования работ по созданию канала Печора-Кама [11].

Испытательная площадка «Телькем» расположена в юго-восточной части СИП (рисунок 1а). На ее территории проведено два подземных ядерных испытания с выбросом грунта: одиночный взрыв «Телькем-1» и групповой «Телькем-2».

Первое испытание – это произведенный 21 октября 1968 г. на глубине 31,4 м одиночный подземный ядерный взрыв с выбросом грунта «Телькем-1» мощностью 0,24 кт. Целью проведения этого взрыва было изучение параметров механического и радиационного факторов для последующего использования полученных данных при подготовке и проведении группового взрыва наружного действия. В результате взрыва образовалась воронка глубиной 21 м и диаметром 80 м от дневной поверхности, которая через несколько дней после взрыва заполнилась подземными водами [1].

Испытание «Телькем-2» (12 ноября 1968 г.) заключалось в подрыве 3-х зарядов мощностью по 0,24 кт, размещенных в скважинах глубиной 31,4 м каждая, расстояние между скважинами составляло 40 м. В результате взрыва образовалась траншейная выемка глубиной 22 м с навалом выброшенной породы, которая вскоре также заполнилась подземными водами. Уровни радиации на гребне навала грунта после взрывов составляли 0,20–0,30 мЗв/ч [1].

Место проведения экскавационных взрывов расположено в пределах следа радиоактивных выпадений от наземного испытания, проведенного на территории площадки «Опытное поле» 12 августа 1953 г. [12].

Ранее проведенные исследования радиационной ситуации на площадке «Телькем» выполнены в рамках различных проектов при поддержке международных организаций, таких как МНТЦ, НАТО и др., а также в рамках бюджетных программ, в том числе в ходе реализации программы по комплексному обследованию территории СИП с целью передачи земель в народнохозяйственный оборот [13–15]. Результаты исследований показали, что максимальное содержание радионуклидов в почве, достигающие десятки тысяч Бк/кг по ^{137}Cs и ^{241}Am , находится на отвалах. Удельная активность радионуклидов в почвах заметно понижается с увеличением расстояния от эпицентра. Основным загрязняющим радионуклидом поверхностных вод является ^{90}Sr [3, 16].

Целью данных исследований являлась оценка радиоактивного загрязнения экосистемы водных объектов площадки «Телькем». В ходе работы определены уровни и характер распределения радионуклидного загрязнения в системе «донные отложения / почва – вода – растения» и рассчитаны параметры перехода [17] – коэффициенты распределения (K_p) для системы «донные отложения - вода», и коэффициенты накопления (K_{HS-b}) для системы «донные отложения / почва - растения».

1. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Методология проведения исследований

Объектами исследования являлись компоненты экосистемы воронок площадки «Телькем», которые являются водными объектами с частично восстановленным растительным покровом. «Телькем-1» – это воронка округлой формы, заполненная водой, с диаметром 80 м и глубиной 15 м (рисунок 1б). В воде от береговой линии на расстоянии до 2–2,5 метров в глубину произрастает валлиснериево-рдестовое сообщество: рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus*) и валлиснерия обыкновенная (*Vallisneria vulgaris*). По кромке берега произрастает тростник южный (*Phragmites australis*), камыш озерный (*Schoenoplectus lacustris*) и гребенщик ветвистый (*Tamarix ramosissima*) высотой порядка 2 м.

«Телькем-2» – вытянутая по форме воронка длиной 120 м, шириной 50 м и глубиной 10 м (рисунок 1в). Воронка характеризуется небольшим количеством растений, внутри водоем без растений, на берегу произрастает гребенщик ветвистый (*Tamarix ramosissima*) высотой до 5 м.

Для проведения исследований на воронке «Телькем-1» заложено 3 участка отбора проб, на воронке «Телькем-2» – 2 участка (рисунок 1б, в). Количество исследуемых участков было ограничено вследствие того, что на обеих воронках склоны навалов круто спускаются к поверхности воды и затрудняют проход по периметру объекта.

Для определения характера распределения радионуклидного загрязнения на каждом участке проводился сопряженный отбор проб донных отложений/почвы, воды и растений.

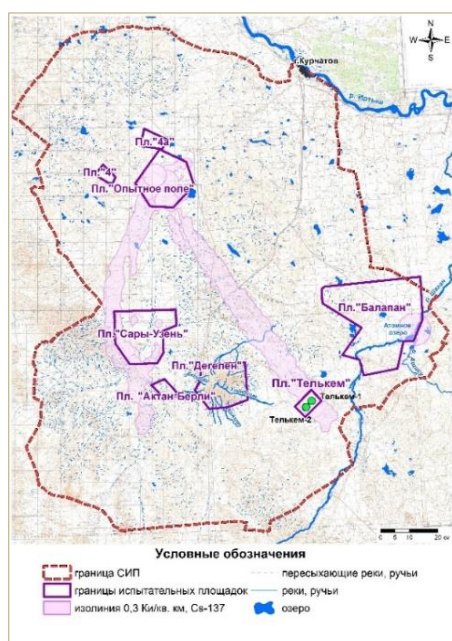
В воронке «Телькем-1» отбирались высшие водные растения, принадлежащие к 2 экологическим группам в зависимости от места их произрастания:

- *водные* – это укорененные, погруженные в толщу воды растения – рдест гребенчатый и валлиснерия обыкновенная;

- *воздушно-водные* – это укорененные растения с надводными листьями, корни и нижняя часть стебля которых находятся в воде – тростник южный и камыш озерный.

