

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-168-175>
УДК 539.16:631.42: 581.5 (574)

СОДЕРЖАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ АРИДНОЙ ЗОНЫ КАЗАХСТАНА

Н.В. Ларионова^{1*}, А.В. Топорова¹, А.Е. Кундузбаева¹, А.М. Кабдыракова²

¹Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: larionova@nnc.kz

Проведена оценка удельной активности естественных и искусственных радионуклидов в почвенно-растительном покрове аридной зоны Казахстана вдоль 65 и 75 меридианов. Средние значения в почвах составили 580,7 Бк/кг для ^{40}K , 34,8 Бк/кг для ^{232}Th , 23,0 Бк/кг для ^{226}Ra и 16,9 Бк/кг для ^{137}Cs . В растениях средние значения, рассчитанные по количественно установленным значениям, составили 489,2 Бк/кг для ^{40}K , 2,5 Бк/кг для ^{232}Th , 14,3 Бк/кг для ^{226}Ra и 1,2 Бк/кг для ^{137}Cs . Удельная активность ^{241}Am количественно не определена. Наиболее высокая вариабельность значений Кн характерна для ^{137}Cs , тогда как относительно более интенсивное накопление растениями отмечается для ^{40}K и ^{226}Ra . Расчетная мощность дозы облучения растений составила 1,6...8,9 мкГр/сут вдоль 65 меридиана и 3,7...15,0 мкГр/сут вдоль 75 меридиана и находилась значительно ниже уровней, при которых ожидается проявление радиационных эффектов у референтных видов. Полученные результаты могут быть использованы в качестве исходных характеристик для радиационного мониторинга, оценки динамики радионуклидов и дозовых нагрузок на биоту, а также для последующего контроля радиологического состояния исследованной территории.

Ключевые слова: удельная активность, естественные радионуклиды (^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra), искусственные радионуклиды (^{137}Cs , ^{241}Am), почвенно-растительный покров, дозовая нагрузка на биоту

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в Республике Казахстан (РК) наблюдается активное развитие предприятий ядерно-топливного цикла, включающее расширение уранодобывающей отрасли, создание банка ядерного топлива и реализацию проектов по строительству атомных электростанций. Эксплуатация подобных объектов потенциально связана с поступлением техногенных радионуклидов в окружающую среду и может оказывать влияние на радиоэкологическое состояние территорий. В связи с этим особую актуальность приобретает получение достоверной информации о современных фоновых уровнях содержания естественных и искусственных радионуклидов в компонентах окружающей среды.

Основными источниками глобального поступления искусственных радионуклидов в биосферу являются атмосферные испытания ядерного оружия, проводившиеся в различных регионах мира в XX веке, а также крупные аварии на объектах атомной энергетики. Известно, что распределение техногенных радионуклидов на поверхности Земли имеет выраженную широтную зависимость, при этом максимальные уровни глобальных выпадений отмечаются в диапазоне 40–50° северной широты. Значительная часть территории Казахстана располагается в пределах данной зоны, что обуславливает необходимость проведения комплексных исследований радиоэкологической обстановки.

Ранее оценка радиоактивного загрязнения территории Республики была представлена в Атласе радиоэкологической обстановки Казахстана за период 1954–1994 гг. [1], а также в исследованиях, выполненных в 2018–2020 гг. в рамках бюджетной программы, направленной на развитие атомных и энергетических проектов [2]. Полученные результаты позволили охарактеризовать фоновое содержание наиболее распространенных естественных и искусственных радионуклидов в поверхностном слое почвы и атмосферном воздухе. Однако для более полного понимания современного радиоэкологического состояния территории необходимы данные о распределении радионуклидов в системе «почва–растение», отражающие процессы их миграции и биологического накопления. Целью настоящего исследования является оценка фонового уровня содержания естественных и искусственных радионуклидов в почвенно-растительном покрове аридной зоны РК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования – зональные почвы и растения степной части аридной зоны РК, которая занимает площадь более 800 тыс. кв. км, что составляет более четверти всей территории, и которая простирается более чем на 2200 км с запада на восток от 46° до 85° восточной долготы. Для более полного охвата степной зоны для исследования были выбраны 65 и 75 меридианы, расположенные ближе к западу и востоку (Рисунок 1). Вдоль каждого меридиана были за-

ложены по 15 исследовательских площадок – точек отбора проб почвы и растений. Протяженность исследованных участков меридианов составила в среднем 500 км, расстояние между точками – от 35 до 40 км. В соответствии со стандартными методиками [3], в каждой точке выполнялись измерения радиационных параметров – плотности потока β -частиц и мощности эквивалентной дозы (МЭД). Пробы растений представляли собой смешанные образцы надземной части степного разнотравья, отобранные с площади 1 м². Пробы почвы были отобраны методом «конверта» на глубину 0-5 см и состояли из 5 образцов, отобранных по 4 углам и в центре площадки отбора растений.

