

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-128-137>

УДК 556.3:539.16 (574.41)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОТОКОВ ПЛОЩАДКИ «ДЕГЕЛЕН»

Р. Г. Ермакова*, А. К. Айдарханова, Ж. Е. Тлеуканова, А. С. Мамырбаева

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

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

В статье представлены данные исследования вертикального распределения радионуклидов в донных отложениях водотоков бывшей испытательной площадки «Дегелен» Семипалатинского испытательного полигона. В рамках данных исследований проведен отбор проб донных отложений в виде ненарушенных колонок. На основании полученных данных содержания радионуклидов в образцах донных отложений построены гистограммы, описывающие распределение радионуклидов по вертикали. Рассмотрено распределение техногенных радионуклидов ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^3H . Содержание ^{241}Am находится ниже ПО во всех отобранных образцах. Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr составило от 3 ± 1 до 180 ± 20 Бк/кг и от 10 ± 1 до 13000 ± 2000 Бк/кг, соответственно. Содержание ^3H определялось в двух формах: в свободной воде (для образцов донных отложений с руч. Узынбулак) и в прочносвязанной форме. Содержание ^3H в свободной воде составило от 6400 ± 640 Бк/кг до 21000 ± 2100 Бк/кг, ^3H в прочносвязанной форме – от 8 ± 1 Бк/кг до 5300 ± 550 Бк/кг.

Ключевые слова: СИП, ручей, техногенные радионуклиды, радионуклидное загрязнение, вертикальное распределение, донные отложения.

ВВЕДЕНИЕ

Донные отложения играют важную роль в формировании гидрохимического режима воды и функционировании экосистем водных объектов, отражая совокупность физических и химических процессов и являются стабильным компонентом, где могут накапливаться загрязняющие вещества [1, 2].

Изучение вертикального распределения радионуклидов в почвах представляет интерес с нескольких точек зрения. Во-первых, от распределения радионуклидов по профилю зависит мощность дозы излучений в поверхностном слое (мощность дозы снижается по мере проникновения радионуклида в нижние слои). Во-вторых, вымывание радионуклидов поверхностными водами из почвы загрязненного участка зависит от концентрации радионуклидов в поверхностном слое, а она, в свою очередь, изменяется вследствие вертикального распределения. В-третьих, сведения о скорости вертикального распределения требуются для оценки возможности вторичного загрязнения вод радионуклидами [3].

Вторая половина XX века ознаменовалась поступлением в окружающую среду огромного количества техногенных радионуклидов. В это время были созданы основные радиохимические предприятия – ПО «Маяк» [4], Сибирский химический комбинат [5] и Красноярский горно-химический комбинат [6] – расположенные в водосборных бассейнах рек Оби и Енисея. В результате работы данных предприятий часть жидких радиоактивных отходов с различными уровнями активности попадала в гидрографические сети, что допускалось существовавшим в то время регламентом. Радиоактивное загрязнение в составе пресноводного стока из водосборных бассейнов Обской губы и Енисейского залива поступало в область

смешения с водами Карского моря. Исследования, проведенные в два этапа, охватывают значительный временной промежуток – с 1995 по 2001 гг. и с 2014 по 2019 гг. Это позволило не только зафиксировать текущее состояние радиационного фона, но и проследить динамику изменений, произошедших в донных отложениях за последние 20 лет. Различия в распределении ^{137}Cs в донных отложениях Обской и Енисейской зонах повышенных активностей (ЗПА), выявленные в ходе работ, оказались явными и достаточно контрастными. Согласно первому этапу (1995–2001 гг.), в Енисейской ЗПА максимальное значение удельной активности ^{137}Cs , составило 263 Бк/кг на глубине 5 см. Анализ вертикального распределения ^{137}Cs по данным второго этапа (2014–2019 гг.) показывает, что в поверхностных слоях удельная активность радионуклида не превышает 12 Бк/кг, максимум находится на глубине 12 см и равен 32 Бк/кг. На первом этапе исследований Обской ЗПА анализ вертикального распределения ^{137}Cs показал максимум 112 Бк/кг на глубине 19 см. На втором этапе исследований максимальная удельная активность ^{137}Cs составила 13,5 Бк/кг на глубине 9 см. Установлена полная деградация Обской зоны повышенной активности ^{137}Cs и весьма существенная – Енисейской, которая первоначально была наиболее загрязненной [7].

Изучение вертикального распределения радионуклидов в донных отложениях связано с серьезными экологическими последствиями радиационных и техногенных аварий. Интерес еще более возрос после аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г., следствием которой стало радиоактивное загрязнение речных бассейнов северо-восточного побережья о. Хонсю [8]. Так, в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» произошло загрязнение ^{137}Cs бассейнов речных сис-

тем Абукумы, Мано, Нитта, Ота, Укедо, Маеда, Ку-ма, которые впадают в Тихий океан, и на которых проводились исследования вертикального распределения ^{137}Cs в донных отложениях. Профили вертикального распределения ^{137}Cs в донных отложениях, отобранных на р. Укедо, показывают, что максимальные значения удельной активности ^{137}Cs получены в поверхностных слоях 0–2 см в первые годы после аварии. В настоящее время максимальные значения удельной активности ^{137}Cs наблюдаются в слоях ниже 8 см, а в верхних слоях – эти значения значительно ниже, что может свидетельствовать о меньшем поступлении радионуклида в последующие после аварии годы. В реках Абукума и Нитта в первые годы после аварии также были обнаружены максимумы удельных активностей в поверхностных слоях донных отложений, однако их значения и глубина варьировались. В частности, в р. Абукума максимумы были зарегистрированы на глубине 2–4 см, что может указывать на различные тенденции в динамике осаждения и миграции радионуклидов, зависящие от геоморфологических и гидрологических характеристик этих водоемов [9].

К радиоактивному загрязнению обширных территорий также привели испытания ядерного оружия. Один из крупнейших полигонов для проведения ядерных испытаний – Семипалатинский испытательный полигон (СИП). На территории СИП расположены различные типы водных объектов, представленные водоемами природного и техногенного происхождения, а также водотоки. Основные водотоки территории СИП – это ручьи площадки «Дегелен» и р. Шаган. В ранее проведенных исследованиях было установлено, что воды р. Шаган характеризуются довольно сложной системой тритиевого загрязнения за счет наличия нескольких источников загрязнения радионуклидом, которые отличаются механизмами поступления в воды р. Шаган [10].

