https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-186-195
УДК 502/504:539.16(574.41)

35 ЛЕТ ПОСЛЕ ЗАКРЫТИЯ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА: РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Э.Г. Батырбеков[1], А.О. Айдарханов[2], Н.В. Ларионова[2*], А.В. Паницкий[2], А.К. Айдарханова[2], Л.В. Тимонова[2], А.Е. Кундузбаева[2], А.М. Кабдыракова[1], Д.В. Турченко[2], С.Б. Субботин[2]

[1]РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан
[2]Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
** E-mail для контактов: larionova@nnc.kz*

В статье обобщены данные о радиоактивном загрязнении основных объектов окружающей среды Семипалатинского испытательного полигона (СИП), включая почвенный и растительный покров, животный мир, поверхност-ные воды, атмосферный воздух и осадки (снег). Рассмотрены особенности содержания и распределения ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{241}Am и $^{239+240}$Pu, а также основные механизмы их переноса между компонентами экосистем. Выявлено, что загрязнение территории характеризуется выраженной пространственной неоднородностью, а наиболее высо-кие уровни содержания радионуклидов приурочены к эпицентрам наземных испытаний, радиоактивным следам, приустьевым участкам скважин, водонаполненным воронкам и зонам воздействия загрязненных водотоков. В почвах основная часть ^{137}Cs, ^{241}Am и $^{239+240}$Pu сохраняется в верхних горизонтах и связана с твердой фазой, тог-да как наибольшей вертикальной подвижностью характеризуется ^{90}Sr. Накопление радионуклидов растениями и животными определяется характером загрязнения местообитаний, свойствами радионуклидов и биологически-ми особенностями видов. Наиболее высокие уровни загрязнения поверхностных водных экосистем отмечены в техногенных водоемах, донных отложениях и водотоках площадки «Дегелен». Поступление радионуклидов в атмосферу связано с переходом ^{3}H из загрязненных вод и почвенной влаги, а также с пылевым переносом ча-стиц почвы. Показано, что современное радиоактивное загрязнение СИП преимущественно имеет локальный характер и определяется типом проведенных испытаний и последующим перераспределением радионуклидов в окружающей среде.

Ключевые слова: *Семипалатинский испытательный полигон (СИП), радиоактивное загрязнение, искусственные радионуклиды, объекты окружающей среды, миграция радионуклидов, тритий.*

Введение

С момента закрытия Семипалатинского испытательного полигона (СИП) казахстанскими учеными совместно с международным научным сообществом накоплен значительный объем данных о современной радиационной обстановке на его территории. Установлены основные участки радиоактивного загрязнения, а также пути и механизмы распространения радионуклидов в окружающей среде. Исследования охватывают почвенный и растительный покров, животный мир, поверхностные и грунтовые воды, воздух и осадки (снежный покров).

После поступления в почву радионуклиды перераспределяются по почвенному профилю, между размерными фракциями и различными физико-химическими формами. Особое место занимает ^{3}H, обладающий высокой подвижностью и участвующий в обмене между почвой, водой, атмосферным воздухом и растительностью. Изучение почв на СИП охватывает пространственное распределение искусственных радионуклидов, их вертикальную миграцию по почвенному профилю, количественное распределение по гранулометрическим фракциям и определение форм нахождения.

Исследования растительного покрова включают определение коэффициентов накопления (Кн) радионуклидов надземной частью растений и содержания ^{3}H в районах влияния загрязненных поверхностных, подрусловых и грунтовых вод. Изучение животного мира направлено на оценку переноса радионуклидов по пищевым цепям, их накопления в организмах животных и формируемых дозовых нагрузок.

Поверхностные воды СИП представлены природными озерами, водотоками и водоемами техногенного происхождения. К основным водотокам относятся ручьи площадки «Дегелен» и река Шаган. Загрязнение воздушного бассейна связано с поступлением радиоактивных частиц почвы и переходом ^{3}H из загрязненных вод и почвенной влаги. Снежный покров исследуется как объект, позволяющий выявлять локальные участки поступления ^{3}H.

Цель настоящей работы – обобщение ранее полученных данных о радиоактивном загрязнении основных объектов окружающей среды СИП.

Материалы и методы исследования

Работа выполнена в форме обзора опубликованных научных данных о радиоактивном загрязнении основных объектов окружающей среды СИП. В анализ включены исследования почвенного и растительного покрова, животного мира, поверхностных вод, атмосферного воздуха и снежного покрова. Рассматривались результаты определения содержания ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{241}Am и $^{239+240}$Pu, а при оценке воздушных аэрозолей – также ^{40}K, ^{228}Ac и ^{214}Bi.

Для почвенного покрова анализировались данные о пространственном и вертикальном распределении радионуклидов, формах их нахождения, распределении по гранулометрическим и микроагрегатным фракциям, а также о радиоактивных частицах. Отдельно рассмотрены результаты исследований ^{3}H на площадках «Опытное поле» и «Балапан». При обобщении данных по растительному покрову учитывались Кн радионуклидов в надземной части растений и содержание ^{3}H в растительности на территориях с различными типами загрязнения. Анализ животного мира включал сведения о биоразнообразии позвоночных, содержании радионуклидов в организмах грызунов, пресмыкающихся, копытных животных и рыб, а также результаты оценки дозовых нагрузок и радиоэкологических рисков.

Для поверхностных вод рассматривались данные о загрязнении воды и донных отложений природных и техногенных водоемов, реки Шаган и водотоков площадки «Дегелен». Оценка состояния воздушного бассейна основывалась на данных о содержании тритированной воды (НТО) и газообразного трития (НТ) в атмосферном и почвенном воздухе, радионуклидов в воздушных аэрозолях на радиационно-опасных объектах испытательных площадок СИП.

Результаты и обсуждение

Почвенный покров

Радиоактивное загрязнение почвенного покрова СИП сформировалось в результате различных видов ядерных испытаний. На участках наземных испытаний загрязнение сосредоточено в эпицентрах и на радиоактивных следах, а на площадках подземных испытаний – в приустьевых зонах штолен и скважин, а также на территориях, находящихся под воздействием загрязненных водотоков.