Для последующего лабораторного анализа отобранные пробы растений и почвы подвергали предварительной подготовке. Пробы растений предварительно измельчали секатором до фрагментов длиной 1...3 см, промывали дистиллированной водой 2-3 раза и высушивали в сушильном шкафу при температуре 80-100 °С. После высушивания образцы дополнительно измельчали в лабораторной мельнице. Далее проводили термическое концентрирование: сухой растительный материал обугливали в муфельной печи или на электроплитах, не допуская воспламенения, до получения остатка чёрного цвета. После охлаждения образцы растирали и подвергали озолению при температуре до 200 °С. Полученную золу охлаждали в эксикаторе, просеивали, взвешивали и определяли коэффициент озоления.

Пробы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре 60-70 °С. После удаления крупных камней и растительных остатков образцы

взвешивали, тщательно перемешивали, порционно растирали в фарфоровой ступке и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Растирание и просеивание проводили до полного удаления частиц почвенного скелета. Полноту просеивания контролировали встряхиванием сита над листом бумаги.

Удельную активность естественных и искусственных радионуклидов в образцах почвы и растений определяли с использованием поверенного оборудования в соответствии со стандартизированными методическими рекомендациями [4]. Для определения содержания радионуклидов ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs и ^{241}Am в образцах почвы и растений использовали гамма-спектрометр Canberra GX-2020 с твердотельным детектором относительной эффективностью регистрации гамма-излучения 20%, оснащенный сверхчистым германиевым кристаллом, многоканальным анализатором импульсов Canberra InSpector 1200 (США) и персональным компьютером с установленным программным пакетом Genie-2000 версии 3.1 производства Canberra. В образцах растений концентрацию радионуклидов определяли в зольном остатке с последующим пересчетом на сухую массу. Погрешность измерений не превышала 10-20%. Гамма-спектрометр был откалиброван по энергии и эффективности. Для калибровки использовались образцовые (эталонные) источники гамма-излучения с известной активностью радионуклидов.

Оценка радиационного воздействия на наземную биоту (растительность) проводится на основе расчета мощности дозы облучения. Мощность дозы облучения растения (Dj) складывается из мощности дозы

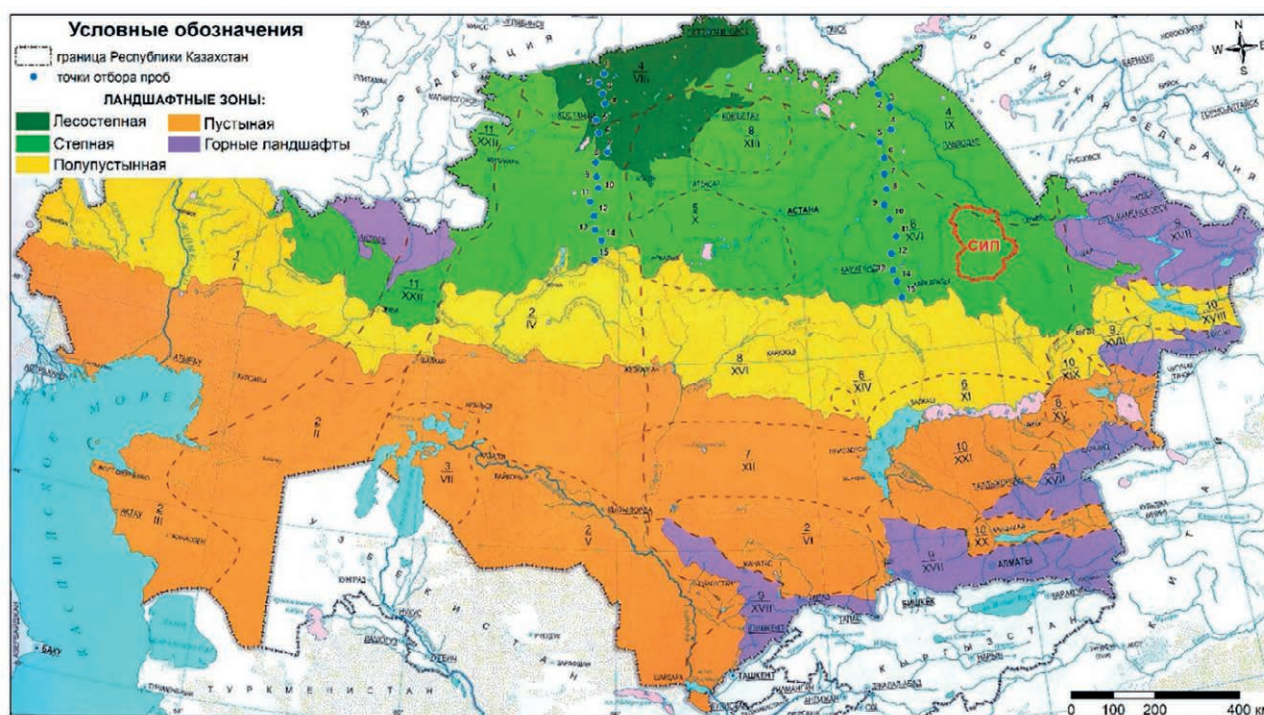


Рисунок 1. Расположение точек отбора проб на исследуемой территории

внутреннего и внешнего облучения $D_{i,j}$ от всех рассматриваемых радионуклидов i :

$$D_j = \sum_i D_{i,j}^{внутр} + D_{i,j}^{внеш}$$

Первая составляющая обусловлена радионуклидами, непосредственно содержащимися в растениях, вторая составляющая формируется за счет радионуклидов, находящихся в почве [5].

