

УДК 631.4:504.53:614.876:539.16

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ КУЛЬТУРОЙ *LACTUCA SATIVA* НА ПОЧВАХ С РАЗЛИЧНЫМ ХАРАКТЕРОМ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Пономарева Т.С., Поливкина Е.Н., Ларионова Н.В.

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

В статье показана возможность применения модельного эксперимента для получения репрезентативных значений параметров накопления техногенных радионуклидов растениеводческой продукцией на примере культуры *Lactuca sativa*. В эксперименте использованы почвы с участков Семипалатинского испытательного полигона (СИП), различающиеся по типу и характеру радиоактивного загрязнения. Получены коэффициенты накопления (Кн) техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для культуры *Lactuca sativa*. Проведен сравнительный анализ Кн радионуклидов для участков СИП с различным характером радиоактивного загрязнения.

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон (СИП), радиоактивное загрязнение, техногенные радионуклиды, *Lactuca sativa*, коэффициенты накопления (Кн), модельный эксперимент.

ВВЕДЕНИЕ

Для прогнозирования радиоактивного загрязнения растениеводческой продукции необходимо глубокое понимание механизмов миграции радионуклидов в системе «почва-растение», поскольку потребление сельскохозяйственных продуктов с повышенным содержанием радионуклидов представляет опасность, которая обусловлена внутренним облучением человека. Данные о поступлении радионуклидов из почвы в растения, имеющиеся в литературе, в большинстве случаев, не поддаются сравнению, т.к. переход радионуклидов в сельскохозяйственные культуры значительно варьирует для различных почвенно-климатических зон, а также зависит от характера радиоактивного загрязнения территории и времени взаимодействия радионуклидов с почвой.

Ранее на территории СИП проведен ряд исследований, в результате которых установлены коэффициенты накопления (Кн) искусственных радионуклидов доминантными видами растений степных и луговых экосистем для участков с различным характером радиоактивного загрязнения [1]. Также в естественных природно-климатических условиях получены базовые Кн для продукции растениеводства, необходимые при оценке возможности передачи части СИП в хозяйственное пользование [2]. В обоих случаях значения Кн характеризуются высокой вариативностью как для разных видов растений, так и в пределах одного вида, что, вероятно, обусловлено неравномерным воздействием комплекса факторов. Исходя из этого, для получения максимально репрезентативных данных о параметрах перехода радионуклидов в растения, возникла необходимость проведения серии модельных экспериментов, в которых условия произрастания будут идентичными. Поэтому целью настоящей работы стала количественная оценка параметров перехода искусственных радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ культурой *Lactuca sativa* на почвах с различным характером радиоактивного загрязнения в условиях модельного эксперимента.

1 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Объекты исследования

В качестве объекта исследования выбрана однолетняя овощная культура салат (*Lactuca sativa*), которая часто используется в качестве биоиндикатора вследствие своей высокой биологической продуктивности [3, 4]. В модельном эксперименте *Lactuca sativa* оказался удобен благодаря быстрому прорастанию семян, хорошей всхожести, короткому вегетационному периоду и возможности произрастания большого числа растений на сравнительно небольшом объеме почвы, что немаловажно в лабораторных условиях (рисунок 1).



Рисунок 1. Экспериментальная культура *Lactuca sativa*

В эксперименте использованы почвы луговых и степных экосистем СИП контрастные по физико-химическим свойствам, а также имеющие различный характер радиоактивного загрязнения:

1) почвы с припортальных участков штолен № 176 и 177 испытательной площадки «Дегелен», характеризующиеся высоким уровнем радиоактивного загрязнения вследствие выноса на земную поверхность радионуклидов с водотоками;

2) почвы с эпицентра наземного ядерного испытания (техническая площадка П-2) площадки «Опытное поле», характеризующиеся высоким содержанием трансурановых радионуклидов $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am .