Для этих растений рассматривалась система «донные отложения - растения».

Также в рамках данных исследований отбирались прибрежные растения: гребенщик ветвистый, произрастающий в прибрежной зоне обеих воронок, и соловка голая, произрастающая в прибрежной зоне воронки «Телькем-2». Для данной группы растений для дальнейших исследований дополнительно отбиралась почва и рассматривалась система «почва - растения».



а)



б)



в)

Рисунок 1. Семипалатинский испытательный полигон (а), воронка «Телькем-1» (б), воронка «Телькем-2» (в)

1.2. Отбор проб

Отбор проб донных отложений и воды проводился на расстоянии порядка 30–40 см от береговой линии, при этом глубина водоема в точке отбора составляла 50–60 см. Отбор донных отложений проводился на глубину 0–10 см [18]. Пробы воды отбирались из придонного слоя объемом 10 л [19]. У растений отбиралась наземная часть. Проба почвы отбиралась методом конверта с площади $\approx 1 \text{ м}^2$.

Предварительная подготовка проб заключалась в следующем. Пробы донных отложений и почвы высушивались, просеивались и гомогенизировались. Пробы воды объемом 10 л концентрировались с помощью метода соосаждения: $^{239+240}\text{Pu}$ с гидроксидом железа (III), ^{90}Sr с карбонатом кальция, ^{137}Cs с гекса-цианоферратом меди [20]. Пробы растений промывались, измельчались, высушивались и озолялись.

1.3. Проведение измерений

В отобранных пробах проводилось определение содержания ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и γ -излучающих радионуклидов (^{137}Cs , ^{241}Am , ^{152}Eu и ^{60}Co).

Во всех полученных образцах с помощью γ -спектрометрических измерений определялось содержание γ -излучающих радионуклидов [21]. Определение содержания ^{90}Sr выполнялось β -спектрометрическим методом по дочернему ^{90}Y после предварительного радиохимического выделения. Определение содержания $^{239+240}\text{Pu}$ проводилось с помощью α -спектрометрического метода после экстракционно-хроматографического выделения и электролитического осаждения [22].

Для проведения γ -спектрометрических измерений использовались γ -спектрометры компании Ortec, состоящие из германиевых детекторов, импульсных анализаторов и соответствующего программного обеспечения. Для измерения проб растений использовался γ -спектрометр с детектором колодезного типа.

Определение содержания ^{90}Sr проводилось с использованием жидкостно-сцинтилляционного β -спектрометра «TRI CARB 2900 TR». Для контроля химического выхода ^{90}Sr при проведении анализов использовался трассер ^{85}Sr .

Определение содержания $^{239+240}\text{Pu}$ проводилось с использованием α -спектрометра фирмы Canberra Co, состоящего из вакуумных ячеек, детекторов α -излучения, импульсного анализатора и программного обеспечения GENIE2000. Для контроля химического выхода $^{239+240}\text{Pu}$ при проведении анализов использовался трассер ^{242}Pu .

Также проведен анализ химического состава воды [23] для оценки его влияния на распределение радионуклидного загрязнения в системе «донные отложения - вода».

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Уровни радионуклидного загрязнения водных объектов площадки «Телькем»

Содержание γ -излучающих радионуклидов в донных отложениях воронок площадки «Телькем» представлены в таблице 1, а их содержание в воде находится ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения ($<0,01 \text{ Бк/кг}$).

Таблица 1. Содержание γ -излучающих радионуклидов в донных отложениях

Место отбора		Удельная активность, Бк/кг			
		^{137}Cs	^{241}Am	^{152}Eu	^{60}Co
Телькем-1	уч. 1	570±55	1000±100	15±3	<3
	уч. 2	150±15	450±45	6±1	<3
	уч. 3	2400±250	7100±700	35±4	8±1
Телькем-2	уч. 4	370±30	1650±200	9±3	<3
	уч. 5	2100±200	3700±300	10±3	<3

Согласно полученным данным, γ -излучающие радионуклиды распределены неравномерно по периметру воронок, в зависимости от участка отбора изменяются от $n \cdot 10^2$ до $n \cdot 10^3$ Бк/кг для ^{137}Cs и ^{241}Am , и от $n \cdot 10^0$ до $n \cdot 10^1$ Бк/кг для ^{152}Eu . Максимально загрязненным γ -излучающими радионуклидами является участок 3 воронки «Телькем-1», где фиксируется численное значение ^{60}Co .

Далее данные о содержании γ -излучающих радионуклидов в донных отложениях будут использованы при расчете параметров накопления водных и воздушно-водных растений.

Содержание техногенных радионуклидов ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях и воде представлены в таблице 2. На основе полученных данных рассчитаны коэффициенты распределения K_p , как отношение содержания (удельной активности) радионуклида в донных отложениях к содержанию (удельной активности) в воде. Коэффициенты распределения K_p , также представлены в таблице 2.