Мощность дозы внутреннего/внешнего облучения растения рассчитывается согласно выражению:

$$D = A \times d$$

здесь: A – удельная активность радионуклида в растениях или почве в случае расчета мощности дозы внутреннего и внешнего облучения соответственно, Бк/кг;

d – дозовый коэффициент внутреннего или внешнего облучения растения, (мкГр/сутки)/(Бк/кг) [6].

Значения дозовых коэффициентов табулируются в публикации Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) и представлены в таблице 1. Дозовые коэффициенты выбраны для объекта «дикая трава».

Таблица 1. Значения дозовых коэффициентов внутреннего и внешнего облучения растений

Радионуклид	Дозовый коэффициент, (мкГр/сут)/(Бк/кг)	
	внутреннего облучения	внешнего облучения
^{40}K	$6,2 \times 10^{-3}$	$7,0 \times 10^{-4}$
^{232}Th	$5,5 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-6}$
^{226}Ra	$3,4 \times 10^{-1}$	$8,0 \times 10^{-3}$
^{137}Cs	$3,4 \times 10^{-3}$	$2,7 \times 10^{-3}$
^{241}Am	$7,7 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^{-5}$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения радиометрических параметров показали, что полученные значения МЭД на исследуемой территории варьируют от нижнего предела обнаружения ($<0,10$ мкЗв/ч) до $0,16$ мкЗв/ч. Значения плотности потока бета-частиц во всех точках обследования находятся ниже предела измерения используемой аппаратуры (<10 част/(см²×мин)). По результатам проведенного спектрометрического анализа установлены значения удельной активности естественных (^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra) и искусственных (^{241}Am , ^{137}Cs) радионуклидов в почвах и растениях вдоль 65 и 75 меридианов (Таблица 2). Содержание радионуклида ^{241}Am и в почвах, и в растениях оказалось ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения.

Наиболее высокие значения отмечены для ^{40}K : от 350 до 690 Бк/кг вдоль 65 меридиана при среднем 541 ± 98 Бк/кг и от 410 до 980 Бк/кг вдоль 75 меридиана при среднем 621 ± 195 Бк/кг; коэффициент вариации (CV) составил 18,1% и 31,4% соответственно, что указывает на умеренную вариабельность. Для ^{232}Th значения изменялись от 17 до 52 Бк/кг при среднем

37 ± 9 Бк/кг вдоль 65 меридиана и от 22 до 47 Бк/кг при среднем $32,5 \pm 7,7$ Бк/кг вдоль 75 меридиана при коэффициенте вариации 24,3% и 23,6% соответственно. Удельная активность ^{226}Ra составила 13...34 Бк/кг при среднем 23 ± 6 Бк/кг вдоль 65 меридиана и 14...32 Бк/кг при среднем 23 ± 5 Бк/кг вдоль 75 меридиана; CV составил 26,1% и 22,4% соответственно. Наиболее выраженная вариабельность отмечена для ^{137}Cs : вдоль 65 меридиана значения составляли 3,7...55 Бк/кг при среднем $16,2 \pm 3,5$ Бк/кг и CV 83,7%, а вдоль 75 меридиана – 6,3...33 Бк/кг при среднем $17,7 \pm 9,6$ Бк/кг и CV 54,2%. Таким образом, среди исследованных радионуклидов наибольшей вариабельностью характеризуется ^{137}Cs , тогда как ^{40}K , ^{232}Th и ^{226}Ra отличаются преимущественно умеренной вариабельностью; статистически значимых различий между значениями удельной активности радионуклидов вдоль 65 и 75 меридианов не установлено.

В связи с отсутствием статистически значимых различий между значениями удельной активности исследуемых радионуклидов вдоль 65 и 75 меридианов в качестве средних значений для рассматриваемой территории могут быть приняты значения: 580,7 Бк/кг для ^{40}K , 34,8 Бк/кг для ^{232}Th , 23 Бк/кг для ^{226}Ra и 16,9 Бк/кг для ^{137}Cs . При этом полученные значения удельной активности естественных радионуклидов не превышают максимальные значения для почв Казахстана (^{40}K – 1200 Бк/кг, ^{232}Th – 220 Бк/кг, ^{226}Ra – 120 Бк/кг) [7], а среднее значение удельной активности ^{137}Cs сопоставимо со средней концентрацией данного радионуклида, установленной ранее для северной условно «фоновой» территории СИП [8].