Бывшая испытательная площадка «Дегелен» использовалась для проведения подземных ядерных испытаний средней и малой мощности. В период с 1961 по 1989 гг. было проведено более 200 ядерных испытаний в 181 штольне (шт.), которые расположены в горном массиве Дегелен. В результате этого на сравнительно небольшой площади сконцентрировано огромное количество радиоактивных продуктов, представляющих большую опасность для окружающей среды [11]. Штольни представляют собой горизонтальную выработку в гранитном массиве горы, их длина варьирует от нескольких сотен метров до 2 км. При этом диаметр ствола выработки штолен составляет около 3 м [12].

Несмотря на закрытие испытательных штолен на горном массиве Дегелен, спустя более 30 лет продолжается вынос радионуклидов из штолен с водопроявлениями и накопление их в руслах водотоков. Основными особенностями радиоактивного загрязнения является значительная концентрация техногенных

радионуклидов по берегам водотоков [13, 14]. Максимальных значений радиоактивное загрязнение достигает, как правило, вблизи штолен, постепенно снижаясь по мере удаления от них. При этом, наблюдается ярко выраженная зависимость содержания радионуклидов в почве и в воде в зависимости от удаления от портала штольни. Основным механизмом переноса радионуклидов за пределы горного массива является их миграция по водным артериям Дегелена – ручьям, которые находятся в зоне влияния водотоков из штолен [15]. В пойме штольневых водотоков содержание отдельных радионуклидов в воде, почве, растительности значительно превышает допустимые уровни. Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr на выходе водотока из портала штольни может достигать значений до $n \cdot 10^5$ Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ – до $n \cdot 10^3$ Бк/кг, ^3H – до $n \cdot 10^5$ Бк/кг [16]. Наряду с исследованиями содержания радионуклидов в компонентах экосистем проводились исследования горизонтальной и вертикальной миграций техногенных радионуклидов в почвах и донных отложениях водотоков из шт. 176 и шт. 177. В результате исследований было выявлено, что наибольшим проникновением в глубину почвенного профиля обладает ^{90}Sr , менее значительно распределяется ^{137}Cs , и наименее подвижными по вертикали являются $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am [17, 18]. Несмотря на значительные успехи в изучении миграции радионуклидов в почвах, донные отложения, как одни из главных источников информации о состоянии водных объектов, требуют отдельного внимания. Различия физико-химических свойств среды и гидродинамических условий водотоков приводят к различным механизмам миграции и аккумуляции радионуклидов, что обуславливает необходимость детального анализа их вертикального распределения в донных отложениях.

С момента закрытия СИП получен большой объем информации относительно текущей радиационной обстановки на территории площадки «Дегелен», исследовано распределение радионуклидов в воде [19, 20], почве [21], воздухе [22, 23], атмосферных осадках [24], растениях [25] и животных [26].

Целью данной работы является исследование вертикального распределения техногенных радионуклидов в донных отложениях ручьев испытательной площадки «Дегелен».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования вертикального распределения радионуклидного загрязнения в донных отложениях выбраны ручьи испытательной площадки «Дегелен»: Байтлес, Токтакушук, Узынбулак и Карабулак (рисунок 1). Выбор данных ручьев обусловлен их генетической связью с водотоками из штолен: руч. Байтлес – с водотоками шт. 176 и 609; Токтакушук – с водотоком шт. 165; руч. Узынбулак – с водотоками шт. 177, 104 и 802; и руч. Карабулак – с водотоком шт. 511.



руч. Байтлес



руч. Токтакушык



руч. Узынбулак



руч. Карабулак

Рисунок 1. Исследуемые водотоки площадки «Дегелен»

Точки отбора проб были расположены в зоне выхода ручьев за пределы границы площадки «Дегелен», в заводях с малым движением водных масс, где про-

цесс накопления поступающих радионуклидов усилен. Данное расположение точек позволяет оценить не только особенности и специфику накопления радионуклидов, но и насколько глубоко возможно загрязнение на данной территории с учетом существующего выноса радионуклидов с водами ручьев за пределы площадки. Процессы накопления радионуклидов в донных отложениях под воздействием малого движения стока воды могут привести к увеличению удельных активностей радионуклидов в определенных слоях донных отложений.

Отбор проб донных отложений для исследования вертикального распределения радионуклидов производили в виде ненарушенной колонки цилиндрическим пробоотборником, который состоит из двух половин, благодаря которым можно легко извлечь пробы. Размеры пробоотборника (рисунок 2) составляли: внутренний диаметр – 5 см; высота цилиндра – 30 см. На изголовье пробоотборника предусмотрена металлическая заслонка, предотвращающая выпадение пробы при отборе.



Рисунок 2. Пробоотборник для отбора проб донных отложений в виде колонки

Отбор проводили на открытом месте без растительности и визуального разрушения поверхностного слоя. Процесс отбора был затруднен тем, что дно русла водотоков местами выложено скальными породами и проросло корневой системой водных и прибрежных растений. Точки отбора проб представлены на рисунке (рисунок 3).

Отбор колонок донных отложений был произведен точно. Высота отобранных колонок составляла до 10–13 см. Разделение колонок донных отложений на слои проводили сразу на местах отбора. Толщина одного слоя составляла 10–12 мм, масса 0,030–0,035 кг. В отобранных пробах проводилось определение содержания ^3H , ^{241}Am , ^{137}Cs и ^{90}Sr . Также для оценки радиоактивного загрязнения исследуемых объектов, в точках отбора колонок донных отложе-

ний производился сопряженный отбор проб воды, в которых проводилось определение тех же радионуклидов.

Для определения ^3H в свободной воде донных отложений проводилась дистилляция отобранных проб в специально подготовленной установке [27, 28]. Для этого пробу помещали в круглодонную колбу и устанавливали в колбонагреватель. Процесс дистилляции донных отложений проводили при температуре $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ до полного прекращения образования дистиллята. Из полученного дистиллята отбирали аликвоту объемом 5 мл, добавляли сцинтилятор «ULTIMA GOLD» в соотношении 1:3, и проводили измерения на жидкосцинтиляционном спектрометре «TRICARB 2900 TR» фирмы «PerkinElmer» (США) в течение не менее 120 мин. Минимальная детектируемая активность (МДА) ^3H в свободной воде составила 0,1 Бк/кг.