Содержание радионуклидов ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях на всех участках исследуемых объектов находятся примерно на одном уровне: содержание ^{90}Sr в донных отложениях – $n \cdot 10^2$ Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях – $n \cdot 10^4$ Бк/кг. По содержанию радионуклидов ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях максимально загрязненным также является участок 3 воронки «Телькем-1».

Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в воде на всех участках исследуемых объектов находятся примерно на одном

уровне – $n \cdot 10^{-1}$ Бк/кг. Но содержание ^{90}Sr в воде воронки «Телькем-2» ($n \cdot 10^2$ Бк/кг) на порядок превышает содержание в воде воронки «Телькем-1» ($n \cdot 10^1$ Бк/кг). Это отражается на K_p , который для ^{90}Sr выше примерно на порядок для воронки «Телькем-1», чем для воронки «Телькем-2», и изменяется от $1,3 \cdot 10^0$ до $2,5 \cdot 10^1$. Для $^{239+240}\text{Pu}$ K_p остается на одном уровне для обеих воронок – от $2,2 \cdot 10^5$ до $6,5 \cdot 10^5$.

Химический состав воды исследуемых объектов представлен в таблице 3.

Анализ химического состава вод воронок площадки «Телькем» показывает, что воды по уровню pH являются слабощелочными, по степени жесткости – очень жесткими, по степени минерализации вода воронки «Телькем-2» – солоноватой, «Телькем-1» – соленой. Вероятно, именно степень минерализации воды влияет на переход ^{90}Sr из донных отложений в воду. Минерализация воды воронки «Телькем-1» составляет 16,3 г/л, что в 2,5 раза выше, чем минерализация воды воронки «Телькем-2» – 6,4 г/л. Соответственно, содержание макрокомпонентов катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , аналогов Sr, в 2–2,5 раза выше в воде воронки «Телькем-1», что препятствует переходу ^{90}Sr в воду. Поэтому, содержание ^{90}Sr в воде воронки «Телькем-1» на порядок ниже, чем в воде воронки «Телькем-2».

Также, для оценки параметра накопления радионуклидов прибрежными растениями определено содержание техногенных радионуклидов в почве в местах их произрастания, которое представлено в таблице 4.

Как видно из таблицы 4, содержание радионуклидов в почве находится примерно на том же уровне или незначительно превышает содержание в донных отложениях на тех же участках исследования. Лишь в ряде случаев содержание радионуклидов в почве на порядок превышает содержание в донных отложениях: ^{241}Am на участке 2 воронки «Телькем-1», ^{137}Cs на участке 4 воронки «Телькем-2», и $^{239+240}\text{Pu}$ на обоих участках воронки «Телькем-2».

 Таблица 2. Содержание техногенных радионуклидов ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях и воде, и коэффициенты распределения K_p

Место отбора		Удельная активность ^{90}Sr , Бк/кг		K_p	Удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$, Бк/кг		K_p
		Донные отложения	Вода		Донные отложения	Вода	
Телькем-1	уч. 1	380±60	32±5	11,9	$(2,8 \pm 0,1) \times 10^4$	$0,13 \pm 0,01$	$2,2 \cdot 10^5$
	уч. 2	260±40	29±4	8,9	$(2,6 \pm 0,1) \times 10^4$	$0,12 \pm 0,01$	$2,2 \cdot 10^5$
	уч. 3	710±110	28±4	25,4	$(9,9 \pm 0,5) \times 10^4$	$0,21 \pm 0,02$	$4,7 \cdot 10^5$
Телькем-2	уч. 4	140±30	110±10	1,3	$(3,9 \pm 0,2) \times 10^4$	$0,17 \pm 0,01$	$2,3 \cdot 10^5$
	уч. 5	400±60	130±10	3,1	$(9,8 \pm 0,6) \times 10^4$	$0,15 \pm 0,01$	$6,5 \cdot 10^5$

Таблица 3. Химический состав воды водных объектов площадки «Телькем»

Место отбора	pH	Минерализация, мг/дм ³	Жесткость, ммоль/дм ³	Содержание катионов, мг/дм ³			Содержание анионов, мг/дм ³		
				$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}
Телькем-1	7,7	16300	100	4120	550	920	6060	2420	3470
Телькем-2	7,9	6400	44	1350	300	350	2210	380	1630

Таблица 4. Содержание техногенных радионуклидов в почве

Место отбора		Удельная активность, Бк/кг					
		^{137}Cs	^{241}Am	^{152}Eu	^{60}Co	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$
Телькем-1	уч. 2	860±90	3100±300	25±3	4±1	190±30	$(4,4\pm0,5)\cdot 10^4$
Телькем-2	уч. 4	600±60	1300±150	55±6	6±1	200±30	$(1,7\pm0,1)\cdot 10^5$
	уч. 5	1900±200	7000±700	60±6	9±1	280±40	$(1,4\pm0,1)\cdot 10^5$