Количественные значения удельной активности в растениях стабильно установлены лишь для радионуклида ^{40}K . Удельная активность ^{40}K в растениях вдоль 65 меридиана варьируется в широком диапазоне – от 130 до 500 Бк/кг, составляя в среднем 268 ± 132 Бк/кг при медиане 220 Бк/кг; CV составляет 49,3%. Вдоль 75 меридиана значения ^{40}K изменяются от 200 до 1500 Бк/кг, при среднем значении 710 ± 384 Бк/кг и медиане 620 Бк/кг; CV составляет 54,1%. В отличие от ^{40}K , удельная активность ^{232}Th в большинстве образцов растений находилась ниже предела обнаружения. Вдоль 65 меридиана количественно определяемые значения ^{232}Th составили 1,6...4,1 Бк/кг при среднем значении 2,97 Бк/кг по трем образцам. Вдоль 75 меридиана количественно определено только одно значение – $1,2 \pm 0,4$ Бк/кг. Удельная активность ^{226}Ra характеризуется несколько более высокой частотой количественного определения. Вдоль 65 меридиана значения ^{226}Ra , превышающие предел обнаружения, составили 2,8 и 21 Бк/кг, вдоль 75 меридиана количественно определяемые значения ^{226}Ra варьировали от 3,3 до 31 Бк/кг, при среднем значении 15 ± 9 Бк/кг. Удельная активность ^{137}Cs в растениях также преимущественно находилась ниже предела обнаружения.

**СОДЕРЖАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ
В ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ АРИДНОЙ ЗОНЫ КАЗАХСТАНА**

Таблица 2. Удельная активность ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{241}Am и ^{137}Cs в почвах и растениях

Номер точки	Удельная активность, Бк/кг									
	почва					растения				
	^{40}K	^{232}Th	^{226}Ra	^{241}Am	^{137}Cs	^{40}K	^{232}Th	^{226}Ra	^{241}Am	^{137}Cs
65 меридиан										
1	500±100	30±6	16±3	<1,1	55±11	400±80	3,2±0,9	<0,9	<0,16	<0,30
2	600±120	38±8	22±4	<0,2	16±3	390±80	<1,6	<1,6	<0,17	<0,60
3	610±120	35±7	24±5	<0,4	23±4	300±60	4,1±0,9	<1	<0,15	<0,60
4	530±110	37±7	22±4	<0,4	6,8±1,3	135±25	<1,9	2,8±0,9	<0,17	<0,40
5	420±80	25±5	13±2	<1,0	5,4±1,1	410±80	<1,3	<0,7	<0,15	<0,50
6	540±110	40±8	21±4	<0,2	4,1±0,8	500±100	<1,6	<1,1	0,17	<0,30
7	690±40	42±8	24±5	<0,2	14±3	450±90	<1,1	<1	0,17	0,4±0,2
8	670±130	50±10	22±4	<0,7	24±5	140±30	<1,4	<1,2	0,19	<0,30
9	500±100	34±7	19±4	<0,3	22±4	160±30	1,6±0,7	<1,0	0,17	<0,20
10	430±80	52±10	34±7	<0,2	4,5±0,9	220±40	<0,7	<0,2	0,07	<0,20
11	640±130	43±8	30±6	<0,2	3,7±0,7	180±30	<0,9	<0,3	0,07	<0,30
12	590±120	40±8	29±6	<0,3	29±6	150±30	<1,5	<0,3	0,16	<0,30
13	460±90	31±6	24±5	<0,4	11±2	130±20	<1,7	<0,3	0,14	<0,30
14	580±120	41±8	31±6	<0,5	16±3	150±30	<1,7	21±4	0,16	<0,50
15	350±70	17±3	15±3	<0,2	7,8±1,5	310±60	<2	<1,8	0,15	<0,60
75 меридиан										
1	550±110	36±7	20±4	<0,2	19±4	260±50	<1,4	13±3	<0,20	<0,30
2	590±120	37±8	23±4	<0,2	14±3	400±80	<1,8	<1,5	<0,20	<0,40
3	560±110	38±8	23±4	<0,3	26±5	940±190	<1,7	<1,0	<0,20	<0,50
4	420±80	23±4	14±3	<0,2	6,3±1,2	620±120	<1,2	<0,9	<0,10	<0,30
5	460±90	23±4	16±3	<0,2	25±5	510±100	<1,4	3,3±0,7	<0,20	<0,40
6	500±100	23±4	16±3	<0,7	33±6	1500±300	<2	<1,6	<0,20	<0,70
7	450±90	27±5	23±4	<0,2	14±3	200±40	<1,7	20±4	<0,20	<0,40
8	410±80	29±6	24±5	<0,7	29±6	420±80	1,2±0,4	18±4	<0,10	<0,20
9	420±80	22±4	25±5	<0,3	31±6	410±80	<0,9	24±5	<0,10	1,0±0,2
10	630±120	33±6	32±6	<0,4	23±4	790±160	<2,4	8,9±1,8	<0,20	<0,50
11	820±160	33±6	22±4	<0,1	7,9±1,6	1200±300	<3,3	<2,4	<0,30	2,1±0,4
12	750±150	38±8	31±6	<0,1	7,2±1,4	740±150	<2,2	7,8±1,6	<0,30	<0,70
13	920±180	40±8	22±4	<0,3	7,2±1,4	600±120	<1,5	31±6	<0,10	<0,40
14	980±200	39±8	24±5	<0,1	6,7±1,3	760±150	<2,4	7,3±1,5	<0,30	<0,70
15	850±170	47±9	28±5	<0,2	16±3	1300±300	<3,9	<2,9	<0,60	<1,50

Вдоль 65 меридиана количественно определено только одно значение – **0,4±0,2 Бк/кг**, вдоль 75 меридиана количественно определены два значения – 1,0±0,2 и 2,1±0,4 Бк/кг.