Вертикальное распределение радионуклидов исследовано на территории внутри границ СИП, за пределами площадок непосредственного проведения испытаний. Послойный отбор проводился в 169 точках до глубины 30 см с интервалом 5 см; всего было отобрано 1014 образцов почвы. Максимальные значения удельной активности большинства исследованных радионуклидов зарегистрированы в слое 0…5 см. На условно «фоновых» участках в этом слое в среднем находилось 83% общего содержания ^{137}Cs, 87% $^{239+240}$Pu и 38% ^{90}Sr. На радиоактивном следе 1953 года соответствующие значения составляли 92%, 83% и 73%, а на следе 1951 года – 93%, 93% и 59%. Минимальные значения содержания радионуклидов преимущественно отмечались на глубине 20…30 см. Для ^{241}Am численные значения в большинстве случаев регистрировались только в слоях 0…5 и 5…10 см, поэтому полное распределение этого радионуклида по профилю в исследовании не приводилось. По способности к перемещению в нижележащие слои почвы радионуклиды располагались в следующей последовательности: ^{90}Sr > ^{137}Cs > $^{239+240}$Pu > ^{241}Am. Наибольшая вертикальная подвижность установлена для ^{90}Sr, тогда как основная часть ^{137}Cs, $^{239+240}$Pu и ^{241}Am сохранялась в верхней части почвенного профиля [1].

Исследование почв площадки «Опытное поле» показало, что основная часть искусственных радионуклидов находилась в прочно связанной форме. В среднем ее доля составляла около 98% для ^{137}Cs, 94% для ^{90}Sr, 89% для ^{241}Am и 98% для $^{239+240}$Pu. Для ^{90}Sr установлена связь содержания обменной, кислоторастворимой и прочно связанной форм с количеством карбонатов в почве. Для $^{239+240}$Pu отмечена связь прочно связанной формы с содержанием водорастворимых солей [2].

Распределение радионуклидов по размерным фракциям зависит от исследуемого объекта и характера формирования загрязнения. На двух радиоактивных следах СИП наиболее высокие значения удельной активности были зарегистрированы не в мелкодисперсных, а в крупных почвенных фракциях. На следе наземного ядерного испытания наибольшее обогащение радионуклидами установлено во фракции 1000…500 мкм; коэффициент обогащения составлял 1,2…3,8. На следе наземного неядерного эксперимента с незначительным энерговыделением наиболее обогащенной была фракция 500…250 мкм с коэффициентом обогащения 1,1…5,1. Распределение ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am и $^{239+240}$Pu по фракциям на каждом из исследованных следов имело сходный характер [3]. Иная картина установлена в почвах зоны водотока, выходящего из штольни площадки «Дегелен», где загрязнение формировалось при переносе радионуклидов водой. Среди тонких органоминеральных фракций размером менее 40 мкм преимущественное накопление всех исследованных радионуклидов наблюдалось во фракции менее 5 мкм. Средние коэффициенты обогащения изменялись в диапазонах 1,26…1,95 для ^{137}Cs, 1,17…1,44 для ^{241}Am, 1,26…1,47 для ^{90}Sr и 0,94…1,94 для $^{239+240}$Pu [4]. Таким образом, повышенное содержание радионуклидов нельзя однозначно связывать только с мелкими или только с крупными почвенными частицами. На радиоактивных следах наибольшее обогащение было установлено в крупных фракциях, а в почвах водотока площадки «Дегелен» – в наиболее тонкой части исследованных органоминеральных фракций.

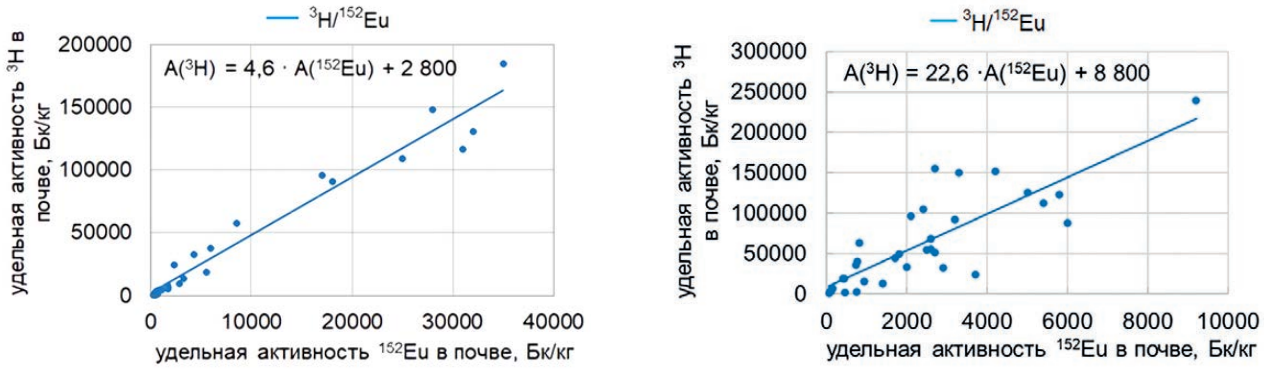
Почва также является одним из компонентов окружающей среды, в котором после ядерных испытаний был установлен радионуклид ^{3}H. На технической площадке П-1 «Опытного поля» удельная активность ^{3}H в поверхностном слое почвы достигала 185000 Бк/кг. Максимальные значения были зафиксированы в пределах эпицентров взрывов. Поверхностное распределение ^{3}H совпадало с распределением активационного продукта ^{152}Eu, что подтверждалось положительной зависимостью между удельными активностями этих радионуклидов (Рисунок 1). Полученные результаты свидетельствуют о преимущественной роли активационных процессов в формировании тритиевого загрязнения почвы на участках наземных испытаний [5]. В отличие от большинства других исследованных радионуклидов, ^{3}H обладает высокой подвижностью. Его распределение в почве определяется не только местом первоначального образования, но и перемещением поверхностных и подземных вод, содержанием почвенной влаги и формой нахождения ^{3}H в почве.

Растительный покров

Одним из наиболее распространенных параметров, используемых для количественной оценки накопления радионуклидов надземной частью растений из почвы, является Кн. Для СИП к настоящему времени значения Кн получены для естественных экосистем всех его территорий, характеризующихся различными типами радиоактивного загрязнения. Установлено, что в среднем минимальное накопление всех рассмотренных радионуклидов отмечается на площадке «Опытное поле». Далее значения Кн увеличиваются на территориях радиоактивных следов и условно «фоновых» территориях. Наибольшие значения Кн характерны для зон радиоактивных водотоков и мест испытания боевых радиоактивных веществ. Различия в значениях Кн для ^{137}Cs достигают 71 раза, для ^{90}Sr – 74 раз, для $^{239+240}$Pu – 14 раз, для ^{241}Am – 11 раз. При этом ряд убывания радионуклидов по способности к накоплению растениями имеет следующий вид: Кн ^{90}Sr > Кн ^{137}Cs > Кн $^{239+240}$Pu > Кн ^{241}Am. Значения Кн ^{90}Sr в среднем в восемь раз превышают Кн ^{137}Cs и до 16 раз – Кн $^{239+240}$Pu. Значения Кн $^{239+240}$Pu до трех раз выше Кн ^{241}Am [6].