Таблица 5. Содержание техногенных радионуклидов в растениях

Место отбора		Вид растения		Удельная активность, Бк/кг					
				^{137}Cs	^{241}Am	^{152}Eu	^{60}Co	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$
Телькем-1	уч. 3	водные	рдест гребенчатый	690±140	$(1,3\pm0,3)\cdot 10^3$	5,1±1,0	2,7±0,5	$(5,3\pm0,8)\cdot 10^3$	$(1,5\pm0,1)\cdot 10^4$
	уч. 3		валлиснерия обыкновенная	$(1,6\pm0,3)\cdot 10^3$	$(1,0\pm0,2)\cdot 10^3$	3,9±0,8	4,4±0,9	$(5,4\pm0,8)\cdot 10^3$	$(1,6\pm0,1)\cdot 10^4$
	уч. 1	воздушно-водные	тростник южный	<0,2	<0,2	<0,1	<0,1	260±40	150±10
	уч. 2		камыш озерный	<0,2	<0,1	<0,2	<0,1	390±60	8,2±0,7
	уч. 3		камыш озерный	<0,1	<0,1	<0,2	<0,1	68±10	27±4
	уч. 2	прибрежные	гребенщик ветвистый	10±1	<2	<0,6	<0,3	690±100	5,1±1,2
Телькем-2	уч. 4		солодка голая	<2	<1	<0,2	<0,1	600±90	110±10
	уч. 5		гребенщик ветвистый	3±1	7±1	<0,3	<0,2	430±60	11±2

2.2. Характер радионуклидного загрязнения растений водных объектов площадки «Телькем»

Содержание техногенных радионуклидов в растениях водных объектов площадки «Телькем» представлено в таблице 5. Здесь и далее все данные о содержании техногенных радионуклидов в растениях даны на сухую массу растений.

Максимальное радиоактивное загрязнение отмечается для водных растений, произрастающих на участке 3. Данный участок характеризовался максимально загрязненными донными отложениями по всем техногенным радионуклидам.

Наибольшие значения удельной активности в растениях в целом отмечаются для ^{90}Sr от 68 ± 10 Бк/кг до $(5,4\pm 0,8)\cdot 10^3$ Бк/кг. Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ фиксируется во всех исследованных образцах и составляет от $5,1\pm 1,2$ Бк/кг до $(1,6\pm 0,1)\cdot 10^4$ Бк/кг. Численные значения содержания ^{152}Eu и ^{60}Co зафиксированы только в образцах водных растений на уровне от $3,9\pm 0,8$ Бк/кг до $5,1\pm 1,0$ Бк/кг для ^{152}Eu и от $2,7\pm 0,5$ Бк/кг до $4,4\pm 0,9$ Бк/кг для ^{60}Co . В образцах двух других групп растений их содержание находится ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения. Численные значения содержания ^{137}Cs и ^{241}Am также зафиксированы только в образцах водных растений на уровне от 690 ± 140 Бк/кг до $(1,6\pm 0,3)\cdot 10^3$ Бк/кг для ^{137}Cs и на уровне $(1,3\pm 0,3)\cdot 10^3$ Бк/кг для ^{241}Am . Также ^{137}Cs и ^{241}Am единично зафиксированы на других участках в

образцах гребенщика ветвистого на уровне 10 ± 1 Бк/кг и 7 ± 1 Бк/кг соответственно. Вероятно, это связано с тем, что гребенщик ветвистый – это кустарник, поэтому содержание радионуклидов в образцах данного растения может характеризовать многолетнее накопление.

На основе полученных количественных данных рассчитаны коэффициенты накопления ($K_{\text{Hs-b}}$), как отношение содержания (удельной активности) радионуклидов в растениях к содержанию (удельной активности) в донных отложениях для водных и воздушно-водных растений, а для прибрежных растений – как отношение содержания радионуклидов в растениях к содержанию в почве. Диапазоны значений $K_{\text{Hs-b}}$ представлены в таблице 6.

Согласно полученным данным, $K_{\text{Hs-b}}$ для водных растений выше на 1–3 порядка, чем для воздушно-водных и прибрежных растений. Исключение составляет радионуклид ^{90}Sr , для которого $K_{\text{Hs-b}}$ находятся примерно на одном уровне для всех групп растений, но, тем не менее, для водных растений в несколько раз (4–7) выше, чем для двух других групп растений. Это свидетельствует о том, что водные растения более интенсивно накапливают в себе техногенные радионуклиды, чем воздушно-водные и прибрежные растения.

В целом, накопительная способность растений из донных отложений и почвы водных экосистем по отношению к техногенным радионуклидам снижается в ряду $K_{\text{Hs-b}}^{90}\text{Sr} > K_{\text{Hs-b}}^{60}\text{Co} > K_{\text{Hs-b}}^{137}\text{Cs} > K_{\text{Hs-b}}^{152}\text{Eu} > K_{\text{Hs-b}}^{241}\text{Am} > K_{\text{Hs-b}}^{239+240}\text{Pu}$.

