

УДК 577.4: 504.4.054: 539.16

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Айдарханова А.К., Ларионова Н.В., Дашук А.Л.

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

В работе приводятся данные комплексных исследований уровней и характера распределения радионуклидного загрязнения в системе «донные отложения – вода – растения» водных объектов техногенного происхождения Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Объектами исследования являлись воронки, образованные в результате проведения ядерных испытаний, заполненные водой, расположенные на испытательных площадках «Опытное поле», «Балапан», «Телькем» и «Сары-Узень». В рамках данных исследований проведен сопряженный отбор проб донных отложений, воды, водных, прибрежно-водных и прибрежных растений, в которых проводилось определение содержания техногенных радионуклидов ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$. В результате проведенных исследований рассчитаны коэффициенты распределения (K_p) для донных отложений и воды, а также коэффициенты накопления (K_n) для растений. На основе полученных результатов дается анализ перераспределения радионуклидного загрязнения в водных объектах техногенного происхождения СИП.

ВВЕДЕНИЕ

Водные экосистемы территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) представлены лотическими (текучие воды – родники, ручьи, реки) и лентическими (стоячие воды – водоемы техногенного и природного происхождения) экосистемами [1].

Водоемы техногенного происхождения расположены на территории испытательных площадок «Опытное поле», «Балапан», «Телькем» и «Сары-Узень». Это, как правило, воронки, образованные в результате проведения ядерных испытаний, заполненные водой. Водоемы природного происхождения – это небольшие по площади природные озера, часть которых пересыхает к середине лета. Основные водотоки территории СИП – это ручьи площадки «Дегелен» и река Шаган, которая протекает вдоль границы площадки «Балапан» и выходит за границу СИП.

С точки зрения распределения радионуклидного загрязнения в водных экосистемах особый интерес представляют водоемы техногенного происхождения. В отличие от водных объектов, описанных в литературе, где радионуклиды первоначально поступают в воду, а затем происходит аккумуляция в донных отложениях, в водоемах техногенного происхождения СИП в первую очередь загрязнен грунт в результате проведения ядерных испытаний, затем образовавшиеся воронки заполнялись водой. В этом случае основным механизмом загрязнения вод является вымывание (выщелачивание) радионуклидов из прибрежного грунта и донных отложений. Целью данной работы является исследование перераспределения радионуклидного загрязнения в системе «донные отложения – вода – растения» водных объектов техногенного происхождения территории СИП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись водоемы техногенного происхождения территории СИП, которые условно можно разделить на следующие 3 типа:

– к I типу относятся воронки, образованные в результате проведения наземных ядерных и неядерных испытаний – воронки площадки «Опытное поле»;

– ко II типу – воронки, образованные в результате проведения экскавационных взрывов – «Атомное» озеро на площадке «Балапан», воронки «Телькем-1» и «Телькем-2» на площадке «Телькем» и скважина 1003 на площадке «Сары-Узень»;

– к III типу – воронки, образованные в результате проседания грунта из-за внештатных ситуаций при проведении подземных испытаний – скважина «Глубокая» на площадке «Балапан» и скважины 101, 125 и 104 на площадке «Сары-Узень».

Водные объекты площадки «Опытное поле» – это воронки, образованные в результате проведения наземных ядерных и неядерных испытаний, заполненные водой и в большинстве случаев заросшие по периметру тростником южным (*Phragmites australis*) (далее – тростник). Все водные объекты площадки «Опытное поле» имеют различный диаметр от 10 м до 150 м. Всего на данной площадке 12 водоемов.

«Атомное» озеро, расположенное на площадке «Балапан», образовано в результате взрыва 15.01.1965 г. мощностью 140 кт на месте слияния рек Шаган и Ашису, в результате которого образовалась воронка глубиной более 100 м и диаметром 400 м, которая заполнилась водой [2]. Также на площадке расположена воронка, образованная в результате проседания грунта в скважине «Глубокая», диаметром порядка 30 м.

На площадке «Телькем» находятся 2 воронки, образованные в результате экскавационных взрывов и заполненные водой [3]. «Телькем-1» образовано в результате проведения одиночного ядерного взрыва 21.10.1968 г., на текущий момент времени имеет воронку диаметром порядка 90 м. «Телькем-2» образовано в результате проведения группового ядерного взрыва из 3-х зарядов 12.11.1968 г., имеет вытянутую форму длиной порядка 120 м и шириной – 60 м.

**ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА**

На площадке «Сары-Узень» расположены 3 воронки, образованные в результате проседания грунта из-за внештатных ситуаций при проведении подземных ядерных испытаний в скважинах 101, 125 и 104 [4]. В настоящее время воронки имеют размеры: скважина 101 – диаметр порядка 400 м, скважина 125 – диаметр порядка 150 м, скважина 104 – длина 15 м, ширина 5 м. Также на территории площадки расположена воронка скважины 1003, образованная в результате экскавационного взрыва 14.10.1965 г. [3]. В настоящее время имеет диаметр порядка 30 м.