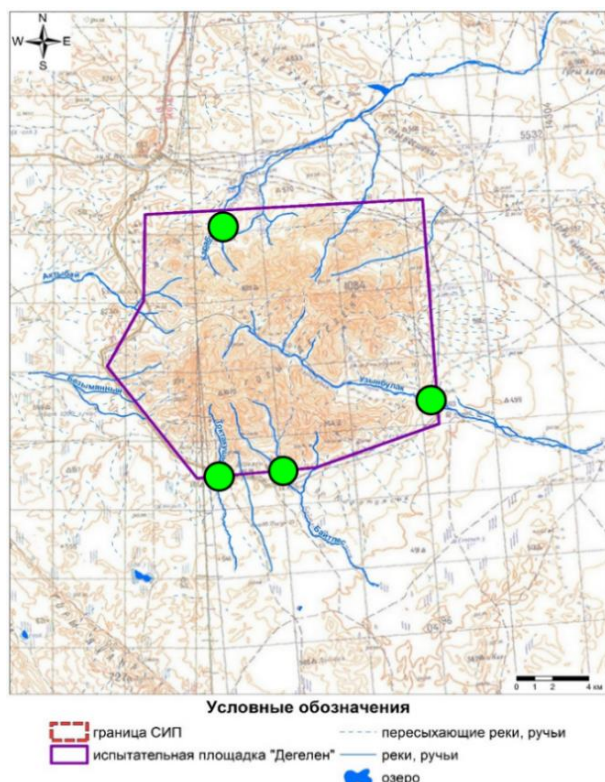


Рисунок 3. Расположение точек отбора проб донных отложений на исследуемых водотоках

Для определения прочносвязанного ^3H проводилось полное разложение донных отложений, т.е. с разрушением кристаллической решетки минерала, что достигалось методом автоклавного разложения [29], которое заключается в разложении образцов (с разрушением матрицы) под воздействием температуры и давления в герметично замкнутом объеме. С этой целью после проведения процесса дистилляции, пробы донных отложений постепенно (порциями) растирали пестиком в фарфоровой ступке и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм [30].

Из полученного объема отбиралась навеска массой $2\pm 0,001\text{ г}$ и помещалась в тefлоновую реакционную камеру. Автоклавирование проводилось под действием смеси концентрированных кислот HNO_3 и HF в соотношении 3:7 при температуре $160\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2,5 часов. Измерение содержания ^3H в прочносвязанной форме проводилось также, как и ^3H в свободной воде, после процесса дистилляции. МДА ^3H в прочносвязанной форме – 50 Бк/кг.

Остальной объем пробы донных отложений использовался для γ -спектрометрических измерений для определения содержания ^{241}Am и ^{137}Cs на γ -спектрометре фирмы «ORTEC» (США) с полупроводниковым детектором с кристаллом из сверхчистого германия и анализатором импульсов. МДА ^{241}Am и ^{137}Cs – 1 Бк/кг.

Радиохимическое выделение ^{90}Sr из проб донных отложений включало следующие этапы: введение изотопной метки ^{85}Sr ; полное кислотное разложение пробы; выделение и радиохимическая очистка изотопов Sr; двухнедельное накопление ^{90}Y , его выделение и измерение активности. Удельную активность ^{90}Sr в пробах донных отложений определяли по дочернему продукту ^{90}Y с помощью β -спектрометра «Quantulus 1220». МДА ^{90}Sr – 1 Бк/кг [31].

Неопределенность рассчитывалась с учетом среднеквадратического отклонения набранных импульсов в спектре измеряемой пробы и с учетом погрешностей лабораторной измерительной посуды, используемой на всех этапах пробоподготовки. В среднем неопределенность составила 10%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения содержания техногенных радионуклидов в воде ручьев площадки «Дегелен» представлены в таблице 1.

Таблица 1. Содержание техногенных радионуклидов в воде ручьев площадки «Дегелен»

Место отбора	Удельная активность, Бк/кг			
	^{241}Am	^{137}Cs	^3H	^{90}Sr
руч. Узынбулак	<0,03	$0,19\pm 0,02$	$(3,5\pm 0,3)\cdot 10^4$	$0,7\pm 0,02$
руч. Байтлес	<0,03	<0,01	$(5,0\pm 0,5)\cdot 10^4$	$0,8\pm 0,01$
руч. Токтакушык	<0,03	<0,01	$(5,9\pm 0,5)\cdot 10^4$	$0,9\pm 0,01$
руч. Карабулак	<0,03	$0,14\pm 0,01$	$(2,4\pm 0,2)\cdot 10^3$	$0,2\pm 0,02$

Согласно полученным результатам, основным загрязняющим радионуклидом вод ручьев является ^3H , содержание которого находится на уровне $n\cdot 10^3$ – $n\cdot 10^4$ Бк/кг. Содержание ^{241}Am во всех отобранных пробах воды находится ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения (<0,03 Бк/кг). Численные значения содержания ^{90}Sr зафиксированы в воде всех ручьев на уровне $n\cdot 10^{-1}$ Бк/кг. Численные значения содержания ^{137}Cs зафиксированы в воде ручьев Узынбулак и Карабулак на уровне $n\cdot 10^{-1}$ Бк/кг, в воде двух других ручьев содержание данного радионуклида находится ниже предела обнаружения.