Особенности накопления радионуклидов растениями были установлены в районе воронок, образовавшихся в результате экскавационных испытаний – мирных ядерных взрывов на площадке «Телкем». Диапазон значений Кн ^{90}Sr составлял 0,0077…1,5, а Кн $^{239+240}$Pu – 0,0012…0,84, охватывая по два порядка величин. Значения Кн ^{137}Cs изменялись в диапазоне 0,0040…0,70, а Кн ^{241}Am – 0,00060…0,73, охватывая по три порядка величин. Различия в Кн ^{137}Cs и ^{90}Sr для разных видов растений достигали 5-6 раз, а Кн ^{241}Am и $^{239+240}$Pu – 2 раза. Наибольшее содержание радионуклидов наблюдалось в полыни (*Artemisia sublessingiana*). Также установлено, что значения Кн ^{90}Sr постепенно снижаются с увеличением расстояния от зоны сброса. Все значения Кн значительно превышали значения, ранее полученные для эпицентров наземных ядерных испытаний, и были наиболее близки к значениям, установленным для условно «фоновых» территорий [7]. В местах проведения подземных ядерных испытаний в вертикальных скважинах на площадке «Сары-Узень» наиболее высокие значения Кн ^{137}Cs, ^{90}Sr, $^{239+240}$Pu и ^{241}Am наблюдались вблизи скважин без внешних физических нарушений почвенного покрова, а наиболее низкие – вблизи скважин с воронками, заполненными водой. Прибрежно-водные растения наиболее эффективно накапливали ^{90}Sr, тогда как у наземных растений наиболее высокие значения накопления были установлены для $^{239+240}$Pu [8].

Содержание ^{3}H в растениях определялось в свободной воде и в их органической составляющей. Высокие значения удельной активности ^{3}H в органической составляющей растений зафиксированы вблизи боевых скважин на площадке «Сары-Узень». Значения изменялись от 7,1 Бк/кг вблизи скважины № 106



а) *б)*

Рисунок 1. Зависимость удельной активности ^{3}H от удельной активности ^{152}Eu в почве: а - площадка «Опытное поле», техническая площадка П-1; б - территория «Атомного» озера [5]

до 200 000 Бк/кг вблизи скважины № 101. Фоновое содержание составляло 21,5 Бк/кг [9]. Удельная активность ^{3}H в свободной воде некоторых видов растений в зоне русла реки Шаган достигает приблизительно 200000 Бк/кг. Загрязнение растительности связано прежде всего с содержанием ^{3}H в поверхностных и подрусловых водах, являющихся основными источниками загрязнения. Для участков, характеризующихся отсутствием поверхностных водотоков, загрязненных ^{3}H, особого внимания заслуживают фреатофиты – растения, способные использовать грунтовые воды в качестве источника влаги. На территории СИП среди фреатофитов наиболее распространены чий (*Achnatherum splendens*) и чингил (*Halimodendron halodendron*). В результате исследований была установлена зависимость содержания ^{3}H в свободной воде растений-фреатофитов от его содержания в грунтовых водах (Рисунок 2) [10].

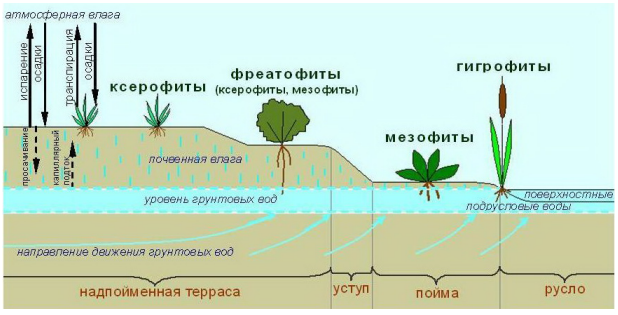
Животный мир

Территория СИП характеризуется высоким биоразнообразием и включает многочисленные виды млекопитающих, птиц, пресмыкающихся, земноводных, рыб и беспозвоночных. Одними из первых объектов радиоэкологических исследований стали мышевидные грызуны и пресмыкающиеся. Эти животные обладают небольшой площадью ареалов обитания и отражают локальные особенности радиоактивного загрязнения территории [11].

Установлено, что накопление радионуклидов в организме животных определяется характером радиоактивного загрязнения местообитаний, особенностями питания и биологией конкретного вида. Наиболее высокие уровни накопления наблюдались на локальных участках, связанных с эпицентрами наземных испытаний, площадками испытаний боевых радиоактивных веществ, радиоактивными водотоками массива Дегелен и радиационно опасным объектом «Атомное озеро». При удалении от участков загрязнения на расстояние, превышающее радиус активности животных, высокие значения удельной активности радионуклидов в их организме не фиксировались. Средние коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr были относительно невелики. Вместе с тем на отдельных локальных участках, загрязненных вследствие испытаний боевых радиоактивных веществ, концентрации ^{90}Sr в организме отдельных особей достигали чрезвычайно высоких значений. Был сделан вывод, что ящерицы могут участвовать во вторичном перераспределении загрязнения в природных экосистемах и использоваться в качестве биоиндикаторов локального загрязнения [11].

Наиболее интенсивное развитие получили радиоэкологические исследования крупных копытных животных, представляющих потенциальный интерес как объекты охоты и животноводства. Исследования проводились как на основании прямых измерений содержания радионуклидов в тканях и органах копытных животных, обитающих на территории СИП, так и посредством косвенной оценки возможного содержания радионуклидов в тканях по их удельной активности в фекалиях [12-13]. Результаты исследований показали, что ^{137}Cs преимущественно концентрируется в мышечной ткани, ^{90}Sr – в костной ткани, тогда как $^{239+240}$Pu и ^{241}Am локализуются главным образом в печени и костной ткани. На основании средних значений относительных концентраций радионуклидов, выраженных в долях от максимального значения, были построены нисходящие ряды, характеризующие способность тканей и органов накапливать радионуклиды. Для ^{137}Cs установлен следующий ряд: мышечная ткань> почки > легкие > селезенка > сердце > печень > костная ткань; для ^{90}Sr: костная ткань > печень > легкие > мышечная ткань > селезенка > сердце > почки [12]. Косвенная оценка показала, что даже при использовании консервативных сценариев ожидаемые концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в мясе домашних животных, выпасаемых на большинстве исследованных территорий СИП, не превышают действующих санитарных нормативов. Накопление трансурановых элементов остается крайне низким вследствие их слабой биологической доступности.