Всего исследовано 20 водных объектов техногенного происхождения территории СИП (рисунок 1), на которых проводился сопряженный отбор проб донных отложений, воды и высших водных растений. Отобранные растения принадлежат к 3 экологическим группам в зависимости от места их произрастания:

- водные – это растения укорененные, погруженные в толщу воды – рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus*), рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus*), валлиснерия обыкновенная (*Vallisneria vulgaris*);

- прибрежно-водные – это укорененные растения с надводными листьями, корни и нижняя часть стебля которых находятся в воде – тростник южный (*Phragmites australis*), рогоз узколистный (*Typha angustifolia*), камыш озерный (*Schoenoplectus lacustris*), клубнекамыш морской (*Bolboschoenus maritimus*);

- прибрежные – это растения, произрастающие в прибрежной зоне водоема в непосредственной близости к водной глади – гребенщик ветвистый (*Tamarix ramosissima*). Гребенщик ветвистый – это кустарник, поэтому содержание радионуклидов в образцах данного растения может характеризовать многолетнее накопление.

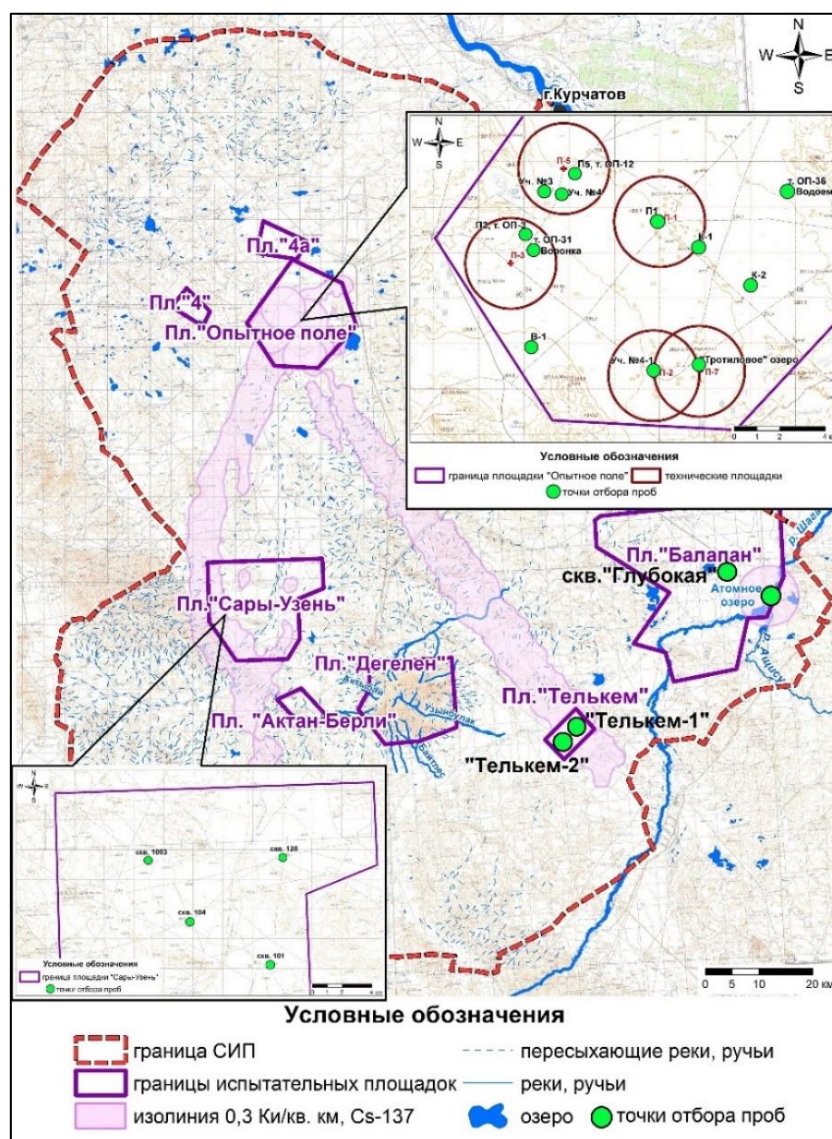


Рисунок 1. Водоемы техногенного происхождения территории СИП

**ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА**

Отбор проб донных отложений проводился с глубины водоема порядка 30–40 см, при этом расстояние от береговой линии вглубь водоема составляло 20–30 см. Пробы отбирались от поверхности дна на глубину 0–10 см, массой порядка 0,7 кг [5]. Отбор проб воды проведен с придонного слоя (5–10 см от дна), объемом 10 л [6]. У растений отбиралась наземная часть (без корней). Всего отобрано 75 образцов растений со всех водных объектов, из которых 9 относятся к водным, 59 – к прибрежно-водным и 7 – к прибрежным. В отобранных пробах проводилось определение содержания техногенных радионуклидов ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$.

Предварительная подготовка проб заключалась в следующем. 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 гексацианоферратом меди [7]. Пробы донных отложений высушивались, просеивались и гомогенизировались. Пробы растений промывались, измельчались, высушивались и озолялись.

Далее во всех полученных образцах с помощью γ -спектрометрических измерений определялось содержание ^{241}Am и ^{137}Cs [8]. 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 [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Уровни радионуклидного загрязнения донных отложений и воды

Содержание радионуклидов в донных отложениях водоемов техногенного происхождения представлены в таблице 1, а содержание в воде – в таблице 2.