Луговые почвы с участков штолен № 176 и 177 достаточно гумусированы, хорошо промыты от легкорастворимых солей и карбонатов, pH нейтральная. В почвенно-поглощающем комплексе преобладает катион Ca^{2+} . По механическому составу почвы водотока штольни № 176, в основном, легкосуглинистые и супесчаные, реже среднесуглинистые, тогда как на участке водотока штольни № 177 среди рыхлых отложений преобладают средние и тяжелые суглинки. В луговых почвах экосистемы водотока штольни № 176 содержание илстых частиц находится в пределах 0,1–11%, а в почвах экосистемы штольни № 177, подвергающихся меньшему дренированию, содержание ила достигает 19–31% [5].

Исследуемые почвы с площадки «Опытное поле» относятся к светло-каштановым, суглинистым. Почвы карбонатные, вскипание отмечается как с поверхности, так и с нижней части гумусового горизонта, с поверхности слабощелочные или щелочные с pH от 7,0 до 8,4. Содержание гумуса находится, в основном, в пределах 2–3%, но в некоторых случаях значения повышаются до 5%. В поверхностных горизонтах сумма легкорастворимых солей менее 0,1%, что позволяет их отнести к незасоленным, но с глубиной засоление увеличивается, и сумма солей достигает 0,5%. Среди поглощенных оснований наблюдается абсолютное преобладание Ca^{2+} над Mg^{2+} [5].

1.2 Формы нахождения радионуклидов в почвах

Характер поведения радионуклида ^{137}Cs в исследуемых почвах различен. Наибольшая биологическая устойчивость радионуклида ^{137}Cs отмечена в почвах с площадки «Опытное поле», где содержание обменных форм составляет в среднем 97,9%. В почвах экосистем в районе штолен № 176 и 177 содержание недоступных форм меньше, порядка 86–91%. При этом отмечаются повышенные значения обменных (до 6,8%) и органических форм (4,0–4,5%) [5].

В почвах с площадки «Опытное поле» радионуклид ^{241}Am характеризуется наименьшей биологической доступностью. Содержание недоступных растениям форм (фиксированной и прочносвязанной) достигает 81,9%. Максимальной подвижностью радионуклид ^{241}Am отличается в луговых почвах экосистемы в районе штольни № 177, где содержание легко-

доступных форм повышено до 5%, а содержание подвижных форм достигает 76%. Прочносвязанная форма радионуклида составляет только 19% от его суммарного содержания, что, возможно, связано с режимом увлажнения почвы, который в наибольшей степени влияет на миграционные свойства радионуклида на данном участке [5].

Содержание форм нахождения радионуклида ^{90}Sr в луговых почвах штолен принципиально не отличается. В среднем 53% от суммарного содержания радионуклида ^{90}Sr находится в легкодоступной форме (водорастворимой и обменной), 33–35% – в подвижной форме, представляющей потенциальный резерв для растений, и только 10–12% от суммарного содержания всех форм радионуклида приходится на долю недоступных растениям форм. В почве с площадки «Опытное поле» радионуклид ^{90}Sr , в основном, находится в недоступной форме, составляя 95,4% от суммарного содержания всех форм. Значение содержания подвижной формы в среднем достигает 3,1%, содержание водорастворимых, обменных и органических форм в большинстве случаев менее предела обнаружения используемого аппаратно-методического обеспечения [5].

Наибольшей схожестью поведения в исследуемых почвах обладает радионуклид $^{239+240}\text{Pu}$. Соотношение форм нахождения данного радионуклида в почвах экосистем в районе штольни № 177 и площадки «Опытное поле» показывают, что основное содержание данного радионуклида находится в недоступных растениям формах (фиксированной и прочносвязанной). Максимальное содержание недоступных форм отмечается в почвах площадки «Опытное поле», где достигает, в среднем, 98,7%. Содержание недоступных форм $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах площадки «Дегелен» находится в пределах 93–95%, при этом отмечается повышение подвижных форм радионуклида. В почвах района штольни № 177 содержание легкодоступных форм достигает 5%, а органических – 2% [5].