Для крупных копытных животных, обитающих на участках радиоактивного загрязнения СИП, были рассчитаны дозовые нагрузки и определены радиоэкологические риски на примере косули сибирской



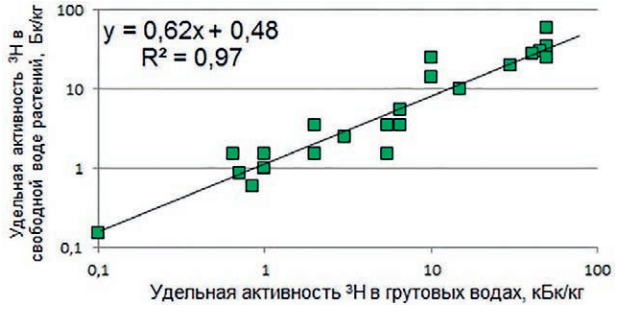


Рисунок 2. Зависимость содержания 3H в свободной воде растений-фреатофитов от содержания 3H в грунтовых водах [10]

Capreolus pygargus Pal., 1771. Расчетные дозовые нагрузки в основном оказались значительно ниже уровней, при которых могут наблюдаться радиобиологические эффекты на уровне популяций. По степени риска возникновения различных эффектов территории СИП располагались

в следующем убывающем ряду: площадки испытаний боевых радиоактивных веществ № «4» и «4А» > площадка «Опытное поле» > площадка «Дегелен» > площадка «Балапан» > площадка «Сары-Узень» > территории радиоактивных следов СИП > территории СИП без радиоактивных следов и испытательных площадок [13].

Отдельное направление исследований животного мира СИП посвящено водным экосистемам полигона. Исследования рыб показали, что распределение радионуклидов зависит от гидрохимических условий водоема, трофического статуса вида и возраста особей. Определение содержания ^{137}Cs, ^{90}Sr, $^{239+240}$Pu, ^{241}Am и ^{3}H проводилось в мышечной ткани, костях и внутренних органах рыб. Полученные данные использовались для оценки возможного поступления радионуклидов в организм человека при использовании водных биоресурсов. Наибольшие значения удельной активности техногенных радионуклидов были зарегистрированы в организме рыб, обитающих в воронке скважины № 101 на испытательной площадке «Сары-Узень». В других исследованных водоемах СИП – «Атомном озере», реке Шаган и озере Шаган – значимые значения удельной активности техногенных радионуклидов не фиксировались [14].

Таким образом, исследования животного мира показали, что содержание радионуклидов в организмах животных зависит от уровня и характера загрязнения среды, особенностей питания и биологических особенностей видов. Полученные результаты используются при оценке радиационной безопасности, разработке программ экологического мониторинга и обосновании использования территорий бывшего СИП.

Поверхностные воды

Поверхностные водные экосистемы СИП представлены природными озерами, водотоками и водоемами техногенного происхождения. Последние расположены на площадках «Опытное поле», «Балапан», «Телькем» и «Сары-Узень» и преимущественно представляют собой заполненные водой воронки, образованные в результате ядерных испытаний или проседания грунта. Природные озера СИП различаются по площади и в большинстве случаев характеризуются высокой минерализацией воды. Преимущественно это замкнутые водоемы, часть которых пересыхает к середине лета. Основным поверхностным водотоком является река Шаган, протекающая вдоль площадки «Балапан» и выходящая за пределы СИП. Основные водотоки площадки «Дегелен» представлены ручьями Узынбулак, Карабулак, Токтакушук, Байтлес и Актыбай, связанными с районами расположения штолен.

По результатам определения содержания радионуклидов в донных отложениях водоемов техногенного происхождения установлено, что наиболее загрязненными γ-излучающими радионуклидами ^{137}Cs и ^{241}Am являются пять участков площадки «Опытное поле», где проводились наземные ядерные испытания, участки проведения экскавационных взрывов, а также воронка скважины № 101, образовавшаяся в результате проседания грунта при внештатной ситуации во время проведения подземного ядерного испытания. По содержанию ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu наиболее загрязненными являются те же объекты, на которых зафиксированы максимальные значения содержания ^{137}Cs и ^{241}Am. По содержанию $^{239+240}$Pu в донных отложениях более n×10³ Бк/кг к наиболее загрязненным объектам также относятся «Тротиловое» озеро и воронка на технической площадке П-3, расположенные на площадке «Опытное поле», а также воронка скважины № 125 на площадке «Сары-Узень». При этом содержание остальных радионуклидов – ^{90}Sr, ^{137}Cs и ^{241}Am – на данных объектах находилось на уровне менее n×10³ Бк/кг. Вероятно, это связано с характером испытаний, проводившихся на данных объектах [15].

Содержание техногенных радионуклидов в донных отложениях большинства природных озер в среднем достигает 200 Бк/кг для ^{137}Cs и 20 Бк/кг для ^{241}Am, ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu. Максимальные значения содержания техногенных радионуклидов зафиксированы в донных отложениях Внешнего водоема, расположенного в непосредственной близости от «Атомного» озера: ^{137}Cs – 5000±500 Бк/кг; ^{241}Am – 250±25 Бк/кг; ^{90}Sr – 2300±200 Бк/кг; $^{239+240}$Pu – 9800±900 Бк/кг. Радионуклидное загрязнение донных отложений Внешнего водоема, фиксируемое в непосредственной близости от «Атомного» озера, обусловлено экскавационным взрывом 1965 года. На расстоянии около 1,5 км и более от «Атомного» озера радионуклидное загрязнение имеет фоновые значения. Повышенные значения содержания техногенных радионуклидов зафиксированы в донных отложениях озера Жангылды, расположенного на площадке «Сары-Узень»: ^{137}Cs – 260±50 Бк/кг; ^{241}Am – 17±3 Бк/кг; ^{90}Sr – 170±26 Бк/кг; $^{239+240}$Pu – 280±30 Бк/кг. В донных отложениях озера, расположенного на следе 1951 года, содержание ^{137}Cs составляло 87±9 Бк/кг, ^{241}Am – 38±4 Бк/кг, ^{90}Sr – 120±18 Бк/кг и $^{239+240}$Pu – 290±30 Бк/кг. В донных отложениях озера Кишкенсор зафиксировано только повышенное значение содержания ^{90}Sr – 890±130 Бк/кг [16].