Высокой вариабельностью значений в растениях характеризуется удельная активность ^{40}K , при этом CV составляет 49,3% вдоль 65 меридиана и 54,1% вдоль 75 меридиана, что значительно выше, чем в почвах (18,1% и 31,4% соответственно). Для ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{137}Cs оценка вариабельности в растениях ограничена большим числом результатов ниже предела

обнаружения, однако в целом распределение этих радионуклидов также характеризуется большей неоднородностью по сравнению с почвами. Статистически значимых различий в значениях удельной активности радионуклидов между 65 и 75 меридианами не установлено. С учетом этого в качестве ориентировочных средних значений для растений можно принять 489,2 Бк/кг для ^{40}K , 2,5 Бк/кг для ^{232}Th , 14,3 Бк/кг для ^{226}Ra и 1,2 Бк/кг для ^{137}Cs , рассчитанных по количественно определенным результатам.

СОДЕРЖАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ АРИДНОЙ ЗОНЫ КАЗАХСТАНА

Для оценки параметров накопления радионуклидов в растениях из почвы рассчитаны коэффициенты накопления (Кн) – отношение удельной активности в растениях к удельной активности в почве (Таблица 3).

Таблица 3. Коэффициенты накопления (Кн) радионуклидов ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{137}Cs

Радионуклид	Коэффициенты накопления (Кн)					
	n	min	max	Среднее ариф. ± ошибка	Медиана	CV, %
^{40}K	30	0,209	0,976	0,517±0,278	0,492	53,7
^{232}Th	4	0,041	0,117	0,078±0,039	0,077	50,4
^{226}Ra	11	0,127	1,409	0,557±0,399	0,650	71,7
^{137}Cs	3	0,029	0,266	0,109±0,136	0,032	124,8

Рассчитанные Кн ^{40}K изменяются от 0,209 до 0,976 при среднем значении 0,517±0,278 и медиане 0,492. Высокий CV (53,7%) свидетельствует о существенной вариабельности накопления ^{40}K растительностью. Для ^{232}Th рассчитанные Кн составляют 0,041...0,117 при среднем значении 0,078±0,039 и медиане 0,077; CV составляет 50,4%. Кн ^{226}Ra изменяется от 0,127 до 1,409 при среднем значении 0,557±0,399 и медиане 0,650; CV составляет 71,7%, что указывает на высокую вариабельность накопления. При этом в одной точке вдоль 75 меридиана Кн превышает 1. Кн ^{137}Cs варьируется от 0,029 до 0,266 при среднем значении 0,109±0,136 и медиане 0,032; CV составляет 124,8%, что обусловлено значительной неоднородностью определяемых значений. Таким образом, Кн для большинства радионуклидов не превышают 1, что указывает на отсутствие их выраженного накопления из почвы растениями; исключение составляет единичный случай накопления ^{226}Ra (Кн = 1,409) вдоль 75 меридиана. Наиболее высокая вариабельность характерна для накопления ^{137}Cs , тогда как относительно более интенсивное накопление отмечается для ^{40}K и ^{226}Ra . При этом полученные значения Кн в целом согласуются с международными данными [9].

На основании полученных результатов о содержании естественных и искусственных радионуклидов в почвенно-растительном покрове проведена оценка дозовых нагрузок на биоту. Входными параметрами для расчета являлись содержания естественных и искусственных радионуклидов в почве и растениях (Таблица 2). Удельная активность радионуклидов ^{137}Cs ^{241}Am и ^{232}Th в растениях находится на уровне ниже предела обнаружения, поэтому для консервативной оценки принималось значение предела. В таблице 4 приведены результаты оценки мощности дозы облучения растений естественными и искусственными радионуклидами при их максимальном содержании в почве и растениях на исследуемых меридианах 65 и 75.

Таблица 4. Мощность дозы облучения растений естественными и искусственными радионуклидами

Пути облучения	Мощность дозы, мкГр/сут				
	^{40}K	^{232}Th	^{226}Ra	^{137}Cs	^{241}Am
65 меридиан					
Внешнее облучение	4,8×10 ⁻¹	1,0×10 ⁻⁵	2,7×10 ⁻¹	1,5×10 ⁻¹	8,7×10 ⁻⁵
Внутреннее облучение	3,1	2,3×10 ⁻¹	7,1	2,0×10 ⁻³	1,5×10 ⁻²
Сумма	3,6	2,3×10 ⁻¹	7,4	1,5×10 ⁻¹	1,5×10 ⁻²
75 меридиан					
Внешнее облучение	6,9×10 ⁻¹	1,2×10 ⁻⁴	2,6×10 ⁻¹	8,9×10 ⁻²	5,5×10 ⁻⁵
Внутреннее облучение	9,3	2,1×10 ⁻¹	11	7,1×10 ⁻³	4,6×10 ⁻²
Сумма	10	2,1×10 ⁻¹	11	9,6×10 ⁻²	4,6×10 ⁻²