Таблица 6. Диапазоны значений коэффициентов накопления (K_{Hs-b}) для трех групп растений

Группы растений	K_{Hs-b}					
	^{137}Cs	^{241}Am	^{152}Eu	^{60}Co	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$
водные	<u>0,48 (n=2)*</u> 0,29–0,67	<u>0,16 (n=2)</u> 0,14–0,18	<u>0,13 (n=2)</u> 0,11–0,14	<u>0,45 (n=2)</u> 0,34–0,55	<u>7,6 (n=2)</u> 7,5–7,6	<u>0,16 (n=2)</u> 0,15–0,16
воздушно-водные	–	–	–	–	<u>0,76 (n=3)</u> 0,1–1,5	<u>0,0075 (n=3)</u> $2,7 \cdot 10^{-4}$ – $1,5 \cdot 10^{-2}$
прибрежные	<u>0,0068 (n=3)</u> $3,3 \cdot 10^{-4}$ – $1,2 \cdot 10^{-2}$	<u>0,0011 (n=1)</u> –	–	–	<u>2,4 (n=3)</u> 1,5–3,0	<u>0,00028 (n=3)</u> $7,8 \cdot 10^{-5}$ – $6,5 \cdot 10^{-4}$
Средние K_{Hs-b}	0,24	0,11	0,13	0,45	3,1	0,042

Примечание: * – в числителе – среднее значение, в знаменателе – область значений, в скобках – количество.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что экскавационные взрывы в «мирных» целях на площадке «Телькем» проведены более 55 лет назад, высокий уровень радиоактивного загрязнения экосистемы водных объектов площадки сохраняется до сегодняшнего дня, как для донных отложений (^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$), так и для воды (^{90}Sr). А по содержанию $^{239+240}\text{Pu}$ донные отложения и почвы прибрежной зоны воронок можно отнести к категории радиоактивных отходов.

Коэффициенты распределения K_p для $^{239+240}\text{Pu}$ составляют $n \cdot 10^5$, для γ -излучающих радионуклидов K_p не получены, так как их содержание в воде находится ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения. Из этого следует, что большая часть данных радионуклидов в системе «донные отложения - вода» сосредоточена в донных отложениях. В отношении ^{90}Sr , для которого в некоторых случаях получен K_p равный $n \cdot 10^0$, то в таком водном объекте ^{90}Sr может содержаться в сопоставимых количествах как в донных отложениях, так и в воде.

Полученные K_{Hs-b} для водных растений выше на 1–3 порядка чем для воздушно-водных и прибрежных растений. Это может свидетельствовать о том, что водные растения интенсивнее накапливают техногенные радионуклиды, чем воздушно-водные и прибрежные растения. Исключение составляет радионуклид ^{90}Sr , для которого K_{Hs-b} находятся примерно на одном уровне для всех видов растений.

Таким образом, γ -излучающие радионуклиды и $^{239+240}\text{Pu}$ могут равномерно распределяться в системе «донные отложения - водные растения», но для систем «донные отложения - вода» и «донные отложения - воздушно-водные растения» их основное содержание сосредоточено в донных отложениях. Тогда как ^{90}Sr может равномерно распределяться во всех компонентах системы «донные отложения / почва - вода - растения», независимо от вида растений, что еще раз подчеркивает его высокую миграционную способность и биодоступность.

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / под рук. проф. В.А. Логачева – М.: Изд.АТ, 2001 – С. 265–271.
2. Яблоков, А.В. Миф о безопасности и эффективности мирных подземных ядерных взрывов. – М.: ЦЭПР, 2003. – 176 с.
3. Касаткин, В.В. Объекты ядерных взрывов в Якутии: реабилитация и современное состояние / Касаткин В.В., Ильичев В.А., Латышев В.Е., Мамонов Б.П. // Безопасность окружающей среды: Реабилитация радиационно-загрязненных территорий и объектов, 2009 – № 3. <http://www.atomic-energy.ru/articles/2011/12/21/29710>
4. Голубов, Б.Н. Подземный ядерный взрыв «Глобус-1» и дальняя миграция его радионуклидов к подземным источникам питьевого водоснабжения Кинешемского района Ивановской области / Голубов Б.Н., Сапожников Ю.А. // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. – 2016. – Т. 13. – Вып. 1.
5. Касаткин, В.В. Экспертная оценка радиационного риска объектов мирных ядерных взрывов (МЯВ) на основе выбранных эмпирических критериев / Касаткин В.В., Ильичев В.А., Камнев Е.Н., Касаткин А.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 8 – С.198–201.
6. Артамонова, С.Ю. Техногенные радионуклиды в природных водах районов мирных подземных ядерных взрывов «Кратон-3» и «Кратон-4» / Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2013. – № 5. – С. 417–428.
7. Чуйков, Ю.С. Объект «Вега» и последствия ядерных взрывов в мирных целях (обзор) / Чуйков Ю.С., Досмухамедова Г.Г. // Астраханский вестник экологического образования. – 2006. – № 1–2 (8–9). – С. 46–71.
8. Стрючков, С.А. Мирные ядерные взрывы Таймыра / Стрючков С.А. – URL: <https://goarctic.ru/work/mirnyeyadernye-vzryvy-taymyra/> (дата обращения 22.11.2024)
9. Голубов, Б.Н. Новые данные о радиационных и длительных геодинамических последствиях подземного ядерного взрыва «Горизонт-4» (кряж Чекановского, Якутия) / Голубов Б.Н., Ушницкий В.Е. // Вестник НЯЦ РК. – 2008. – № 1. – С. 33–43.
10. Артамонова, С.Ю. Современная радиозоологическая ситуация на объекте мирного подземного ядерного взрыва «Кратон-3» (1978 г.) в Якутии / Астраханский вестник экологического образования. – 2016. – № 3 (37). – С. 14–24.
11. Актуальные вопросы радиозоологии Казахстана [Оптимизация исследований территорий Семипалатинско-