Рисунок 4. Вертикальное распределение ^{137}Cs , ^3H (в прочносвязанной форме и в форме свободной воды) и ^{90}Sr в донных отложениях руч. Узынбулак

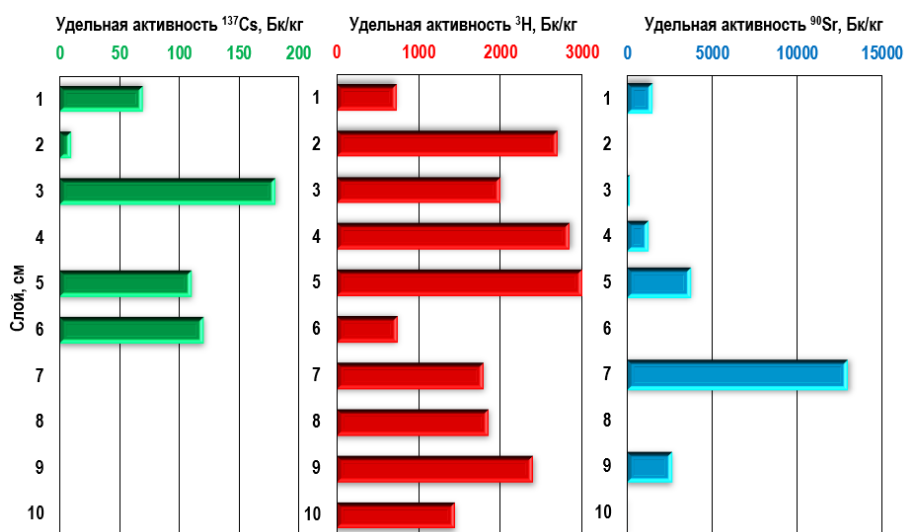


Рисунок 5. Вертикальное распределение ^{137}Cs , ^3H (в прочносвязанной форме) и ^{90}Sr в донных отложениях руч. Байтлес

По результатам исследования вертикального распределения техногенных радионуклидов в донных отложениях ручьев содержание ^{241}Am во всех отобранных пробах находится ниже предела обнаружения используемого аппаратно-методического обеспечения (< 1 Бк/кг).

На основании полученных данных содержания радионуклидов в образцах донных отложений построены гистограммы, описывающие распределение радионуклидов по вертикали (рисунки 4–7). Количество слоев соответствует количеству образцов для каждого объекта исследования.

Для сравнительного анализа вертикального распределения в донных отложениях ^3H в двух формах был выбран ручей Узынбулак. Долина ручья имеет наиболее крупную площадь водосбора. Радионуклид ^3H является основным загрязняющим радионуклидом долины ручья, удельная активность которого в воде на границе испытательной площадки достигает порядка $3 \cdot 10^4$ Бк/кг.

Согласно полученным данным, содержание ^3H в свободной воде варьирует в диапазоне от 6400 ± 640 Бк/кг до 21000 ± 2100 Бк/кг. Наблюдается его хаотичное распределение по всей глубине и не позволяет выявить четких закономерностей. В связи с этим, определение ^3H в свободной воде на всех точках является нецелесообразным, так как не характеризует вертикальное распределение в донных отложениях. Содержание ^3H в прочносвязанной форме достигает уровня 4100 ± 400 Бк/кг. Численные значения удельной активности радионуклида ^{137}Cs получены в 6 слоях. Максимальное значение удельной активности ^{137}Cs зафиксировано на глубине 2 см и составляет 110 ± 10 Бк/кг. Значения содержания ^{90}Sr получены по всей глубине в диапазоне от 90 ± 9 Бк/кг до 200 ± 20 Бк/кг. Пик активности для ^3H в прочносвязанной форме и ^{90}Sr приходится на глубину 5 см.

В образцах донных отложений руч. Байтлес (рисунок 5) получены численные значения удельной активности радионуклида ^{137}Cs в 5 слоях, которые варьируют от 10 ± 1 Бк/кг до 180 ± 20 Бк/кг, при этом

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ
В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОТОКОВ ПЛОЩАДКИ «ДЕГЕЛЕН»**

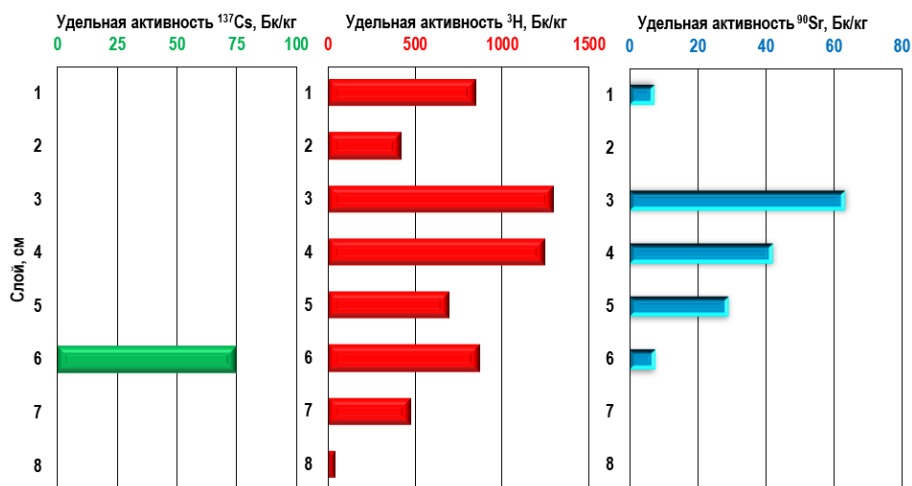


Рисунок 6. Вертикальное распределение ^{137}Cs , ^3H (в прочносвязанной форме) и ^{90}Sr в донных отложениях руч. Токтакушык

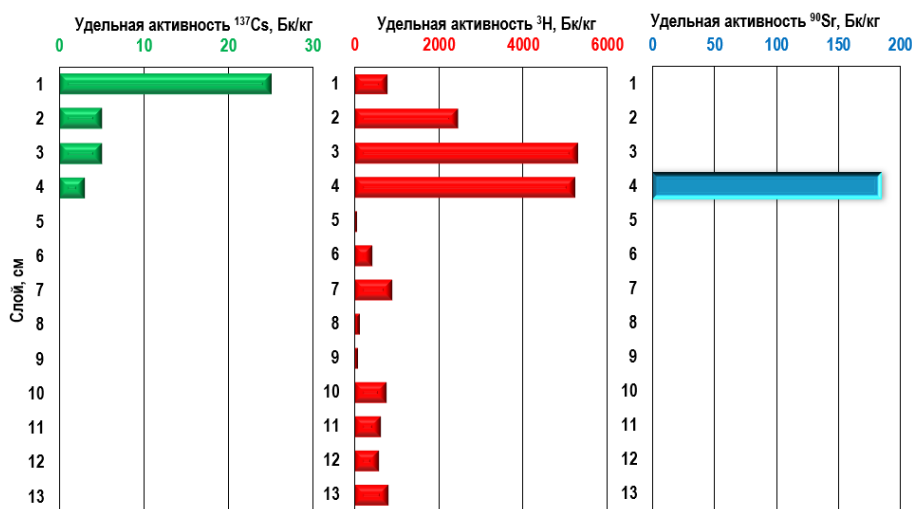


Рисунок 7. Вертикальное распределение ^{137}Cs , ^3H (в прочносвязанной форме) и ^{90}Sr в донных отложениях руч. Карабулак