В результате проведенных расчетов установлено, что мощность дозы облучения от естественных радионуклидов растений, произрастающих на 65 меридиане, находится в диапазоне от 1,5 до 8,8 мкГр/сут. Основной вклад в суммарную мощность дозы растений от естественных радионуклидов вносит доза внутреннего облучения, а основным дозообразующий радионуклид – ^{40}K (~66%) (Рисунок 2). Мощность дозы рас-

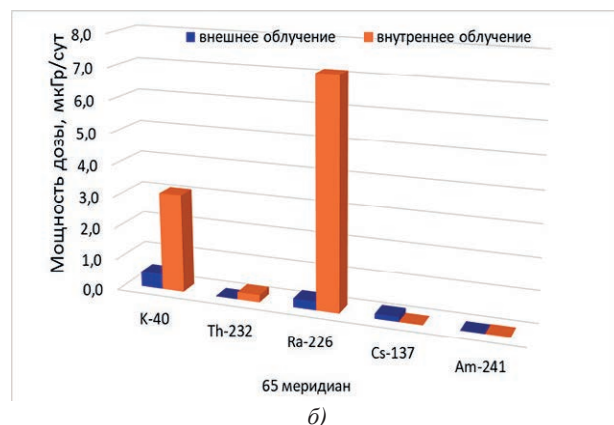
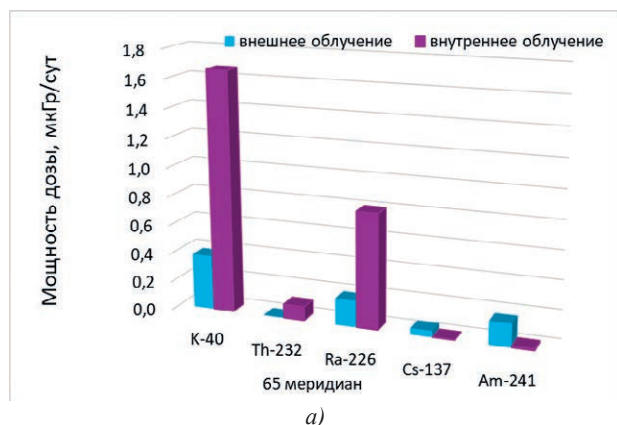


Рисунок 2. Вклад радионуклидов в суммарную мощность дозы облучения растений при средних (а) и максимальных (б) значениях их содержания в почве и растениях на 65 меридиане

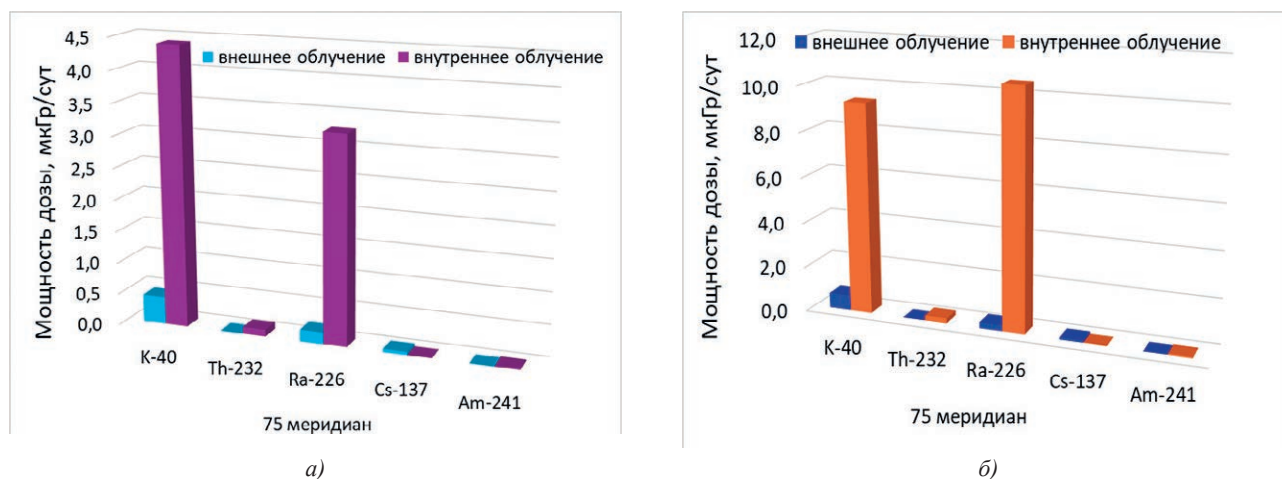


Рисунок 3. Вклад радионуклидов в суммарную мощность дозы облучения растений при средних (а.) и максимальных (б.) значениях их содержания в почве и растениях на 75 меридиане

тений, формируемая за счет внутреннего и внешнего облучения техногенных радионуклидов, варьируется от 0,016 до 0,16 мкГр/сут, при этом основным дозообразующим радионуклидом является ^{137}Cs (~91%). Следует отметить, что мощность дозы внутреннего облучения от техногенных радионуклидов формируется за счет ^{241}Am (~88%).