Максимально загрязненными γ -излучающими радионуклидами ^{137}Cs и ^{241}Am являются: 5 участков на площадке «Опытное поле», где проводились наземные ядерные испытания; участки, где проводились экскавационные взрывы; скважина 101, которая была образована в результате проседания грунта из-за внештатной ситуации при проведении подземного испытания.

По содержанию ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях наиболее загрязненными являются те же объекты, на которых зафиксированы максимальные значения содержания ^{137}Cs и ^{241}Am . Но по содержанию $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях ($> n \cdot 10^3$ Бк/кг) к наиболее загрязненным объектам можно отнести еще 3 объекта: «Тротиловое» озеро и воронка на технической площадке ПЗ, расположенные на площадке «Опытное поле», и скважина 125 на площадке «Сары-Узень». При этом на данных объектах содержание остальных радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{241}Am) невысокое – на уровне $< n \cdot 10^3$ Бк/кг. Вероятно, это связано с характером испытания, проводимом на данных объектах.

Таблица 1. Содержание техногенных радионуклидов в донных отложениях

Место отбора		Удельная активность, Бк/кг			
		^{241}Am	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$
«Опытное поле»	П1	180±40	$(1,9 \pm 0,4) \cdot 10^3$	520±80	$(3,5 \pm 0,2) \cdot 10^3$
	Уч. № 3	$(1,5 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(1,3 \pm 0,3) \cdot 10^4$	980±150	$(8,6 \pm 0,4) \cdot 10^4$
	Уч. № 4	$(3,7 \pm 0,7) \cdot 10^4$	$(9,3 \pm 1,9) \cdot 10^4$	$(1,5 \pm 0,2) \cdot 10^4$	$(3,5 \pm 0,3) \cdot 10^5$
	П5, т.ОП-12	$(2,4 \pm 0,5) \cdot 10^3$	$(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^4$	400±60	$(4,9 \pm 0,3) \cdot 10^4$
	В-1	$(2,3 \pm 0,2) \cdot 10^3$	$(1,8 \pm 0,2) \cdot 10^4$	$(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^3$	$(5,3 \pm 0,2) \cdot 10^4$
	К-1	14±3	14±3	14±2	21±5
	К-2	15±1	20±2	55±8	120±15
	«Тротиловое» озеро	400±40	20±1	280±40	$(2,6 \pm 0,3) \cdot 10^3$
	Уч. № 4-1	85±9	81±16	17±3	130±30
	ПЗ, т.ОП-3	1,5±0,5	5±1	71±11	7,5±1,7
	Воронка	300±30	930±100	55±8	$(5,9 \pm 0,7) \cdot 10^3$
	Водоем	< 2	10±1	2,0±1,0	32±5
«Атомное» озеро		590±120	$(5,3 \pm 1,1) \cdot 10^3$	230±40	$(7,2 \pm 0,5) \cdot 10^3$
Телькем-1		$(7,1 \pm 0,7) \cdot 10^3$	$(2,4 \pm 0,2) \cdot 10^3$	710±110	$(2,7 \pm 0,5) \cdot 10^4$
Телькем-2		$(3,7 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(2,1 \pm 0,2) \cdot 10^3$	400±60	$(9,4 \pm 1,0) \cdot 10^3$
«Сары-Узень»	скв. 1003	320±60	$(1,5 \pm 0,3) \cdot 10^3$	74±11	$(7,0 \pm 0,5) \cdot 10^3$
	скв. 101	600±60	$(8,4 \pm 1,7) \cdot 10^3$	$(3,5 \pm 0,5) \cdot 10^3$	$(5,3 \pm 0,5) \cdot 10^3$
	скв. 125	220±20	450±50	100±15	$(2,1 \pm 0,2) \cdot 10^3$
	скв. 104	< 2	30±3	18±2	2,8±0,9
	скв. «Глубокая»	< 2	< 1	6±2	2,8±1,0

**ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА**

Таблица 2. Содержание техногенных радионуклидов в воде

Место отбора		Удельная активность, Бк/кг		
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
«Опытное поле»	П1	<0,01	3,0±0,2	(1,0±0,2)·10 ⁻²
	Уч. № 3	0,12±0,01	140±15	(7,2±0,9)·10 ⁻²
	Уч. № 4	5,4±0,5	400±40	(6,0±0,9)·10 ⁻²
	П5, т.ОП-12	<0,01	14±2	(9,0±1,0)·10 ⁻²
	В-1	<0,01	5,5±0,8	(1,4±0,6)·10 ⁻³
	К-1	<0,01	(1,0±0,3)·10 ⁻²	(8,2±1,0)·10 ⁻⁴
	К-2	<0,01	7±1,1	(7,5±1,0)·10 ⁻⁴
	«Тротиловое» озеро	<0,01	(3,6±0,3)·10 ⁻²	(1,1±0,3)·10 ⁻³
	Уч. № 4-1	<0,01	0,21±0,01	(2,8±0,9)·10 ⁻³
	ПЗ, т.ОП-3	<0,01	0,1±0,01	(8,2±1,0)·10 ⁻⁴
	Воронка	<0,01	0,09±0,01	(1,2±0,3)·10 ⁻³
	Водоем	<0,01	1,0±0,2	(6,1±1,2)·10 ⁻⁴
«Атомное» озеро		<0,01	0,18±0,03	(4,5±0,7)·10 ⁻³
Телькем-1		<0,01	41±6	0,21±0,02
Телькем-2		<0,01	170±16	0,17±0,01
«Сары-Узень»	скв. 1003	<0,01	8,8±0,9	(7,4±1,1)·10 ⁻⁴
	скв. 101	0,06±0,01	230±25	(3,2±1,7)·10 ⁻³
	скв. 125	0,04±0,01	12±1,8	(6,2±1,2)·10 ⁻⁴
	скв. 104	<0,01	11±1,6	(7,1±1,5)·10 ⁻⁴
	скв. «Глубокая»	<0,01	0,1±0,01	(2,4±1,2)·10 ⁻³