Содержание ^{241}Am в воде всех водоемов техногенного и природного происхождения находилось ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения – менее 0,03 Бк/кг. В воде большинства водоемов техногенного происхождения

содержание ^{137}Cs находилось ниже предела обнаружения – менее 0,01 Бк/кг. Численные значения содержания ^{137}Cs зафиксированы в воде четырех водоемов: двух воронок на площадке «Опытное поле» и двух воронок на площадке «Сары-Узень». Численные значения содержания ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu в воде зафиксированы во всех водоемах техногенного происхождения и изменялись в следующих пределах: ^{90}Sr – от 0,01 до 400 Бк/кг; $^{239+240}$Pu – от $6{,}1\times10^{-4}$ до 0,21 Бк/кг. Максимально загрязненными по содержанию ^{90}Sr на уровне $n\times10^{2}$ Бк/кг являются воды двух воронок площадки «Опытное поле», воронки «Телькем-2» и воронки скважины № 101 на площадке «Сары-Узень». Максимально загрязненными по содержанию $^{239+240}$Pu на уровне $n\times10^{-1}$ Бк/кг являются воды воронок «Телькем-1» и «Телькем-2» площадки «Телькем» [15].

В воде большинства природных озер содержание техногенных радионуклидов находилось ниже предела обнаружения – менее 0,01 Бк/кг для ^{137}Cs – или ниже уровня вмешательства (УВ) для ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu. Для ^{90}Sr содержание составляло $n\times10^{-1}$ – $n\times10^{1}$ Бк/кг, для $^{239+240}$Pu – $n\times10^{-3}$ Бк/кг. Исключением является озеро, расположенное на следе 1951 года, где содержание ^{137}Cs в воде составляло 0,07±0,01 Бк/кг, хотя данное значение на 4 порядка ниже уровня вмешательства (УВ) для воды УВ ^{137}Cs=11 Бк/кг. Повышенные значения содержания ^{90}Sr зафиксированы в воде озера Жангылды – 1,9±0,3 Бк/кг, и озера, расположенного на следе 1951 года – 2,6±0,3 Бк/кг. Данные значения не превышали УВ для ^{90}Sr, равный 4,9 Бк/кг. В воде озера Кишкенсор, расположенного в зоне влияния площадки «Балапан», зафиксировано содержание ^{90}Sr, равное 17±2 Бк/кг, что на порядок превышает УВ. По результатам гидрогеологических исследований установлено, что данное радионуклидное загрязнение связано с подтоком загрязненных грунтовых вод, вымывающих ^{90}Sr из полостей скважин площадки «Балапан» [17].

Концентрация ^{3}H в водах реки Шаган изменяется в широком диапазоне – от значений ниже минимально детектируемой активности до 320000 Бк/кг. Максимальная активность ^{3}H регистрируется на участке, расположенном в 5 км от «Атомного» озера, минимальная – на расстоянии 70 км. В месте впадения реки Шаган в реку Иртыш содержание ^{3}H составляет около 90 Бк/кг (Рисунок 3) [18]. Содержание остальных техногенных радионуклидов в воде реки Шаган находилось ниже предела обнаружения: ^{137}Cs – менее 1×10^{-2} Бк/кг; ^{90}Sr – менее 3×10^{-2} Бк/кг; $^{239+240}$Pu – менее 1×10^{-4} Бк/кг [19]. В воде водотоков из штолен площадки «Дегелен» содержание ^{3}H изменялось от $n\times10^{3}$ до $n\times10^{5}$ Бк/кг, ^{90}Sr – от $n\times10^{1}$ до $n\times10^{3}$ Бк/кг, ^{137}Cs – от менее 10^{-2} до $n\times10^{2}$ Бк/кг, $^{239+240}$Pu – от менее 1×10^{-4} до $n\times10^{2}$ Бк/кг. Содержание техногенных радионуклидов в воде ручьев составляло: ^{3}H – порядка $n\times10^{4}$ Бк/кг; ^{90}Sr – от менее 3×10^{-2} до $n\times10^{-2}$ Бк/кг; ^{137}Cs – менее 0,01 Бк/кг; $^{239+240}$Pu – около $n\times10^{-3}$ Бк/кг. При этом содержание ^{3}H в воде на порядок превышает УВ, составляющий 7600 Бк/кг [20].

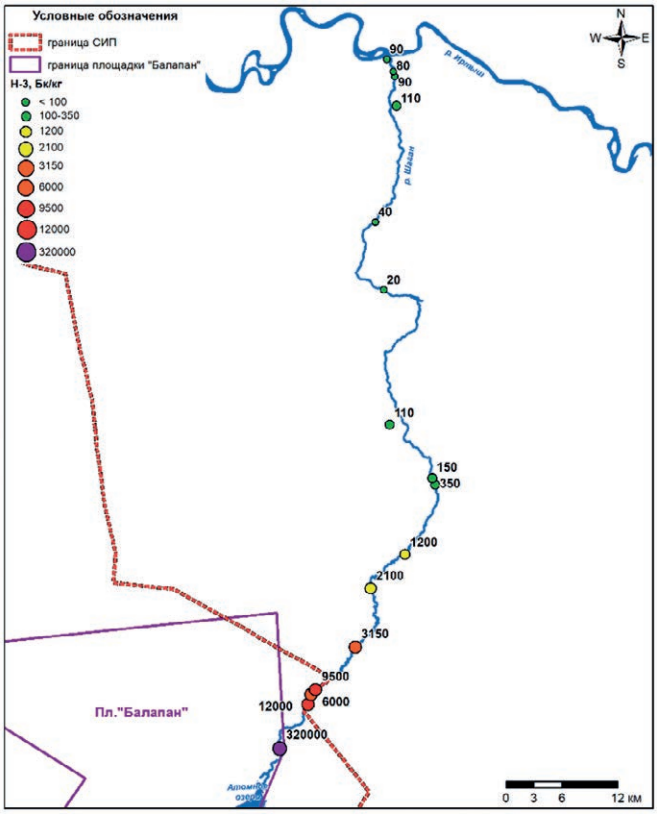


Рисунок 3. Результаты определения содержания ^{3}H в воде реки Шаган [18]

Воздушный бассейн, осадки

На радиационно-опасных объектах испытательных площадок СИП содержание техногенных радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs в воздушной среде составляет меньше предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения. Численные значения концентрации были получены по радионуклидам ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu. Максимальные концентрации радионуклида $^{239+240}$Pu в воздухе наблюдаются на технической площадке П-3 «Опытное поле» и скважине 1003 площадки «Сары-Узень», достигающие $1{,}6\times10^{-2}$ и $1{,}1\times10^{-2}$ Бк/м^3 соответственно, что в 6 раз превышает допустимую объемную активность для населения (ДОАнас) – $2{,}5\times10^{-3}$ Бк/м^3. Максимальное содержание радионуклида ^{90}Sr в воздушной среде, обнаруженное на площадке «4а», составляет $1{,}0\times10^{-3}$ Бк/м^3, что не превышает ДОАнас – 2,7 Бк/м^3. Однако на расстоянии 200…400 м от радиоактивно-загрязненного участка концентрация радионуклида $^{239+240}$Pu снижается в 100 раз, а на расстоянии 4…5 км снижается в 1000 раз [21-22]. Таким образом, согласно полученным экспериментальным данным на расстоянии 400 м от радиоактивно-загрязненного участка концентрация радионуклидов в воздушной среде не превышает допустимой объемной активности для населения (ДОАнас), установленной гигиеническими нормативами [23].