Мощность дозы облучения от естественных радионуклидов растений, произрастающих на 75 меридиане, находится в диапазоне от 3,7 до 15 мкГр/сут. Основной вклад в суммарную мощность дозы растений от естественных радионуклидов вносит доза внутреннего облучения, а основные дозообразующие радионуклиды – ^{40}K и ^{226}Ra (~48% и 51% соответственно) (рисунок 3). Суммарная мощность дозы растений от техногенных радионуклидов варьируется от 0,026 до 0,11 мкГр/сут, где основным дозообразующим радионуклидом – ^{137}Cs (~66%).

Суммарная мощность дозы облучения растений от внешнего и внутреннего облучения при максимальных значениях на 65 и 75 меридианах составила 8,9 мкГр/сут и 15 мкГр/сут соответственно, что не превышает пороговых значений для хронического облучения наземных растений и находится на уровне естественного радиационного фона, согласно литературным данным [6, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что удельная активность исследованных радионуклидов в почвенно-растительном покрове степной зоны РК вдоль 65 и 75 меридианов статистически значимо не различается. Средние значения удельной активности в почвах для рассматриваемой территории составляют 580,7 Бк/кг для ^{40}K , 34,8 Бк/кг для ^{232}Th , 23 Бк/кг для ^{226}Ra и 16,9 Бк/кг для ^{137}Cs . Наибольшей вариабельностью в почвах характеризуется ^{137}Cs . Содержание радионуклида ^{241}Am и в почвах, и в растениях количественно не установлено. В растениях средние значения удельной ак-

тивности, рассчитанные по количественно определенным результатам, составляют 489,2 Бк/кг для ^{40}K , 2,5 Бк/кг для ^{232}Th , 14,3 Бк/кг для ^{226}Ra и 1,2 Бк/кг для ^{137}Cs . Распределение значений удельной активности всех исследуемых радионуклидов в растениях характеризуется большей неоднородностью по сравнению с почвами. Рассчитанные коэффициенты накопления преимущественно не превышают 1, что свидетельствует об отсутствии выраженного накопления радионуклидов растениями. Наиболее высокой вариабельностью характеризуется накопление ^{137}Cs , тогда как относительно более интенсивное накопление отмечается для ^{40}K и ^{226}Ra . Расчетные значения мощности дозы облучения растений от естественных и искусственных радионуклидов составляют 1,6–8,9 мкГр/сут вдоль 65 меридиана и 3,7–15 мкГр/сут вдоль 75 меридиана, что, согласно рекомендациям МКРЗ, находится значительно ниже уровня, при котором ожидается проявление радиационных эффектов у референтных видов.

Полученные средние значения могут быть использованы в качестве исходных фоновых характеристик для последующего радиационного мониторинга почвенно-растительного покрова, оценки пространственной динамики содержания природных и техногенных радионуклидов, а также для расчета дозовых нагрузок и оценки радиационного риска для биоты.

Сформированные показатели также могут применяться в качестве базовых значений при проведении повторных обследований территории и выявлении возможных изменений радиологической обстановки в результате природных или антропогенных факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках научного гранта AP26194435 «Оценка фоновых уровней и миграционной способности искусственных и естественных радионуклидов в почвенно-растительном покрове степной природной зоны Республики Казахстан».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. Сайбеков Т. С., Абылаев Ж. А. Радиационная обстановка на территории Республики Казахстан с 1954 по 1994 годы. Семипалатинская область. Атлас. – Алматы: Министерство экологии и биоресурсов РК, 1997. – Т. 16. – 400 с.
2. Исследование базовых характеристик радионуклидного загрязнения почвы и воздуха: отчет о НИР (заключительный) за 2020 г / Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК (ИРБЭ «НЯЦ РК»), рук. Кабдыракова А.М. – Курчатов, 2020. – 98 с. - № ГР 0118РК01139. – Инв. №0220РК00163.
3. Инструкция и методические указания по наземному обследованию радиационной обстановки на загрязненной территории: утв. Межведомственной комиссией по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР. – М., 1989.
4. 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.
5. Методические рекомендации Р52.18.820-2015. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Обнинск, 2015. – 60 с.
6. ICRP. Environmental Protection - the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Annals of the ICRP, Vol. 38, 2008. – 242 p.
7. Учебно-методическое руководство по радиоэкологии и обращению с радиоактивными отходами для условий Казахстана: проект К-112 (МНТЦ). – Алматы: ОАО «Волковгеология», 2002. - 304 с.
8. Радиоэкологическое состояние «северной» части Семипалатинского испытательного полигона: монография/ под рук. С. Н. Лукашенко. – 2-е изд.// Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана/ Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – Павлодар: ТОО «Дом печати», 2010. – Вып. 1. – 294 с.: ил. – Библиогр.: с. 281-290; 115 назв. – 500 экз. – ISBN 978-601-7112-38-7 (рус., англ., каз.).
9. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments// IAEA TECDOC-1616.–Vienna: IAEA, 2009. – 163 p.
10. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учетом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 // Радиация и риск. – 2013.– Т. 22, №1. – С. 47-61.