Таблица 3. К_p для водных объектов техногенного происхождения

Тип водоема	К _p		
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
I тип	$\frac{6,1 \cdot 10^4 (n=2)}{1,3 \cdot 10^4 - 1,1 \cdot 10^5}$	$\frac{9,2 \cdot 10^2 (n=12)}{7 - 7,8 \cdot 10^3}$	$\frac{4,4 \cdot 10^6 (n=12)}{9,1 \cdot 10^3 - 3,8 \cdot 10^7}$
II тип	—	$\frac{3,3 \cdot 10^2 (n=4)}{2,4 - 1,3 \cdot 10^3}$	$\frac{2,8 \cdot 10^6 (n=4)}{5,5 \cdot 10^4 - 9,5 \cdot 10^6}$
III тип	$\frac{7,6 \cdot 10^4 (n=2)}{1,1 \cdot 10^4 - 1,4 \cdot 10^5}$	$\frac{2,1 \cdot 10^1 (n=4)}{1,5 - 6,0 \cdot 10^1}$	$\frac{2,1 \cdot 10^6 (n=4)}{1,2 \cdot 10^3 - 6,6 \cdot 10^6}$

в числителе – среднее значение, в знаменателе – область значений, в скобках – количество

Содержание ²⁴¹Am в воде водоемов техногенного происхождения находится ниже предела обнаружения (<ПО) используемого аппаратурно-методического обеспечения (<1 Бк/кг). Содержание ¹³⁷Cs в воде большинства водоемов техногенного происхождения находится <ПО (<0,01 Бк/кг). Численные значения содержания ¹³⁷Cs зафиксированы в воде только 4-х водоемов: 2 воронки на площадке «Опытное поле», и 2 воронки на площадке «Сары-Узень».

Численные значения содержания ⁹⁰Sr и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в воде зафиксированы на всех исследованных объектах и изменяются в пределах: для ⁹⁰Sr от (1,0±0,3)·10⁻² Бк/кг до 400±40 Бк/кг, для ²³⁹⁺²⁴⁰Pu от (6,1±1,2)·10⁻⁴ Бк/кг до 0,21±0,02 Бк/кг. Максимально загрязненными водами по содержанию ⁹⁰Sr (на уровне n·10² Бк/кг) являются 2 воронки на площадке «Опытное поле», «Телькем-2» и скважина 101 на площадке «Сары-Узень». Максимально загрязненными водами по содержанию ²³⁹⁺²⁴⁰Pu (на уровне n·10⁻¹ Бк/кг) являются

воронки «Телькем-1» и «Телькем-2» на площадке «Телькем».

Аккумуляционная способность донных отложений по отношению к радионуклидам количественно характеризуется коэффициентом распределения (К_p), который рассчитывается как отношение содержания радионуклидов в донных отложениях к содержанию радионуклидов в воде [10]. Средние значения К_p для 3-х типов водных объектов техногенного происхождения, а также количество и область значений представлены в таблице 3.

Для ²⁴¹Am коэффициент распределения К_p не рассчитан, так как численное значение содержания ²⁴¹Am в воде не зафиксировано. Для ¹³⁷Cs – коэффициент распределения К_p составляет от n·10⁴ до n·10⁵, для ⁹⁰Sr – от n·10⁰ до n·10³, для ²³⁹⁺²⁴⁰Pu – от n·10³ до n·10⁷. Из этого следует, что в системе «донные отложения – вода» водных объектов техногенного происхождения исследуемые радионуклиды сосредоточены

ны в донных отложениях. Исключение составляет лишь ^{90}Sr , для которого в некоторых случаях получен K_p равный $n \cdot 10^0$. Это свидетельствует о том, что ^{90}Sr в таком водном объекте может содержаться в сопоставимых количествах как в воде, так и в донных отложениях.

Коэффициент распределения K_p уменьшается в ряду $^{239+240}\text{Pu} > ^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr}$ ($n \cdot 10^6 > n \cdot 10^4 > n \cdot 10^2$), для всех 3-х типов водоемов техногенного происхождения, соответственно способность радионуклидов вымываться (выщелачиваться) из донных отложений в воду в данном ряду увеличивается.