Формирование тритиевого загрязнения воздушной среды на территории СИП связано с испарением загрязненных поверхностных вод, поступлением ^{3}H из почвенной влаги и миграцией радионуклида из подземных вод в районах проведения подземных и экскавационных ядерных испытаний [24]. В атмосфере ^{3}H присутствует преимущественно в двух формах – в виде тритированной воды и газообразного трития. На территориях проведения наземных и экскавационных ядерных испытаний зарегистрированы преимущественно невысокие значения объемной активности ^{3}H. На площадке «Опытное поле» содержание НТО и НТ в атмосферном воздухе находилось ниже предела обнаружения – менее 0,5 Бк/м^3. В почвенном воздухе объемная активность НТО не превышала 0,8 Бк/м^3, а НТ не был обнаружен. На площадке «Телькем» содержание НТО и НТ в атмосферном и почвенном воздухе в большинстве случаев также составляло менее 0,5 Бк/м^3. В районе «Атомного» озера на отдельных участках гребня воронки объемная активность НТО в атмосферном воздухе достигала 8 Бк/м^3, НТ – 3 Бк/м^3. В почвенном воздухе содержание НТО достигало 2,5 Бк/м^3, НТ – 6 Бк/м^3. На площадках проведения подземных ядерных испытаний установлены более высокие концентрации ^{3}H в воздухе. На площадке «Балапан» объемная активность НТО в атмосферном воздухе изменялась от 0,5 до 15 Бк/м^3, НТ – от 0,5 до 190 Бк/м^3. В почвенном воздухе объемная активность НТО составляла от 0,5 до 220 Бк/м^3, НТ – от 0,5 до 40 Бк/м^3. Максимальные значения зарегистрированы в районе устья скважины № 1010. На площадке «Сары-Узень» объемная активность НТО в атмосферном воздухе достигала 420 Бк/м^3, тогда как содержание НТ не превышало 2,0 Бк/м^3. В почвенном воздухе объемная активность НТО достигала 760 Бк/м^3, НТ – 1,3 Бк/м^3. На площадке «Дегелен» детальные исследования атмосферного воздуха проводились в районе штолен № 176 и 177, где наблюдались водопроявления. Максимальные значения концентрации ^{3}H в атмосферном воздухе в местах выхода штольневых ручьев на поверхность составляли соответственно 1400 и 700 Бк/м^3. На расстоянии около 400 м от начальных точек значения снижались до 100 Бк/м^3 в районе штольни № 176 и до 50 Бк/м^3 в районе штольни № 177. Концентрация ^{3}H также снижалась по мере удаления в стороны от русла водотока [24-25].

Исследования атмосферных осадков на территории СИП представлены преимущественно результатами определения ^{3}H в снежном покрове. На площадке «Дегелен» исследовалось распределение ^{3}H в снежном покрове русел Карабулака, Узынбулака и Актыбая. В поверхностном слое снега в центре русел содержание ^{3}H достигало 40000 Бк/кг, тогда как фоновые значения на участках, не связанных с руслами водотоков, составляли 40–50 Бк/кг. Одним из основных механизмов поступления ^{3}H в снежный покров являлась его эманация с поверхности льда и почвы [26]. Более поздние исследования снежного покрова были проведены на площадках «Балапан» и «Сары-Узень». На площадке «Балапан» повышенные значения содержания ^{3}H в снеге зарегистрированы в районе «Атомного» озера, месторождения «Каражыра» и озера Кишкенсор. На площадке «Сары-Узень» повышенные значения выявлены возле скважины № 101, объекта «Лазурит» и безымянного ручья, вытекающего из горного массива. Максимальная удельная активность ^{3}H в снежном покрове составляла 45 Бк/кг на площадке «Балапан» и 36 Бк/кг на площадке «Сары-Узень». На фоновых территориях СИП содержание ^{3}H в снеге изменялось от 4,6 до 12 Бк/кг. На отдельных участках повышенное содержание ^{3}H в снежном покрове было установлено при отсутствии загрязненных поверхностных водотоков. Присутствие ^{3}H в таких местах может косвенно свидетельствовать о загрязнении почвы и поступлении трития из подземных источников [27].

Заключение

Радиоактивное загрязнение объектов окружающей среды СИП характеризуется выраженной пространственной неоднородностью. Наиболее высокие уровни содержания искусственных радионуклидов приурочены к эпицентрам наземных испытаний, радиоактивным следам, приустьевым участкам скважин, водонаполненным воронкам и зонам воздействия загрязненных водотоков. В почвах основная часть ^{137}Cs, $^{239+240}$Pu и ^{241}Am сохраняется в верхних

горизонтах и связана с твердой фазой, тогда как наибольшей вертикальной подвижностью характеризуется ^{90}Sr. Распределение радионуклидов между размерными фракциями зависит от происхождения загрязнения. Радионуклид ^{3}H выявлен в почвах бывших испытательных площадок; его распределение связано с эпицентрами испытаний, водонаполненными воронками, скважинами, водотоками и неглубоко залегающими подземными водами. Накопление радионуклидов в растениях происходит в последовательности ^{90}Sr > ^{137}Cs > $^{239+240}$Pu > ^{241}Am. Содержание ^{3}H в растениях связано с загрязненными поверхностными, подрусловыми и грунтовыми водами. Исследования животных подтвердили поступление радионуклидов в организмы грызунов, пресмыкающихся, копытных и рыб; уровни накопления зависят от загрязнения местообитаний, питания и биологических особенностей видов. Наиболее высокие уровни загрязнения поверхностных водных экосистем характерны для техногенных водоемов и донных отложений природных озер в зонах влияния испытательных площадок. Перенос ^{3}H за пределы СИП отмечается по реке Шаган, а загрязненные водотоки «Дегелена» способствуют миграции радионуклидов. Поступление радионуклидов в атмосферу связано с переходом ^{3}H из загрязненных вод и почвенной влаги, а также с пылевым переносом частиц почвы. В целом современное загрязнение СИП преимущественно имеет локальный характер и определяется типом проведенных испытаний, свойствами радионуклидов и механизмами их перераспределения между компонентами окружающей среды.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Агентства Республики Казахстан по атомной энергии в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713)

Литература / References:

1. Panitskiy A.V., Syssoeva Y.S., Baigazy S.A., Kunduzbayeva A.Ye., Kenzhina L.B., Polivkina Y.N., Larionova N.V., Krivitskiy P.Ye., Aidarkhanova A.K. Vertical distribution of radionuclides in soil at the Semipalatinsk Test Site beyond its test locations // PLOS ONE. – 2023. – Vol.18(1). – DOI: 10.1371/journal.pone.0278581.
2. Kunduzbayeva A.Ye., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Larionova N.V., Magasheva R.Yu., Bakirova G.A. Speciation of ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am, and $^{239+240}$Pu artificial radionuclides in soils at the Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2022. – Vol. 249, 106867. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106867.
3. Kabdyrakova A.M., Lukashenko S.N., Mendubayev A.T., Kunduzbayeva A.Ye., Panitskiy A.V., Larionova N.V. Distribution of artificial radionuclides in particle-size fractions of soil on fallout plumes of nuclear explosions // J. Environ. Radioact. – 2018. – Vol.186. – P. 45–53. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.022.
4. Kabdyrakova A.M., Kunduzbayeva A.Ye., Mendubayev A.T., Batyrbekov E.G., Lukashenko S.N., Vityuk V.A., Larionova N.V., Kabdrahmanova S.K. Mechanisms of the formation of radioactive soil contamination in the water-stream zone from the tunnel in the area of underground nuclear tests at the Degelen site, Semipalatinsk Test Site // Science of the Total Environment. – 2025. –Vol. 1000, 180443. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180443.
5. Тимонова Л.В., Ляхова О.Н., Айдарханов А.О., Сержанова З.Б. Тритиевое загрязнение почвы в местах проведения наземных ядерных испытаний на Семипалатинском испытательном полигоне // Радиация и риск. – 2020. – Vol. 29(4). – С.106–117. – DOI: 10.21870/0131-3878-2020-29-4-106-117.
6. 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 // J. Environ. Radioact. – 2018. – Vol. 186. – P.163–170. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.006.
7. Larionova N.V., Lukashenko S.N., Lyakhova O.N., Aidarkhanova A.K., Kunduzbayeva A.Ye., Kabdyrakova A.M., Krivitskiy P.Y., Polevik V.V., Aidarkhanov A.O. Transfer parameters of radionuclides from soil to plants at the area of craters produced by underground nuclear explosions at the Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2021. – Vol. 237(1–2), 106684. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106684.
8. Krivitskiy P., Larionova N., Toporova A., Aidarkhanova A., Monayenko V., Kunduzbayeva A., Kabdyrakova A., Polevik V., Aidarkhanov A. Artificial radionuclides in soils and vegetations in the area of underground nuclear tests locations in the Sary-Uzen site of the Semipalatinsk Test Site // Journal of Hazardous Materials. – 2026. – Vol. 502, 141010. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.141010.
9. Larionova N.V., Krivitskiy P.Y., Aidarkhanova A.K., Polevik V.V., Timonova L.V., Monayenko V.N., Turchenko D.V., Lukashenko S.N., Toporova A.V., Aidarkhanov A.O. Tritium content in vegetation cover at nuclear test locations at the “Sary-Uzen” site in the Semipalatinsk test site // Ecotoxicol Environ Saf. – 2024. – Vol. 288, 117387. – URL: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117387.
10. Larionova N.V., Lukashenko S.N., Lyakhova O.N., Aidarkhanov A.O., Subbotin S.B., Yankauskas A.B. Plants as indicators of tritium concentration in ground water at the Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2017. – Vol. 177. – P. 218–224. – URL: https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.032.
11. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N., Kadyrova N.Zh. ^{137}Cs and ^{90}Sr in lizards of the Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2017. – Vol. 166. – P. 91–96. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.034.
12. Panitskiy A., Bazarbaeva A., Baigazy S., Polivkina Y., Alexandrovich I., Abisheva M. Bioaccumulation of radionuclides in hoofed animals inhabiting the Semipalatinsk Test Site // PLoS ONE. – 2023. – Vol. 18(11). – DOI: 10.1371/journal.pone.0294632.
13. 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). – DOI: 10.1371/journal.pone.0308518.

14. Panitskiy A.V., Baigazinov Z., Baigazy S.A., Alexandrovich I.A., Polivkina Y.N., Salmenbayev S.E., Kozhabekova A.R., Mukhamediyarov N.Zh., Adjei-Kyereme S., Hegedűs M., Kovács T. Assessment of ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am, $^{239+240}$Pu, ^{3}H (HTO, OBT) in the fish from lakes, rivers, and nuclear shell craters of the Semipalatinsk Test Site // Scientific Reports. – 2026. – Vol. 16, 1802. – DOI: 10.1038/s41598-025-31374-7.
15. Айдарханова А.К., Ларионова Н.В., Дашук А.Л. Перераспределение радионуклидов в водных объектах техногенного происхождения Семипалатинского испытательного полигона // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – Вып. 3 (79). – С.147–155.
16. Aidarkhanova A., Larionova N., Tleukanova Zh., Mamyrbaeva A., Ermakova R., Svetacheva Yu., Aktayev M., Panitskiy A. The character of radionuclide contamination of natural lakes at the territory of the Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2022. – Vol. 255, 107041. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.107041.
17. Aidarkhanova A., Timonova L., Aidarkhanov A., Monayenko V., Iskenov A., Subbotin S., Pronin S., Belykh N. The character of Lake Kishkensor contamination in the area of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk Test Site territory // Environmental Monitoring and Assessment. – 2024. – Vol. 196, 1068. – DOI: 10.1007/s10661-024-13227-4.
18. Toktaganov T., Mamyrbayeva A., Aidarkhanov A., Aidarkhanova A., Raimkanova A. Tritium contamination and hydrological transport in the Shagan River: an isotope hydrology study // PLoS ONE. – 2025. – Vol. 20(10). – DOI: 10.1371/journal.pone.0333260.
19. Айдарханов А.О., Лукашенко С.Н., Айдарханова А.К., Анисимов В.С. Радиоактивное загрязнение вод реки Шаган (по результатам 2011-го года) // Радиация и риск. – 2014. – Том 23, № 4. – С. 35-42.
20. Aidarkhanova A., Mamyrbayeva A., Nadeyeva A., Iskenov A., Aidarkhanov A., Larionova N., Yermakova R. Determining water resource formation at the “Delegen” Nuclear Test Site using stable isotope analysis // Water. – 2026. – Vol. 18, 99. – DOI: 10.3390/w18010099.
21. Турченко Д.В., Лукашенко С.Н., Айдарханов А.О., Паницкий А.В. Оценка состояния загрязненности воздушного бассейна на испытательной площадке «Опытное поле» при проведении сельскохозяйственных работ // Вестник НЯЦ РК. – 2013. – Вып. 4 (56). – С.59-65.
22. Turchenko D.V., Aidarkhanov A.O., Aidarkhanova A.K., Aktayev M.R., Dashuk A.L., Kruglykhin A.A. Research into the current radiological state of air and monitoring observations on STS and the adjacent territory // J. Environ. Radioact. – 2023. – Vol.264, 107199. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2023.107199.
23. Гигиенические нормативы к обеспечению радиационной безопасности: утв. приказом Министра здравоохранения Республики Казахстан от 2 августа 2022 года № ҚР ДСМ-71.
24. Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Larionova N.V., Tur Y.S. Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2012. – Vol. 113. – P. 98–107. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.02.010.
25. 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. – С. 649–660. – URL: https://doi.org/10.31857/S086980312006020X.
26. Turchenko D.V., Lukashenko S.N., Aidarkhanov A.O., Lyakhova O.N. Studying of tritium content in snowpack of Degelen mountain range // J. Environ. Radioact. – 2014. – Vol. 132. – P.115–120. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.01.017.
27. Turchenko D.V., Timonova L.V., Krivitskiy P.Ye., Aidarkhanova A.K., Abisheva M.T., Aidarkhanov A.O. Identification of tritium-contaminated areas using a tritium survey on the snow cover, the case of Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2024. – Vol. 278, 107487. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107487.