**ҚАЗАҚСТАННЫҢ АРИДТІ АЙМАҒЫНЫҢ ТОПЫРАҚ-ӨСІМДІК ЖАМЫЛҒЫСЫНДАҒЫ
ТАБИҒИ ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ҚҰРАМЫ**

Н. В. Ларионова^{1*}, А. В. Топорова¹, А. Е. Кундузбаева¹, А. М. Кабдыракова²

¹ ҚР ҰАО «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан

* Байланыс үшін e-mail: larionova@nnc.kz

Қазақстанның аридтік аймағының топырақ-өсімдік жамылғысында 65 және 75 меридиан бойындағы табиғи және жасанды радионуклидтердің үлестік белсенділігіне бағалау жүргізілді. Топырақтардағы орташа мәндер ⁴⁰K үшін 580,7 Бк/кг, ²³²Th үшін 34,8 Бк/кг, ²²⁶Ra үшін 23,0 Бк/кг және ¹³⁷Cs үшін 16,9 Бк/кг құрады. Өсімдіктерде мөлшерлік белгіленген мәндер бойынша есептелген орташа мәндер ⁴⁰K үшін 489,2 Бк/кг, ²³²Th үшін 2,5 Бк/кг, ²²⁶Ra үшін 14,3 Бк/кг және ¹³⁷Cs Бк/кг үшін 1,2 Бк/кг болды. Жк мәндерінің ең жоғары өзгергіштігі ¹³⁷Cs-ке тән, ал өсімдіктердің салыстырмалы түрде қарқынды жинақталуы ⁴⁰K және ²²⁶Ra үшін белгіленеді. Өсімдіктердің сәулелену дозасының болжамды қуаты 65 меридиан бойымен тәулігіне 1,6...8,9 мкГр және 75 меридиан бойымен тәулігіне 3,7...15,0 мкГр құрады және анықтамалық түрлерде радиациялық әсерлердің пайда болуы күтілетін деңгейден едәуір төмен болды. Алынған нәтижелер радиациялық мониторинг, радионуклидтер динамикасын және биотаға дозалық жүктемелерді бағалау, сондай-ақ зерттелген аумақтың радиологиялық жай-күйін кейінгі бақылау үшін бастапқы сипаттамалар ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: меншікті белсенділік, табиғи радионуклидтер (⁴⁰K, ²³²Th, ²²⁶Ra), жасанды радионуклидтер (¹³⁷Cs, ²⁴¹Am), топырақ-өсімдік жамылғысы, биотаға түсетін дозалық жүктеме.

ACTIVITY CONCENTRATIONS OF NATURAL AND ARTIFICIAL RADIONUCLIDES
IN THE SOIL–VEGETATION COVER OF THE ARID ZONE OF KAZAKHSTAN

N.V. Larionova^{1*}, A.V. Toporova¹, A.Ye. Kunduzbayeva¹, A.M. Kabdyrakova²

¹ Branch office "Institute of Radiation Safety and Ecology" of the RSE "NNC RK", Kurchatov, Kazakhstan

² RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan", Kurchatov, Kazakhstan

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

An assessment was made of the activity concentrations of natural and artificial radionuclides in the soil–vegetation cover of the arid zone of Kazakhstan along the 65th and 75th meridians. The mean activity concentrations in soils were 580.7 Bq/kg for ⁴⁰K, 34.8 Bq/kg for ²³²Th, 23.0 Bq/kg for ²²⁶Ra, and 16.9 Bq/kg for ¹³⁷Cs. In plants, the mean activity concentrations calculated from the quantitatively determined values were 489.2 Bq/kg for ⁴⁰K, 2.5 Bq/kg for ²³²Th, 14.3 Bq/kg for ²²⁶Ra, and 1.2 Bq/kg for ¹³⁷Cs. The activity concentration of ²⁴¹Am could not be quantified. The highest variability in concentration ratio (CR) values was observed for ¹³⁷Cs, whereas relatively greater uptake by plants was observed for ⁴⁰K and ²²⁶Ra. The estimated absorbed dose rate to plants ranged from 1.6 to 8.9 μGy/day along the 65th meridian and from 3.7 to 15.0 μGy/day along the 75th meridian. These values were substantially below the levels at which radiation effects in reference species are expected. The results obtained can be used as baseline characteristics for radiation monitoring, assessment of radionuclide dynamics, and radiation dose burdens on biota, as well as for subsequent monitoring of the radiological status of the study area.

Keywords: activity concentration, natural radionuclides (⁴⁰K, ²³²Th, ²²⁶Ra), artificial radionuclides (¹³⁷Cs, ²⁴¹Am), soil–vegetation cover, radiation dose burden to biota.