Уровни радионуклидного загрязнения растений

Водные растения произрастают только в четырех водных объектах: в «Тропиловом» и «Атомном» озерах, в воронке «Телькем-1» и в воронке, расположенной на технической площадке ПЗ площадки «Опытное поле». Из прибрежно-водных растений на большинстве водных объектах произрастает тростник южный (*Phragmites australis*), и иногда встречаются рогоз узколистный (*Typha angustifolia*), камыш озерный (*Schoenoplectus lacustris*) и клубнекамыш морской (*Bolboschoenus maritimus*). По берегам некоторых водных объектов произрастает кустарник гребенщик ветвистый (*Tamarix ramosissima*). Численные значения содержания радионуклидов зафиксированы в примерно 70 % отобранных образцов растений, в остальных случаях их содержание находится <ПО. Содержание техногенных радионуклидов в водных растениях представлены в таблице 4, в прибрежно-водных растениях – в таблице 5, в прибрежных растениях (гребенщике ветвистом) – в таблице 6.

Максимальные значения содержания исследуемых радионуклидов (в среднем на уровне $n \cdot 10^3$ Бк/кг) зафиксированы в водных растениях, произрастающих в воронке «Телькем-1»: содержание ^{241}Am составляет от 250 ± 30 Бк/кг до $(1,3 \pm 0,3) \cdot 10^3$ Бк/кг, ^{137}Cs – от 40 ± 4 Бк/кг до $(1,6 \pm 0,3) \cdot 10^3$ Бк/кг, ^{90}Sr – от $(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^3$ Бк/кг до $(5,4 \pm 0,8) \cdot 10^3$ Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ – от $(4,3 \pm 0,1) \cdot 10^3$ Бк/кг до $(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^4$ Бк/кг. На других

водных объектах содержание радионуклидов составило: содержание ^{241}Am <ПО (< 0,5 Бк/кг), ^{137}Cs – от <ПО (< 1 Бк/кг) до 13 ± 1 Бк/кг, ^{90}Sr – от <ПО (< 1,7 Бк/кг) до 140 ± 20 Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ – от $4,3 \pm 0,6$ Бк/кг до $10 \pm 1,4$ Бк/кг.

Содержание ^{241}Am в прибрежно-водных растениях находится <ПО (<0,5 Бк/кг). Максимальные значения содержания ^{137}Cs на уровне $n \cdot 10^2$ Бк/кг зафиксированы на участке №4 технической площадки П5 на «Опытном поле». На остальных водных объектах содержание ^{137}Cs составляет от <ПО (<1 Бк/кг) до 20 ± 2 Бк/кг. Максимальные значения содержания ^{90}Sr на уровне $n \cdot 10^3$ Бк/кг зафиксированы на участках №3 и №4 технической площадки П5 на «Опытном поле» и на скважине 101 площадки «Сары-Узень». На остальных водных объектах содержание ^{90}Sr составляет от $1,6 \pm 0,5$ Бк/кг до 700 ± 100 Бк/кг. Максимальные значения содержания $^{239+240}\text{Pu}$ на уровне $n \cdot 10^2$ Бк/кг зафиксированы на воронке «Телькем-1». На остальных водных объектах содержание $^{239+240}\text{Pu}$ составляет от <ПО (<0,04 Бк/кг) до 10 ± 2 Бк/кг.

Численные значения содержания ^{241}Am на уровне до 10 ± 1 Бк/кг зафиксированы только в образцах гребенщика ветвистого, произрастающего на воронке «Телькем-2». Численные значения содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ зафиксированы во всех исследуемых образцах. Максимальные значения содержания ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ (45 ± 5 Бк/кг и 11 ± 2 Бк/кг соответственно) зафиксированы в воронке «Телькем-2», а ^{90}Sr (960 ± 140 Бк/кг) – на одном из участков «Атомного» озера.

Для количественной оценки поступления радионуклидов из донных отложений в растения использовался один из наиболее широко применяемых показателей – коэффициент накопления (K_n), рассчитанный как отношение содержания радионуклидов в единице массы растений к содержанию радионуклидов в донных отложениях. Средние значения K_n для всех видов растений, а также количество и область значений представлены в таблице 7.

Таблица 4. Содержание техногенных радионуклидов в водных растениях

Вид растения	Точка отбора	Удельная активность, Бк/кг			
		^{241}Am	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$
рдест гребенчатый	«Тропиловое» озеро	< 0,5	< 1	< 1,7	30 ± 3
рдест гребенчатый		< 0,5	< 1	$4,5 \pm 0,9$	$9,4 \pm 1,2$
рдест гребенчатый		< 0,5	< 1	35 ± 7	$7,6 \pm 1,4$
рдест гребенчатый	ПЗ, т.ОП-3	< 0,5	< 1	140 ± 20	$10 \pm 1,4$
рдест пронзеннолистный	«Атомное» озеро	< 0,5	$9,3 \pm 1$	28 ± 4	$5,8 \pm 0,8$
рдест пронзеннолистный		< 0,5	13 ± 1	23 ± 3	$4,3 \pm 0,6$
валлиснерия обыкновенная	Телькем-1	$(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^3$	$(1,6 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(5,4 \pm 0,8) \cdot 10^3$	$(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^4$
рдест гребенчатый		$(1,3 \pm 0,3) \cdot 10^3$	690 ± 140	$(5,3 \pm 0,8) \cdot 10^3$	$(1,5 \pm 0,1) \cdot 10^4$
рдест гребенчатый		250 ± 30	40 ± 4	$(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^3$	$(4,3 \pm 0,1) \cdot 10^3$

**ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА**

Таблица 5. Содержание техногенных радионуклидов в прибрежно-водных растениях

Вид растения	Место отбора	Точка отбора	Удельная активность, Бк/кг		
			¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
рогоз	В-1	т. ОП-1	< 1	700±100	0,9±0,3
рогоз	В-1	т. ОП-2	< 1	320±50	0,22±0,13
рогоз	П3	т. ОП-3	< 1	23±6	0,9±0,3
рогоз	П3	т. ОП-5	< 1	2,5±0,5	0,39±0,19
тростник	П5, уч. №3	т. ОП-9 (2016 г.)	5±1	2,6±0,5	0,38±0,13
тростник	П5, уч. №3	т. ОП-9 (2017 г.)	20±2	(1,8±0,3)·10 ³	2,6±0,6
тростник	П5, уч. №3	т. ОП-10	4±1	(4,5±0,7)·10 ³	0,14±0,08
тростник	П5, уч. №3	т. ОП-11	12±1	(4,2±0,6)·10 ³	0,17±0,09
тростник	П5, уч. №4	т. ОП-6 (2016 г.)	250±25	(1,2±0,2)·10 ³	1,0±0,4
тростник	П5, уч. №4	т. ОП-6 (2017 г.)	40±4	(1,2±0,2)·10 ³	1,3±0,6
тростник	П5, уч. №4	т. ОП-7	120±10	(3,3±0,5)·10 ³	1,4±0,4
тростник	П5, уч. №4	т. ОП-8	440±45	(1,6±0,2)·10 ³	1,4±0,3
тростник	П5	т. ОП-12 (2016 г.)	9±1	250±40	0,33±0,12
тростник	П5	т. ОП-12 (2017 г.)	10±1	560±80	10±2
тростник	П5	т. ОП-13	9±1	180±30	0,30±0,11
тростник	П5	т. ОП-14	9±1	590±90	0,50±0,19
тростник	П1, центр	т. ОП-15	< 1	36±5	< 0,03
клубнекамыш	П1, центр	т. ОП-17	< 1	180±30	0,22±0,09
тростник	К-1	т. ОП-18	< 1	2,3±0,5	< 0,02
тростник	К-2	т. ОП-22	< 1	1,6±0,5	0,09±0,04
тростник	«Атомное» озеро	т. Б-1	1,9±1	24±4	0,67±0,20
тростник	«Атомное» озеро	т. Б-3	2,5±1	320±50	< 0,04
тростник	Телькем-1	т. Т-1	< 1	260±40	150±10
камыш	Телькем-1	т. Т-2	< 1	390±60	8,2±0,7
камыш	Телькем-1	т. Т-3	< 1	68±10	27±4
тростник	скв. 1003	т. СУ-15	20±1	330±50	1,0±0,4
рогоз	скв. 1003	т. СУ-15	3±1	270±40	1,9±0,4
тростник	скв. 101	т. СУ-5 (2016 г.)	4±1	(3,4±0,5)·10 ³	0,99±0,26
тростник	скв. 101	т. СУ-5 (2017 г.)	3±1	(1,6±0,2)·10 ³	4,8±0,8
тростник	скв. 101	т. СУ-6	3±1	(3,8±0,6)·10 ³	< 0,04
тростник	скв. 101	т. СУ-7	7±1	(3,0±0,4)·10 ³	0,09±0,04
тростник	скв. 101	т. СУ-9	3±1	(1,8±0,3)·10 ³	0,17±0,08
тростник	скв. 125	т. СУ-10 (2016 г.)	< 1	210±30	0,23±0,09
тростник	скв. 125	т. СУ-10 (2017 г.)	< 1	140±20	1,0±0,3
тростник	скв. 104	т. СУ-1	< 1	160±24	0,11±0,06

Таблица 6. Содержание техногенных радионуклидов в прибрежных растениях

Место отбора	Точка отбора	Удельная активность, Бк/кг			
		²⁴¹ Am	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
«Атомное» озеро	т. Б-1	< 1	5,2±1	390±60	0,49±0,26
	т. Б-2	< 1	25±3	960±140	0,40±0,28
	т. Б-3	< 1	4,2±1	102±15	0,45±0,18
«Телькем-1»	т. Т-1	< 1	10±1	—	—
	т. Т-2	< 1	10±1	690±100	5,1±1,2
«Телькем-2»	т. Т-5	7±1	3±1	430±60	11±2
	т. Т-5	10±1	45±5	—	—

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Таблица 7. K_H для всех видов растений