СЕМЕЙ ПОЛИГОНЫНЫҢ ЖАБЫЛҒАНЫНА 35 ЖЫЛ: РАДИОАКТИВТІ ЛАСТАНУ ЖӘНЕ ҚОРШАҒАН ОРТАНЫҢ НЕГІЗГІ КОМПОНЕНТТЕРІНДЕГІ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ТАРАЛУ ЖӘНЕ ӨЗГЕРУ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫ

Э. Г. Батырбеков[1], А. О. Айдарханов[2], Н. В. Ларионова[2*], А. В. Паницкий[2], А. К. Айдарханова[2], Л. В. Тимонова[2], А. Е. Кундузбаева[2], А. М. Кабдыракова[1], Д. В. Турченко[2], С. Б. Субботин[2]

[1]Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан
[2]ҚР ҰЯО «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

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

Мақалада Семей сынақ полигоны (ССП) жабылғаннан қоршаған ортаның негізгі объектілерінің, соның ішінде топырақ және өсімдік жамылғысы, жануарлар әлемі, жер үсті сулары, атмосфералық ауа және қар жамылғысының радиоактивті ластануы туралы деректер жинақталған. ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{241}Am және $^{239+240}$Pu құрамы мен таралу ерекшеліктері, сондай-ақ оларды экожүйе құрауыштары арасында тасымалдаудың негізгі механизмдері қарастырылған. Аумақтың ластануы айқын кеңістіктік гетерогенділікпен сипатталатыны анықталды, ал радионуклидтердің ең жоғары деңгейі жердегі сынақ эпицентрлеріне, радиоактивті іздерге, ұңғымалардың

сағалық учаскелеріне, су толтырылған қазаншұңқырларға және ластанған су ағындарының әсер ету аймақтарына сабақтастырылған. Топырақта жоғарғы көкжиекте ^{137}Cs, ^{241}Am және $^{239+240}$Pu негізгі бөлігі сақталады және қатты фазамен байланысты, ал ^{90}Sr тігінен аса үлкен қозғалғыштығымен сипатталады. Өсімдіктер мен жануарлардың радионуклидтердің жинақталуы тіршілік ету ортасының ластану сипатымен, радионуклидтердің қасиеттерімен және түрлердің биологиялық ерекшеліктерімен анықталады. Жер үсті су экожүйелерінің ластануының ең жоғары деңгейі «Дегелең» алаңының техногендік су қоймаларында, түптік шөгінділерде және ағын суларда байқалды. Радионуклидтердің атмосфераға түсуі ластанған сулар мен топырақ ылғалынан ^{3}H өтуімен, сондай-ақ топырақ бөлшектерінің шаңмен тасымалдануымен байланысты. Қазіргі уақыттағы ССП ластануы негізінен жергілікті сипатта екені және жүргізілген сынақтардың түрімен және кейіннен радионуклидтердің қоршаған ортаға қайта бөлінуімен анықталатыны көрсетілген.

Түйін сөздер: *Семей сынақ полигоны (ССП), радиоактивті ластану, жасанды радионуклидтер, қоршаған орта объектілері, радионуклидтердің жылыстауы, тритий.*

35 YEARS AFTER THE CLOSURE OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE: RADIOACTIVE CONTAMINATION AND PATTERNS OF RADIONUCLIDE BEHAVIOR IN THE MAIN ENVIRONMENTAL COMPONENTS

E.G. Batyrbekov[1], A.O. Aidarkhanov[2], N.V. Larionova[2*], A.V. Panitskiy[2], A.K. Aidarkhanova[2], L.V. Timonova[2], A.Ye. Kunduzbayeva[2], A.M. Kabdyrakova[1], D.V. Turchenko[2], S.B. Subbotin[2]

[1]RSE 'National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan', Kurchatov, Kazakhstan
[2]Branch office 'Institute of Radiation Safety and Ecology' of the RSE 'NNC RK', Kurchatov, Kazakhstan

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

The article summarizes data on radioactive contamination of the main environmental components of the Semipalatinsk Test Site (STS), including soil and vegetation cover, wildlife, surface waters, atmospheric air, and snow cover. The occurrence and distribution patterns of ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{241}Am, and $^{239+240}$Pu, as well as the main mechanisms of their transfer among ecosystem components, are considered. The contamination of the territory is characterized by pronounced spatial heterogeneity, with the highest radionuclide levels associated with the epicenters of surface nuclear tests, radioactive fallout traces, areas around borehole outlets, water-filled craters, and zones affected by contaminated watercourses. In soils, most of the ^{137}Cs, ^{241}Am, and $^{239+240}$Pu remains concentrated in the upper horizons and is associated with the solid phase, whereas ^{90}Sr exhibits the greatest vertical mobility. Radionuclide accumulation in plants and animals is determined by the contamination characteristics of their habitats, radionuclide properties, and species-specific biological characteristics. The highest levels of contamination in surface aquatic ecosystems are observed in artificial water bodies, bottom sediments, and watercourses at the Degelen site. The release of radionuclides into the atmosphere is associated with the transfer of ^{3}H from contaminated waters and soil moisture, as well as with the resuspension and atmospheric transport of soil particles. The results demonstrate that present-day radioactive contamination of the STS is predominantly localized and is determined by the types of nuclear tests conducted and the subsequent redistribution of radionuclides in the environment.

Keywords: *Semipalatinsk Test Site (STS), radioactive contamination, artificial radionuclides, environmental components, radionuclide migration, tritium.*