максимальное значение данного радионуклида зафиксировано на глубине 3 см. Вертикальное распределение ^3H в прочносвязанной форме и ^{90}Sr наблюдается по всей глубине, численные значения для ^3H изменяются в диапазоне от 750 ± 80 Бк/кг до 3000 ± 300 Бк/кг, для ^{90}Sr – от 1500 ± 500 Бк/кг до 13000 ± 2000 Бк/кг. На вертикальном профиле ^3H ярко выраженный пик активности отсутствует, а в профиле ^{90}Sr приходится на глубину 7 см.

Численное значение удельной активности ^{137}Cs полученное для руч. Токтакушык (рисунок 6) зафиксировано только на глубине 6 см и составило 75 ± 8 Бк/кг. На гистограмме распределения ^3H в прочносвязанной форме максимальные значения зафиксированы на глубине 3 и 4 см и составляют порядка 1300 ± 150 Бк/кг. Численные значения удельной активности ^{90}Sr получены в 5 слоях, которые варьируют от 8 ± 1 Бк/кг до 65 ± 9 Бк/кг, при этом максимальное значение данного радионуклида зафиксировано на глубине 3 см.

Значения удельной активности ^{137}Cs в донных отложениях руч. Карабулак (рисунок 7) получены на глубине 1–4 см, пик активности приходится на поверхностный слой и составляет 25 ± 3 Бк/кг. Максимумы удельной активности ^3H в прочносвязанной форме зафиксированы на глубине 3–4 см и составляют порядка 5300 ± 530 Бк/кг. Численное значение удельной активности ^{90}Sr зафиксировано только в слое 4 см и составило 185 ± 30 Бк/кг.

Согласно полученным результатам, ^3H в прочносвязанной форме проникает по всему профилю донных отложений и фиксируется во всех слоях всех исследуемых ручьев из-за его высокой миграционной способности. Радионуклид ^{90}Sr по сравнению с ^{137}Cs обладает более высокой миграционной способностью, проникая на большую глубину (для руч. Узунбулак и Байтлес), либо проникая до одного уровня с ^{137}Cs (для руч. Токтакушык и Карабулак).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ установлено, что максимальные значения содержания ^{137}Cs зафиксированы преимущественно в поверхностных слоях от 1 до 3 см, за исключением донных отложений руч. Токтакушук, где численное значение содержания ^{137}Cs зафиксировано только на глубине 6 см, и руч. Байтлес, где повышенные значения содержания ^{137}Cs достигают глубины 6 см. Содержание ^{241}Am в донных отложениях всех исследованных объектов находится ниже предела обнаружения. Максимальные значения содержания ^{90}Sr зафиксированы в слоях 3–5 см, а в донных отложениях руч. Байтлес – на глубине 7 см.

Вертикальное распределение ^3H в двух формах (в свободной воде и прочносвязанной форме) имеет различный характер. В донных отложениях руч. Узынбулак ^3H в свободной воде хаотично распределяется по всему профилю из-за его высокой миграционной способности, и имеет не ярко выраженный пик на глубине 6 см, в отличие от прочносвязанной формы. Максимальные значения ^3H в прочносвязанной форме в донных отложениях всех ручьев зафиксированы на глубине 3–5 см.

Различия вертикальных профилей распределения радионуклидов в первую очередь обусловлены свойствами самих радионуклидов. Основопологающим фактором вертикального распределения радионуклида может служить его растворимость и подвижность.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Живов А. А. Радионуклидное загрязнение пресных водных объектов вследствие сбросов радиоактивных отходов и радиационных аварий // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2014. – № 1. – С. 54–60.
2. Коновалова Э.Е. Анализ зарубежных методик оценки содержания тяжелых металлов в донных отложениях рек // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – Выпуск № 2. – ISSN 2409-529X.
3. Прохоров А. В. Моделирование миграции радионуклидов в почве // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2013. – № 3. – С. 21–23.
4. Казачёнок Н.Н., Попова И.Я., Мельников В.С., Поляничкова Г.В., Тихова Ю.П., Коновалов К.Г., Копелов А.И. ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ в системе реки Теча // Вода: химия и экология. – 2013. – № 11. – С. 10–15.
5. Воронов С. И., Седнев В. А. Авария на Сибирском химическом комбинате: последствия и выводы для обеспечения безопасности населения и устойчивости функционирования // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2016. – № 3 (30). – С. 3–9.
6. Лунёва К.В., Крышев А.И. Анализ радиозоологического воздействия Красноярского горно-химического

комбината на объекты речной биоты в 2000–2012 гг. // Радиация и риск. – 2014. – Т. 23. – № 1. – С. 89–96.

7. Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Асадулин Э.Э., Комаров В.Б. Радиационно-геохимическая устойчивость донных осадков в эстуариях Оби и Енисея и на прилегающем мелководье Карского моря // Океанология. – 2020. – Т. 60. – № 6. – С. 930–944.
8. Коноплев А.В., Каневец В.И., Жукова О.М., Герменчук М.Г., Деркач Г.А. Полуэмпирическая диффузионная модель смыва радионуклидов с загрязненных водосборов и ее проверка на основе данных мониторинга рек Фукусимы и Чернобыля // Геохимия. – 2021. – Т. 66. – № 6. – С. 550–561.
9. Konoplev A., Wakiyama Y., Wada T., Ivanov M., Komissarov M., Nanba K. Reconstruction of time changes in radiocesium concentrations in the river of the Fukushima Dai-ichi NPP contaminated area based on its depth distribution in dam reservoir's bottom sediments // Environmental Research. – 2022. – P. 112307.
10. Актаев М.Р., Айдарханов А.О., Айдарханова А.К., Пронин С.С., Искенов А.О. Мониторинг тритиевого загрязнения вод р. Шаган // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – № 2. – P. 25–29. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-25-29>
11. Ахметов М.А., Артемьев О.И., Птицкая Л.Д., Синяев В.А. Радиационный мониторинг водотоков и проблемы реабилитации нагорном массиве Дегелен Семипалатинского испытательного полигона // Вестник НЯЦ РК. – 2000. – № 3. – С. 23–28.
12. Акчурин И.А. Семипалатинский ядерный полигон: создание, становление, деятельность. – М.: М-во обороны Российской Федерации, 12 Центральный научно-исследовательский институт. – 2007. – 225 с.
13. Паницкий А.В. Миграция техногенного радионуклида ^{137}Cs в долине ручья Тахтакушук низкогогорного массива Дегелен // Вестник НЯЦ РК. – 2005. – № 4(24). – С. 96–101.
14. Субботин С.Б., Дубасов Ю.В. Радиоактивное загрязнение водной среды горного массива Дегелен // Радиохимия. – 2013. – Т. 55, Вып. 6. – С. 561–567.
15. Магашева Р.Ю., Султанова Б.М., Паницкий А.В. Характеристика почвенно-растительного покрова испытательной площадки «Дегелен» // Вестник НЯЦ РК. – 2013. – № 4. – С. 32–42.
16. Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Тимонова Л.В., Бурдакина О.В. Современные уровни активности искусственных радионуклидов в объектах водопользования, расположенных на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 77–85.
17. Паницкий А.В., Лукашенко С.Н. Характер перераспределения радионуклидов в системе вода-почва в экосистемах, сопряженных с радиоактивно-загрязненными водотоками из штолен, на испытательной площадке «Дегелен» Семипалатинского испытательного полигона // Радиация и риск. – 2013. – Т. 22. – № 4 – С. 74–79.
18. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N. Nature of radioactive contamination of components of ecosystems of streamflows from tunnels of Degelen massif // Journal of Environmental Radioactivity. – 2015. – Vol. 144. – P. 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.02.021>
19. Айдарханова А.К., Лукашенко С.Н. Современные уровни загрязнения и характер распределения радионуклидов в системе «вода – донные отложения» вод-

- ных объектов территории Семипалатинского испытательного полигона и прилегающих территорий // Радиационная биология. Радиоэкология. – Москва. – 2017, – Т. 57, – № 3, – С. 286–296.
<https://doi.org/10.7868/S0869803117030067>
20. Мухамедияров Н.Ж., Макарычев С.В., Колбин В.В., Дюсембаева М.Т., Шакинов Е.З., Есильканов Г.М., Темирганова А.Е., Ташекова А.Ж., Умаров М.А. Исследование пространственного распределения элементов в системе «вода – донные отложения» ручья Узынбулак Семипалатинского испытательного полигона // Известия Саратовского университета. – 2022. – Т. 22, вып. 4. – С. 235–242. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-4-235-242>
 21. Panitskiy, A.V., Lukashenko, S.N., Magasheva, R.Y. Particularities of radionuclides' vertical distribution in soils of former Semipalatinsk test site // J. Fundamental research. – 2013. – No. 10. – P. 2231–2236. <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32742>
 22. Ляхова О.Н., Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н. К вопросу о путях миграции трития за пределы бывшей испытательной площадки «Дегелен» // Радиация и Риск. – 2014. – Т. 23, № 1. – С. 97–104.
 23. Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Тимонова Л.В., Ларионова Н.В., Турченко Д.В. Оценка уровня концентрации газообразных соединений трития в местах проведения ядерных испытаний на территории Семипалатинского испытательного полигона // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2020. – Т. 60, № 6. – С. 646–657.
 24. Turchenko D.V., Lukashenko S.N., Aidarkhanov A.O., Lyakhova O.N. Studying of tritium content in snowpack of Degelen mountain range // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – Vol. 132. – P. 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.01.017>
 25. Larionova, N.V., Lukashenko, S.N., Kabdyrakova, A.M., Kunduzbayeva, A.Y., Panitskiy, A.V., Ivanova, A.R. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site // Journal of Environmental Radioactivity. – 2018. – Vol. 186. – P. 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.006>
 26. Panitskiy A., Bazarbaeva A., Baigazy S., Alexandrovich I., Larionova N. Radioecological characteristics of Siberian roe deer (*Capreolus pygargus* Pal., 1771) inhabiting locations of nuclear weapon tests // PLoS ONE. – 2024. – Vol. 19(9). – P. 0308518. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308518>
 27. Сержанова З.Б., Айдарханова А.К., Ляхова О.Н., Койшыбаев Р.А. Оптимизация методов исследования тритиевого загрязнения почв с учетом особенностей СИП // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – № 4. – С. 49–53. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2018-4-49-53>
 28. Serzhanova, Z.B., Aidarkhanova, A.K., Lukashenko, S.N., Lyakhova, O.N., Timonova, L.V., Raimkanova A.M. Researching of tritium speciation in soils of «Balapan» site // Journal of Environmental Radioactivity. – 2018. – Vol. 192. – P. 621–627. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.016>
 29. Сержанова З.Б., Айдарханова А.К., Ляхова О.Н., Тимонова Л.В., Раимканова А.М. Методические подходы для исследования связанных форм нахождения трития в почвах радиоактивно-загрязненных участков Семипалатинского испытательного полигона // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – № 2. – С. 41–48. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2020-2-41-48>
 30. ГОСТ 29269-91 «Почвы. Общие требования к проведению анализов». – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 6 с.
 31. Методика определения содержания искусственных радионуклидов $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{90}Sr в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях): KZ.07.00.00471-2005. – Алматы: Изд-во стандартов, 2010. – 24 с.