Группа растений (общее количество образцов)		K_H			
		^{241}Am	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$
Водные (9)		0,12 (n=3) 0,035–0,18	0,20 (n=5) 0,0039–0,67	2,9 (n=8) 0,016–7,6	0,30 (n=9) 0,0006–1,3
Прибрежно-водные (59)	Тростник (46)	—	0,0027 (n=24) 0,00031–0,013	1,6 (n=27) 0,0027–4,6	0,0022 (n=23) 0,0000016 – 0,039
	Рогоз (9)	—	0,0011 (n=2) 0,00021–0,002	0,35 (n=5) 0,035–0,63	0,034 (n=5) 0,0000042 – 0,12
	Камыш (2)	—	0,00042 (n=1)	3,2 (n=2) 0,18–6,2	0,0003 (n=2) 0,00027 – 0,00032
	Клубникамыш (2)	—	—	0,41 (n=1)	0,000063 (n=1)
Прибрежные (7)		0,0052 (n=2) 0,0042–0,0061	0,018 (n=7) 0,0016–0,067	2,4 (n=5) 0,93–4,2	0,00042 (n=5) 0,000063–0,0012

в числителе – среднее значение, в знаменателе – область значений, в скобках – количество

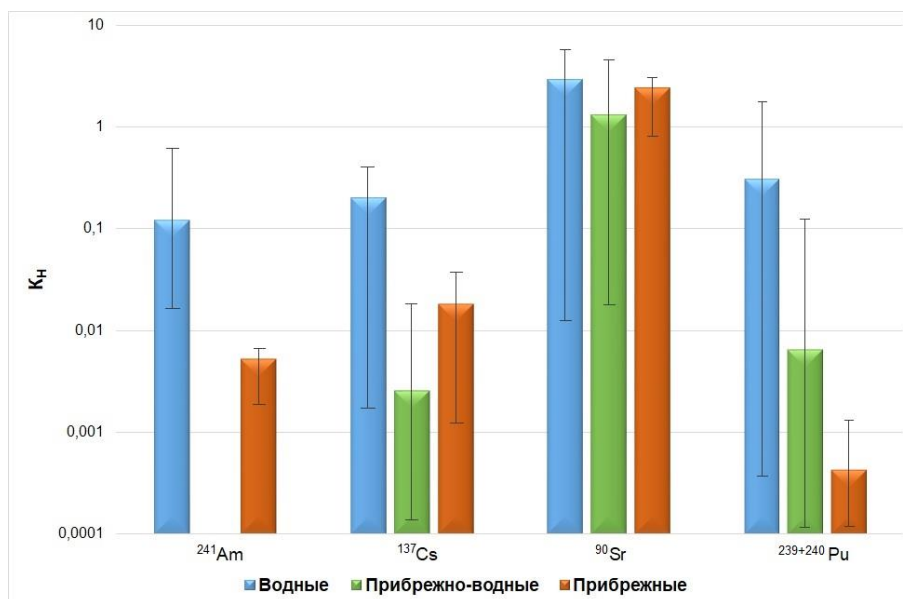


Рисунок 2. Распределение K_H для разных групп растений

На основании полученных K_H , установлено, что наибольшее накопление растениями характерно для радионуклида ^{90}Sr (0,0027–7,6), сравнительно меньшее для ^{137}Cs (0,00021–0,67), ^{241}Am (0,0042–0,18) и $^{239+240}\text{Pu}$ (0,0000042–1,3). Несмотря на достаточно широкий диапазон значений, ряд убывания радионуклидов по их способности к накоплению растениями в целом имеет следующий вид: $^{90}\text{Sr} > ^{137}\text{Cs} > ^{241}\text{Am} > ^{239+240}\text{Pu}$.

Для сравнительного анализа полученные значения K_H для 3-х групп растений в виде гистограммы представлены на рисунке 2.

Сравнительный анализ для 3-х групп растений показал, что K_H для ^{137}Cs , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ для водных растений на 2-3 порядка выше, чем для прибрежно-водных и прибрежных растений. K_H для ^{90}Sr – находятся на одном уровне для всех 3-х групп растений. Вероятно, водные растения способны более интенсивно накапливать техногенные радионуклиды (за исключением ^{90}Sr), чем прибрежно-водные и прибрежные растения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований определены уровни радионуклидного загрязнения донных отложений, воды и растений водных объектов техногенного происхождения территории СИП. Несмотря на то, что со дня проведения последнего ядерного испытания на территории СИП прошло 30 лет, уровни радионуклидного загрязнения экосистемы водных объектов техногенного происхождения остаются высокими. Особенно это касается водных объектов, образованных в результате наземных ядерных испытаний и экскавационных взрывов, а с момента их проведения прошло более 50 лет. На некоторых из них донные отложения по содержанию ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ можно отнести к радиоактивным отходам.

Коэффициенты распределения K_R для системы «донные отложения – вода» водных объектов техногенного происхождения составляют для $^{239+240}\text{Pu}$ – $n \cdot 10^6$, для ^{137}Cs – $n \cdot 10^4$, для ^{90}Sr – $n \cdot 10^2$. 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_H для водных растений выше на 1–3 порядка чем для прибрежно-водных и прибрежных растений. Это может свидетельствовать о том, что водные растения интенсивнее накапливают техногенные радионуклиды, чем прибрежно-водные и прибрежные растения. Исключение составляет радионуклид ^{90}Sr , для которого K_H находятся примерно на одном уровне для всех видов растений.