1.3 Методика проведения эксперимента

Модельный вегетационный эксперимент по исследованию параметров перехода искусственных радионуклидов в растениеводческую продукцию проведен на базе экспериментальной оранжереи Института радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК.

Заготовка почвенных образцов на всех площадках производилась на участках с наиболее высокими уровнями радиоактивного загрязнения. Отбор проб почвы проводился на глубину корнеобитаемого слоя – 0–25 см. С целью исключения неоднородности морфогенетических свойств почв и неравномерности распределения радионуклидов, перед закладкой опыта почвы тщательно гомогенизировались, затем просеивались через сито.

Почвенные образцы помещались в вегетационные сосуды объемом 12 л. Для чистоты эксперимента в каждом варианте заложено по 3 повторности. Посев

Lactuca sativa в вегетационные сосуды производился сухими семенами. Полив экспериментальных растений проводился в утренние часы дистиллированной водой по предварительно рассчитанной норме, поддерживая оптимальную влажность почвы на уровне 60% от полной влагоемкости [6]. Помещения оранжереи оснащены системой фитоосвещения и терморегулирования, которые позволили поддерживать благоприятные и сравнительно одинаковые для растений условия произрастания. В ходе эксперимента производился ежедневный контроль основных абиотических факторов посредством регистрирующих приборов. Удобрения не вносились, поскольку необходимо было получить параметры накопления радионуклидов без влияния данного фактора. Вегетационный период для *Lactuca sativa* составил 60 дней. Для учета биологической продуктивности в конце вегетации рандомизированно отбиралось 20–25 растений для каждого варианта.

1.4 Подготовка проб растений и почв для радионуклидного анализа

Растительные пробы промывались и ополаскивались 2–3 раза дистиллированной водой, затем сушились в сушильном шкафу при температуре 80–100 °С до постоянной массы, далее подвергались грубому измельчению до длины 1–3 см при помощи секатора. Более тонкое измельчение проводилось на лабораторной мельнице. Измельчённая проба обугливалась в муфельной печи при начальной температуре 200–250 °С, с постепенно повышающейся температурой до 350–400 °С. Обугленные пробы растений взвешивались и передавались на гамма-спектрометрическое измерение. Навеска для радиохимического анализа отбиралась из навески, прошедшей гамма-спектрометрическое измерение, затем проводилось дополнительное озоление при температуре 550 °С. Далее навески передавали на радиохимическое выделение с последующим бета- и альфа-спектрометрическим измерением.

Пробы почвы высушивались до воздушно-сухого состояния в сушильных шкафах при температуре 60–70 °С. После удаления крупных камней и включений (корней растений) взвешивались на технических весах. Далее весь объем пробы тщательно перемешивался, порционно с помощью пестика истирался в фарфоровой ступке и просеивался через сито с диаметром отверстий 1 мм. Затем методом квартования отбирались необходимые навески почвы для определения удельной активности ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$.

1.5 Измерение удельной активности ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$

Измерение удельной активности радионуклидов в пробах почвы и растений осуществляли в соответствии со стандартизированными методическими указаниями. Определение удельной активности гамма-излучающих радионуклидов проводилось с использо-

ванием гамма-спектрометра Canberra GX-2020 [7]. Радионуклид ^{90}Sr определяли радиохимическим выделением с последующим измерением на бета-спектрометре TRI-CARB для растительных проб и на бета-спектрометре «Прогресс» для проб почвы. Радионуклид $^{239+240}\text{Pu}$ – радиохимическим выделением с последующим измерением на альфа-спектрометре Canberra, мод.7401 [8]. Предел обнаружения для радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am составил – 0,5 Бк/кг (сухого вещества для проб растений и почвы), ^{90}Sr – 1–20 Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,5 Бк/кг. Погрешность измерений для ^{137}Cs и ^{241}Am не превышала 15–20%, ^{90}Sr – 15%, $^{239+240}\text{Pu}$ – 30%.