REFERENCES

1. Zhivov A. A. Radionuklidnoe zagryaznenie presnykh vodnykh ob'ektov vsledstvie sbrosov radioaktivnykh otkhodov i radiatsionnykh avariï // Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoï zashchity. – 2014. – No. 1. – P. 54–60.
2. Konovalova E.E. Analiz zarubezhnykh metodik otsenki soderzhaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh rek / Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik. – 2018. – Issue 2. – ISSN 2409-529X.
3. Prokhorov A. V. Modelirovanie migratsii radionuklidov v pochve // Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk. – 2013. – No. 3. – P. 21–23.
4. Kazachenok N.N., Popova I.Ya., Mel'nikov V.S., Polyanchikova G.V., Tikhova Yu.P., Konovalov K.G., Kopelov A.I. ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ v sisteme reki Techa // Voda: khimiya i ekologiya. – 2013. – No. 11. – P. 10–15.
5. Voronov S. I., Sednev V. A. Avariya na Sibirskom khimicheskom kombinat: posledstviya i vyvody dlya obespecheniya bezopasnosti naseleniya i ustoychivosti funktsionirovaniya // Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoï zashchity. – 2016. – No. 3 (30). – P. 3–9.
6. Luneva K.V., Kryshev A.I. Analiz radioekologicheskogo vozdeystviya Krasnoyarskogo gorno-khimicheskogo kombinata na ob'ekty rechnoy bioty v 2000–2012 gg. // Radiatsiya i risk. – 2014. – Т. 23. – No. 1. – P. 89–96.
7. Miroshnikov A.Yu., Flint M.V., Asadulin E.E., Komarov V.B. Radiatsionno-geokhimicheskaya ustoychivost' donnykh osadkov v estuariyakh Obi i Eniseya i na prilgayushchem melkovod'e Karskogo morya // Okeanologiya. – 2020. – Т. 60. – No. 6. – P. 930–944.
8. Konoplev A.V., Kanivets V.I., Zhukova O.M., Germenchuk M.G., Derkach G.A. Poluempiricheskaya diffuzionnaya model' smyva radionuklidov s zagryaznennykh vodosborov i ee proverka na osnove dannyykh monitoringa rek Fukusimy i Chernobylya // Geokhimiya. – 2021. – Т. 66. – No. 6. – P. 550–561.
9. Konoplev A., Wakiyama Y., Wada T., Ivanov M., Komissarov M., Nanba K. Reconstruction of time changes in radiocesium concentrations in the river of the Fukushima Dai-ichi NPP contaminated area based on its depth distribution in dam reservoir's bottom sediments // Environmental Research. – 2022. – P. 112307.
10. Aktaev M.R., Aydarkhanov A.O., Aydarkhanova A.K., Pronin S.S., Iskenov A.O. Monitoring of tritium pollution of the Shagan river waters // NNC RK Bulletin. – 2021. – No. 2. – P. 25–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-25-29>
11. Akhmetov M.A., Artem'ev O.I., Ptitskaya L.D., Sinyayev V.A. Radiation monitoring of water flows and rehabilitation of Degelen mountain massif at Semipalatinsk test site // NNC RK Bulletin. – 2000. – No. 3. – P. 23–28. (In Russ.)

12. Akchurin I.A. Semipalatinskiy yadernyy poligon: sozдание, stanovlenie, deyatelnost'. – Moscow: M-vo oborony Rossiyskoy Federatsii, 12 Tsentral'nyy nauchno-issledovatel'skiy institut. – 2007. – 225 p.
13. Panitskiy A.V. Migration of ^{137}Cs artificial radionuclide in the valley of the Takhtakushuk river of the Degelen massif // NNC RK Bulletin. – 2005. – No. 4(24). – P. 96–101. (In Russ.)
14. Subbotin S.B., Dubasov Yu.V. Radioaktivnoe zagryaznenie vodnoy sredy gornogo massiva Degelen // Radiokhimiya. – 2013. – T. 55, Issue 6. – P. 561–567.
15. Magasheva R.Yu., Sultanova B.M., Panitskiy A.V. Description of soil-plant cover on “Degelen” site // NNC RK Bulletin. – 2013. – Issue 4. – P. 32–42. (In Russ.)
16. Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Timonova L.V., Burdakina O.V. Sovremennyye urovni aktivnosti iskusstvennykh radionuklidov v ob'ektakh vodopol'zovaniya, raspolozhennykh na territorii Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona (SIP) // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. – 2017. – T. 57. – No. 1. – P. 77–85.
17. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N. Kharakter pereraspredeleniya radionuklidov v sisteme voda-pochva v ekosistemakh, sopryazhennykh s radioaktivno-zagryaznennymi vodotokami iz shtolen, na ispytatel'noy ploshchadke “Degelen” Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona // Radiatsiya i risk. – 2013. – T. 22. – No. 4 – P. 74–79.
18. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N. Nature of radioactive contamination of components of ecosystems of stream-flows from tunnels of Degelen massif // Journal of Environmental Radioactivity. – 2015. – Vol. 144. – P. 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.02.021>
19. Aydarkhanova A.K., Lukashenko S.N. Sovremennyye urovni zagryazneniya i kharakter raspredeleniya radionuklidov v sisteme “voda – donnye otlozheniya” vodnykh ob'ektov territorii Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona i prilgayushchikh territoriy // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. – Moscow. – 2017, – T. 57, No. 3. – P. 286–296. <https://doi.org/10.7868/S0869803117030067>
20. Mukhamediyarov N.Zh., Makarychev S.V., Kolbin V.V., Dyusembaeva M.T., Shakenov E.Z., Esil'kanov G.M., Temirzhanova A.E., Tasheva A.Zh., Umarov M.A. Issledovanie prostranstvennogo raspredeleniya elementov v sisteme “voda – donnye otlozheniya” ruch'ya Uzynbulak Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona // Izvestiya Saratovskogo universiteta. – 2022. – T. 22, Issue 4. – P. 235–242. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-4-235-242>
21. Panitskiy, A.V., Lukashenko, S.N., Magasheva, R.Y. Particularities of radionuclides' vertical distribution in soils of former Semipalatinsk test site // J. Fundamental research. – 2013. – No. 10. – P. 2231–2236. <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32742>
22. Lyakhova O.N., Larionova N.V., Lukashenko S.N. K voprosu o putyakh migratsii tritiya za predely byvshey ispytatel'noy ploshchadki «Degelen» // Radiatsiya i Risk. – 2014. – T. 23, No. 1. – P. 97–104.
23. Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Timonova L.V., Larionova N.V., Turchenko D.V. Otsenka urovnya kontsentratsii gazoobraznykh soedineniy tritiya v mestakh provedeniya yadernykh ispytaniy na territorii Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. – 2020. – T. 60, No. 6. – P. 646–657.
24. Turchenko D.V., Lukashenko S.N., Aidarkhanov A.O., Lyakhova O.N. Studying of tritium content in snowpack of Degelen mountain range // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – Vol. 132. – P. 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.01.017>
25. Larionova, N.V., Lukashenko, S.N., Kabdyrakova, A.M., Kunduzbayeva, A.Y., Panitskiy, A.V., Ivanova, A.R. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk test site // Journal of Environmental Radioactivity. – 2018. – Vol. 186. – P. 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.006>
26. Panitskiy A., Bazarbaeva A., Baigazy S., Alexandrovich I., Larionova N. Radioecological characteristics of Siberian roe deer (*Capreolus pygargus* Pal., 1771) inhabiting locations of nuclear weapon tests // PLoS ONE. – 2024. – Vol. 19(9). – P. 0308518. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308518>
27. Serzhanova Z.B., Aydarkhanova A.K., Lyakhova O.N., Koyshybaev R.A. Optimizing methods for researching into soil contamination with tritium given STS features // NNC RK Bulletin. – 2018. – Issue. 4. – P. 49–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2018-4-49-53>
28. Serzhanova, Z.B., Aidarkhanova, A.K., Lukashenko, S.N., Lyakhova, O.N., Timonova, L.V., Raimkanova A.M. Researching of tritium speciation in soils of «Balapan» site // Journal of Environmental Radioactivity. – 2018. – Vol. 192. – P. 621–627. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.016>
29. Serzhanova Z.B., Aydarkhanova A.K., Lyakhova O.N., Timonova L.V., Raimkanova A.M. Methodological approaches to research into tritium bound speciation in soils of radioactively contaminated areas at Semipalatinsk Test Site // NNC RK Bulletin. – 2020. – Issue 2. – P. 41–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2020-2-41-48>
30. GOST 29269-91 «Pochvy. Obshchie trebovaniya k provedeniyu analizov». – Moscow: Izd-vo standartov, 1992. – 6 p.
31. Metodika opredeleniya soderzhaniya iskusstvennykh radionuklidov $^{239+240}\text{Pu}$ i ^{90}Sr v ob'ektakh okruzhayushchey sredy (pochvakh, gruntakh, donnykh otlozheniyakh i rasteniyakh): KZ.07.00.00471-2005. – Almaty: Izd-vo standartov, 2010. – 24 p.