Таким образом, радионуклиды в водных объектах техногенного происхождения могут равномерно распределяться в системе «донные отложения – водные растения», но для систем «донные отложения – вода», «донные отложения – прибрежно-водные растения» и «донные отложения – прибрежные растения» их основное содержание сосредоточено в донных отложениях. Тогда как ^{90}Sr может равномерно распределяться во всех компонентах системы «донные отложения – вода – растения», не зависимо от вида растений, что еще раз подчеркивает его высокую миграционную способность и биодоступность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коробкин, В.И. Экология: учеб. для вузов / В.И. Коробкин, Л.В. Передельский. – Ростов на Дону: Феникс. - 2007. – С. 198–207.
2. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Оптимизация исследований территории Семипалатинского испытательного полигона с целью их передачи в хозяйственный оборот / под рук. Лукашенко С.Н. - Павлодар: Дом печати, 2015. - Вып. 5. – С. 87–90.
3. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / под рук. проф. В.А. Логачева. – М.: Изд. АТ, 2001. – С 265–271.
4. Субботин С.Б. Современное радиоэкологическое состояние окружающей среды на испытательной площадке СИП «Сары-Узень» / Субботин С.Б., Стрильчук Ю.Г., Новикова Е.А. и др. // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012 гг.] / под ред. С.Н. Лукашенко. – Павлодар: Дом печати, 2013. – Т.1. – Вып. 4. – С. 117–187.
5. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность: ГОСТ 17.1.5.01.-80. – Введ. 1982-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.
6. Вода. Общие требования к отбору проб: СТ РК ГОСТ 51592-2003. – Введ. 2005-01-01. – Астана: Госстандарт, 2005. – 72 с.
7. Определение содержания искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90 и цезия-137 в водах методом концентрирования: МВИ КЗ.07.00.01684-2013. – Алматы: Изд-во ИЯФ, 2012. – 13 с.
8. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре: МИ 2143-91 № 5.06.001.98. – Введ. 1998-06-02. – 1991. – 17 с.
9. Методика определения изотопов плутония-(239+240), стронция-90 и америция-241 в объектах окружающей среды (почвы, растения, природные воды): МИ 06-7-98. – Введ. 1998-03-04. – Алматы: Алматинское ГП «ЦСМС», 1998. – 22 с.
10. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments: Technical Reports Series No. 472, IAEA. – Vienna: IAEA, 2010. – P. 4–6.

СЕМЕЙ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫНДАҒЫ ШЫҒУ ТЕГІ ТЕХНОГЕНДІ СУ НЫСАНДАРЫНДА РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ҚАЙТА ТАРАЛУЫ

А.К. Айдарханова, Н.В. Ларионова, А.Л. Дашук

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

Бұл жұмыста, Семей сынақ полигонындағы (ССП) шығу тегі техногенді су нысандарында «түптік шөгінділер – су – өсімдік» жүйесінде радионуклидтік ластанудың таралу сипаты мен деңгейін кешенді зерттеу деректері келтірілді. Зерттеу нысандары ретінде «Тәжірибе даласы», «Балапан», «Телкем» және «Сары өзен» сынақ алаңдарында орналасқан ядролық сынақтар өткізу нәтижесінде пайда болып, суға толған қазаншұңқырлар алынды. Аталған зерттеулер шеңберінде түптік шөгінділердің, сулардың, жағалау-судағы, жағалаудағы, судағы өсімдіктердің сынамалары қатар алынып ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr және $^{239+240}\text{Pu}$ техногенді радионуклидтердің құрамын анықтау жұмыстары жүргізілді. Өткізілген зерттеулердің нәтижесінде, түптік шөгінділерде және суда коэффициенттердің таралуы (K_m), сонымен қатар өсімдіктерге арналған жинақталу коэффициенттері (K_k) есептелді. Алынған нәтижелердің негізінде, ССП-ғы шығу тегі техногенді су нысандарында радионуклидтік ластанудың қайта таралуына талдама жасалды.

**REDISTRIBUTION OF RADIONUCLIDES IN WATER BODIES OF TECHNOGENIC ORIGIN
AT THE SEMIPALATINSK TEST SITE**

A.K. Aidarkhanova, N.V. Larionova, A.L. Dashuk

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

The work provides results of complex research of the levels and character of the distribution of radionuclide contamination in the system of "bottom sediments - water - plants" of technogenic water bodies at the Semipalatinsk Test Site (STS). The objects of research were craters formed as a result of nuclear tests, filled with water, located at the test sites "Experimental Field", "Balapan", "Telkem" and "Sary-Uzen". Samples of sediments, soils, waters, aquatic, semiaquatic and waterside plants were taken for determination of ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ concentration for this research. As the result of experiments distribution coefficient (K_d) for sediments and water and concentration ratio (F_V) for aquatic and semiaquatic plants and sediments, waterside plants and soils were calculated. Based on the obtained results comparative analysis of the redistribution of radionuclide contamination in technogenic water bodies at the STS was done.