- го испытательного полигона с целью их передачи в хозяйственный оборот] / под рук. С. Н. Лукашенко. – Павлодар: Дом печати, 2015. – Вып. 5. – С. 90–93 – ISBN 978-601-7112-99-8.
12. Лукашенко С.Н. Радиоэкологическое состояние «Юго-Восточной» части территории СИП / Лукашенко С.Н., Стрильчук Ю.Г., Яковенко Ю.Ю. и др. // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2014–2016 г.] / под ред. Э.Г. Батырбекова, С.Н. Лукашенко – Павлодар: Дом печати, 2017. – Т. 1. – Вып. 6. – С. 11–90. – ISBN 978-601-7844-53-0.
 13. Разработка основ и выбор технологий ликвидации поверхностного загрязнения и способов ограничения вторичного загрязнения территории Семипалатинского Испытательного Полигона: заключительный технический отчет по Проекту МНТЦ К-337 / Институт ядерной физики НЯЦ РК (ИЯФ НЯЦ РК); С. Хажебер. – Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2003.
 14. Изучение радиологической ситуации в районе п. Саржал на Семипалатинском испытательном полигоне: заключительный отчет по проекту NATO Sfp-976046(99) / Н. Прист, М. Буркитбаев, О. Артемьев, С. Н. Лукашенко, П. Митчелл. – 2003.
 15. Материалы комплексного экологического обследования «юго-восточной» части территории СИП, район площадок «Балапан», «Дегелен», «Телькем». / Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК; рук. С. Н. Лукашенко – Курчатов: ИРБЭ НЯЦ РК, 2013. – 341 с.
 16. Кабдыракова А.М. Распределение радионуклидов в гранулометрических фракциях почвы в местах экскавационных ядерных взрывов на площадках «Телькем» на Семипалатинском испытательном полигоне / Кабдыракова А.М., Кундузбаева А.Е., Лукашенко С.Н. и др. // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2014–2016 г.] / под ред. Э.Г. Батырбекова, С.Н. Лукашенко – Павлодар: Дом печати, 2017. – Т.1. – Вып. 6. – С. 306–317.
 17. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Technical Reports Series No. 472, IAEA, Vienna, 2010 – 197 p.
 18. ГОСТ 17.1.5.01.-80. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. Москва, 1984 г.
 19. СТ РК ГОСТ 51592-2003. Вода. Общие требования к отбору проб / Утвержден и введен в действие приказом Комитета по стандартизации, метрологии и сертификации Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан 07 ноября 2003 года № 380.
 20. Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90 и цезия-137 в природных водах методом концентрирования. Алматы, 2001 г.
 21. 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. – 17 с.
 22. Методика определения изотопов плутония-(239+240), стронция-90 и америция-241 в объектах окружающей среды (почвы, растения, природные воды) / № 06-7-98 от 04 марта 1998 г. – Алматы: Алматинское ГП «ЦСМС», 1998.
 23. ГОСТ 26449.1-85 Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы химического анализа соленых вод. ГОСТ 26449.1-85. Москва, 1987.

REFERENCES

1. Mirnye yadernye vzryvy: obespechenie obshchey i radiatsionnoy bezopasnosti pri ikh provedenii / pod ruk. prof. V.A. Logacheva – MOSCOW.: Izd.AT, 2001 – P. 265–271.
2. Yablokov, A.V. Mif o bezopasnosti i effektivnosti mirnykh podzemnykh yadernykh vzryvov. – Moscow.: TsEPR, 2003. – 176 p.
3. Kasatkin, V.V. Ob"ekty yadernykh vzryvov v Yakutii: reabilitatsiya i sovremennoe sostoyanie / Kasatkin V.V., Il'ichev V.A., Latyshev V.E., Mamonov B.P. // Bezopasnost' okruzhayushchey sredy: Reabilitatsiya radiatsionno-zagryaznennykh territoriy i ob"ektov, 2009 – No. 3 <http://www.atomic-energy.ru/articles/2011/12/21/29710>
4. Golubov, B.N. Podzemnyy yadernyy vzryv «Globus-1» i dal'naya migratsiya ego radionuklidov k podzemnym istochnikam pit'evogo vodosnabzheniya Kineshemskogo rayona Ivanovskoy oblasti / Golubov B.N., Sapozhnikov Yu.A. // Elektronnoe nauchnoe izdanie Al'manakh Prostranstvo i Vremya. – 2016. – Т. 13. – Issue 1.
5. Kasatkin, V.V. Ekspertnaya otsenka radiatsionnogo riska ob"ektov mirnykh yadernykh vzryvov (MYaV) na osnove vybrannykh empiricheskikh kriteriev / Kasatkin V.V., Il'ichev V.A., Kamnev E.N., Kasatkin A.V. // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal). – 2013. – No. 8 – P.198–201.
6. Artamonova, S.Yu. Tekhnogennye radionuklidy v prirodnykh vodakh rayonov mirnykh podzemnykh yadernykh vzryvov «Kraton-3» i «Kraton-4» / Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. – 2013, – No. 5. – P. 417–428.
7. Chuykov, Yu.S. Ob"ekt «Vega» i posledstviya yadernykh vzryvov v mirnykh tselyakh (obzor) / Chuykov Yu.S., Dosmukhamedova G.G. // Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. – 2006. – No. 1–2 (8–9). – P. 46–71.
8. Stryuchkov, S.A. Mirnye yadernye vzryvy Taymyra / Stryuchkov S.A. – URL: <https://goarctic.ru/work/mirnye-yadernye-vzryvy-taymyra/> (data obrashcheniya – 22.11.2024 g.)
9. Golubov, B.N. Novye dannye o radiatsionnykh i dlitel'nykh geodinamicheskikh posledstviyakh podzemnogo yadernogo vzryva «Gorizont-4» (kryazh Chekanovskogo, Yakutiya) / Golubov B.N., Ushnitskiy V.E. // –Vestnik NYaTs RK. – 2008. – No. 1. – P. 33–43.
10. Artamonova, S.Yu. Sovremennaya radioekologicheskaya situatsiya na ob"ekte mirnogo podzemnogo yadernogo vzryva «Kraton-3» (1978 g.) v Yakutii / Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. – 2016. – No. 3 (37). – P. 14–24.
11. Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana [Optimizatsiya issledovaniy territoriy Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona s tsel'yu ikh peredachi v khozyaystvennyy oborot] / pod ruk. S. N. Lukashenko. – Pavlodar: Dom pechati, 2015. – Issue 5. – P. 90–93 – ISBN 978-601-7112-99-8.