**«ДЕГЕЛЕН» АЛАҒЫНЫҢ АҒЫН СУЛАРЫНЫҢ ТҮПТІК ШӨГІНДІЛЕРІНДЕ
ТЕХНОГЕНДІК РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ТІГІНЕН ТАРАЛУЫН ЗЕРТТЕУ**

Р. Г. Ермакова*, А. К. Айдарханова, Ж. Е. Тлеуканова, А. С. Мамырбаева

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

** Байланыс үшін E-mail: lavrikova@nnc.kz*

Мақалада Семей сынақ полигонының бұрынғы «Дегелен» сынақ алаңының ағын суларының түптік шөгінділерінде радионуклидтердің тігінен таралуын зерттеу деректері келтірілген. Осы зерттеулер шеңберінде бұзылмаған бағандар түрінде түптік шөгінділердің сынақтарын іріктеу жұмыстары жүргізілді. Радионуклидтер құрамының алынған деректері негізінде түптік шөгінділердің үлгілерінде радионуклидтердің тігінен таралуын сипаттайтын гистограммалар құрылды. ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr және ^3H техногендік радионуклидтердің таралуы қарастырылды. ^{241}Am <ПО мазмұны барлық таңдалған үлгілерде болып табылады. ^{137}Cs және ^{90}Sr құрамы сәйкесінше 3 ± 1 бастап 180 ± 20 Бк/кг дейін және 10 ± 1 бастап 13000 ± 2000 Бк/кг дейінгі мәнді құрады. ^3H құрамы екі формада: бос суда (Ұзынбұлақ бұл. түптік шөгінділердің үлгілері үшін) және тығыз байланысқан формада екені анықталды. Бос судағы ^3H мөлшері 6400 ± 640 Бк/кг бастап 21000 ± 2100 Бк/кг дейін, ^3H тығыз байланысқан түрінде 8 ± 1 Бк/кг бастап 5300 ± 550 Бк/кг дейін болды.

Түйін сөздер: *ССП, бұлақ, техногендік радионуклидтер, радионуклидтердің ластануы, тігінен таралуы, түптік шөгінділер.*

**INVESTIGATION OF VERTICAL DISTRIBUTION OF ANTHROPOGENIC RADIONUCLIDES
IN SEDIMENTS OF WATERCOURSES OF THE “DEGELEN” SITE**

R. G. Yermakova*, A. K. Aidarkhanova, Zh. Ye. Tleukanova, A. S. Mamyrbayeva

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

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

The article presents research data on the vertical distribution of radionuclides in bottom sediments of water streams at the former Degelen test location of the Semipalatinsk Test Site. As part of research, bottom sediments were sampled in the form of undisturbed cores. Based upon findings on the content of radionuclides in bottom sediment samples, histograms were plotted to describe the vertical distribution of radionuclides. The distribution of man-made radionuclides such as ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr and ^3H is addressed. The content of ^{241}Am is <DL in all collected samples. That of ^{137}Cs and ^{90}Sr varied from 3 ± 1 to 180 ± 20 Bq/kg and 10 ± 1 to $13,000\pm 2,000$ Bq/kg, respectively. The content of ^3H was determined in two forms: in the free water (for bottom sediment samples from the Uzynbulak cr.) and in the tightly bound form. The content of ^3H in the free water was $6,400\pm 640$ Bq/kg to $21,000\pm 2,100$ Bq/kg, in the tightly bound form – 8 ± 1 Bq/kg to $5,300\pm 550$ Bq/kg.

Keywords: *STS, creek, man-made radionuclides, radionuclide contamination, vertical distribution, bottom sediments.*