12. Lukashenko S.N. Radioekologicheskoe sostoyanie «Yugo-Vostochnoy» chasti territorii SIP / Lukashenko S.N., Stril'chuk Yu.G., Yakovenko Yu.Yu. i dr. // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana [Sbornik trudov Natsional'nogo yadernogo tsentra Respubliki Kazakhstan za 2014–2016 g.] / pod red. E.G. Batyrbekova, S.N. Lukashenko – Pavlodar: Dom pechati, 2017. – T. 1. – Issue 6. – P. 11–90. – ISBN 978-601-7844-53-0.
13. Razrabotka osnov i vybor tekhnologiy likvidatsii poverkhnostnogo zagryazneniya i sposobov ograniчениya vtorichnogo zagryazneniya territorii Semipalatinskogo Ispytatel'nogo Poligona: zaklyuchitel'nyy tekhnicheskii otchet po Proektu MNTTs K-337 / Institut yadernoy fiziki NYaTs RK (IYaF NYaTs RK); S. Khazhekber. – Almaty: IYaF NYaTs RK, 2003.
14. Izuchenie radiologicheskoy situatsii v rayone p. Sarzhal na Semipalatinskom ispytatel'nom poligone: zaklyuchitel'nyy otchet pop proektu NATO Sfp-976046(99) / N. Prist, M. Burkitbaev, O. Artem'ev, S. N. Lukashenko, P. Mitchell. – 2003.
15. Materialy kompleksnogo ekologicheskogo obsledovaniya «yugo-vostochnoy» chasti territorii SIP, rayon ploschadok «Balapan», «Degelen», «Tel'kem». / Institut radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii» RGP NYaTs RK; ruk. S. N. Lukashenko – Kurchatov: IRBE NYaTs RK, 2013. – 341 p.
16. Kabdyrakova A.M. Raspredelenie radionuklidov v granulometricheskikh fraktsiyakh pochvy v mestakh ekskavatsionnykh yadernykh vzryvov na ploschadkakh «Tel'kem» na Semipalatinskom ispytatel'nom poligone / Kabdyrakova A.M., Kunduzbaeva A.E., Lukashenko S.N. i dr. // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana [Sbornik trudov Natsional'nogo yadernogo tsentra Respubliki Kazakhstan za 2014–2016 g.] / pod red. E.G. Batyrbekova, S.N. Lukashenko – Pavlodar: Dom pechati, 2017. – T. 1. – Issue 6. – P. 306–317.
17. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Technical Reports Series No. 472, IAEA, Vienna, 2010 – 197 p.
18. GOST 17.1.5.01.-80. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozheniy vodnykh ob'ektov dlya analiza na zagryaznennost'. Moscow, 1984 g.
19. ST RK GOST 51592-2003. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob / Utverzhden i vveden v deystvie prikazom Komiteta po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Ministerstva industrii i torgovli Respubliki Kazakhstan 07 noyabrya 2003 goda No. 380.
20. Metodika opredeleniya soderzhaniya iskusstvennykh radionuklidov plutoniya-(239+240), strontsiya-90 i tseziya-137 v prirodnykh vodakh metodom kontsentrirvaniya. Almaty, 2001 g.
21. MI 2143-91 No. 5.06.001.98 Aktivnost' radionuklidov v ob'emnykh obraztsakh. Metodika vypolneniya izmereniy na gamma-spektrometre. Rekomendatsiya. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. – Vved. 1998-06-02. – 1991. – 17 p.
22. Metodika opredeleniya izotopov plutoniya-(239+240), strontsiya-90 i ameritsiya-241 v ob'ektakh okruzhayushchey sredy (pochvy, rasteniya, prirodnye vody) / No. 06-7-98 ot 04 marta 1998 g. – Almaty: Almatinskoe GP «TsSMS», 1998.
23. GOST 26449.1-85 Ustanovki distillyatsionnye opresnitel'nye statsionarnye. Metody khimicheskogo analiza solenyykh vod. GOST 26449.1-85. Moscow, 1987.

«ТЕЛ'КЕМ» АЛАҢЫНДАҒЫ СУ ОБЪЕКТІЛЕРІНІҢ РАДИОНУКЛИДТІК ЛАСТАНУЫНЫҢ ҚАЗІРГІ КЕЗДЕГІ ДЕҢГЕЙЛЕРІ

А. К. Айдарханова*, Н. В. Ларионова, А. С. Мамырбаева, Ж. Е. Тлеуканова, Т. Ю. Богатырева, Р. Г. Ермакова

«ҚР ҰЯО» РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: almira@nnc.kz

Жұмыста Семей сынақ полигонының (ССП) «Телкем» алаңының су объектілерінің «түптік шөгінділер / топырақ - су - өсімдіктер» жүйесіндегі радионуклидтік ластанудың деңгейлері мен таралу сипатын кешенді зерттеу деректері келтіріледі. Экскавациялық жарылыстардың нәтижесінде пайда болып, су толған «Телкем-1» және «Телкем-2» шұңқырлары зерттеу объектілері болды. Аталған зерттеулер шеңберінде техногендік ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ және γ -сәуле шығаратын радионуклидтердің құрамын анықтау жүргізілген түптік шөгінділердің, топырақтың, судың, өсімдіктердің сынамаларына іріктеулер қатар жүргізілді. Нәтижесінде қазіргі уақытта «Телкем» алаңындағы су объектілері экожүйесінің түптік шөгінділері үшін де (^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr және $^{239+240}\text{Pu}$ радионуклидтері үшін), суы үшін де (^{90}Sr үшін) радиоактивті ластанудың жоғары деңгейі сақталып отырғаны анықталды. Алынған деректердің негізінде «түптік шөгінділер – су» жүйесі үшін таралу коэффициенттері (K_T), сондай-ақ «түптік шөгінділер / топырақ - өсімдіктер» жүйесі үшін жинақтау коэффициенттері ($K_{\text{Hs-b}}$) есептелді. ^{90}Sr үшін таралу коэффициенті K_T орта есеппен 10, $^{239+240}\text{Pu}$ үшін K_T – $3,7 \cdot 10^5$ тең. «Телкем» алаңының су экожүйелерінің түптік шөгінділері мен топырағындағы өсімдіктердің техногендік радионуклидтерге қатысты жинақтау қабілеті $K_{\text{Hs-b}}^{90}\text{Sr} > K_{\text{Hs-b}}^{60}\text{Co} > K_{\text{Hs-b}}^{137}\text{Cs} > K_{\text{Hs-b}}^{152}\text{Eu} > K_{\text{Hs-b}}^{241}\text{Am} > K_{\text{Hs-b}}^{239+240}\text{Pu}$ ретімен төмендейді.

Түйін сөздер: «Телкем», радионуклидтік ластану, түптік шөгінділер, су, өсімдіктер, таралу коэффициенті, жинақтау коэффициенті.

CURRENT LEVELS OF RADIONUCLIDE CONTAMINATION IN WATER BODIES
AT THE TELKEM TEST SITE

A. K. Aidarkhanova, N. V. Larionova, A. S. Mamyrbayeva, Zh. E. Tleukanova, T. Yu. Bogatyrova, R. G. Yermakova

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: almira@nnc.kz*

The paper provides data from the comprehensive studies of the levels and distribution pattern of radionuclide contamination in the 'bottom sediments/soil-to-water-to-plants' of water bodies at the Telkem site of the Semipalatinsk Test Site (STS). Research objects were water-filled craters Telkem-1 and Telekm-2 that resulted from excavation explosions. As part of these studies, sediments, soil, water, plants were dublicately sampled, in which the content of man-made ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ and γ -emitting radionuclides were determined. As a result, a high level of radioactive contamination is currently found to persist in the ecosystem of water bodies at the Telkem site both for sediments (^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr and $^{239+240}\text{Pu}$) and water (^{90}Sr). Based upon findings, the distribution coefficient (K_d) for the 'sediments-to-water' system and the concentration ratio (CR_{s-b}) were calculated for the 'sediments/soil-to-plants' system. The distribution coefficient K_d for ^{90}Sr averages 10, for $^{239+240}\text{Pu}$ – $3.7 \cdot 10^5$. Plants' capacity to accumulate from sediments and soil of aquatic ecosystems at the Telkem site, with respect to man-made radionuclides, decreases in the series $CR_{s-b}^{90}\text{Sr} > CR_{s-b}^{60}\text{Co} > CR_{s-b}^{137}\text{Cs} > CR_{s-b}^{152}\text{Eu} > CR_{s-b}^{241}\text{Am} > CR_{s-b}^{239+240}\text{Pu}$.

Keywords: *Telkem, radionuclide contamination, sediments, water, plants, distribution factor, transfer factor.*