Для оценки поступления радионуклидов из почвы в растения использовался коэффициент накопления (Кн) – отношение содержания радионуклида в единице массы растений и почвы соответственно [8].

2 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1 Изменение абиотических и биотических факторов в ходе модельного эксперимента

Изменение среднесуточных показателей температуры и влажности воздуха в помещении оранжереи на момент проведения эксперимента показано на рисунке 2.

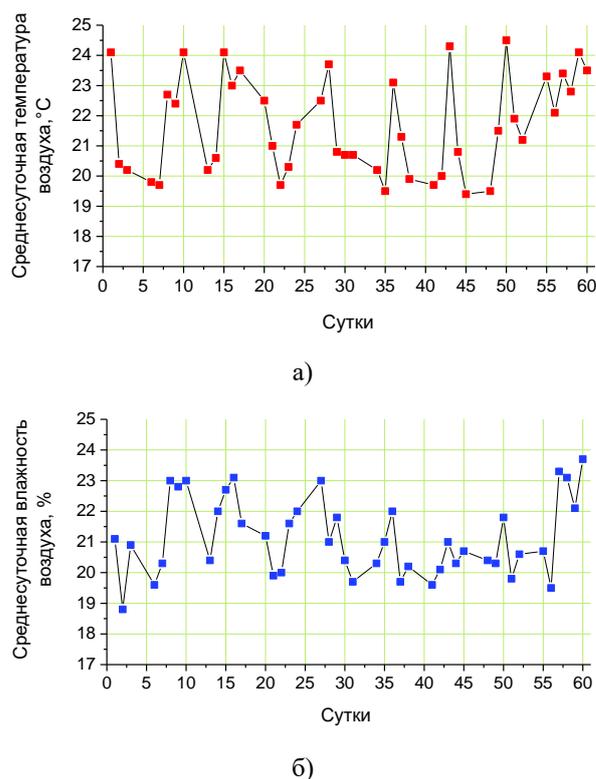


Рисунок 2. Температурный (а) и влажностный (б) режим в период проведения эксперимента

Из рисунка 2 видно, что основные абиотические факторы, имеющие большое значение для роста и развития растений, во время проведения эксперимента поддерживали на относительно одинаковом уровне, что исключало их возможное влияние на процесс

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ КУЛЬТУРОЙ *LACTUCA SATIVA* НА ПОЧВАХ С РАЗЛИЧНЫМ ХАРАКТЕРОМ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

накопления радионуклидов растениями. Так, диапазон варьирования температуры воздуха в помещении оранжереи составил 5 °С, влажности воздуха – 5%.

В качестве биотических факторов использовали основные показатели продуктивности экспериментальных растений (таблица 1).

Таблица 1. Показатели биологической продуктивности Lactuca sativa

Биологическая продуктивность	Варианты		
	шт. № 176	шт. № 177	П-2
Всхожесть семян, %	95 ± 5	90 ± 5	75 ± 5
Высота <i>Lactuca sativa</i> , см	30 ± 0,5	28 ± 0,5	20 ± 0,5
Средняя биомасса растений в вегетационном сосуде, г	26 ± 1,7	18 ± 4,5	8 ± 0,5

Согласно полученным данным, максимальная всхожесть и биомасса *Lactuca sativa* отмечена на луговых почвах штолен, что обусловлено их высоким плодородием, а минимальная – на почве с площадки П-2 (вследствие низкой биологической продуктивности данной почвы получена только одна растительная проба).

2.2 Накопление техногенных радионуклидов ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am, ⁹⁰Sr и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu культурой *Lactuca sativa* на почвах с различным характером радиоактивного загрязнения

Во всех растительных и почвенных пробах определена удельная активность техногенных радионуклидов ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am, ⁹⁰Sr и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu (таблица 2).

Согласно данным, представленным в таблице 2, удельная активность радионуклида ¹³⁷Cs во всех почвенных образцах имеет высокие значения (n×10³ Бк/кг). Однако, в пробах *Lactuca sativa*, полученных на почве с водотока штольни № 176, значения удельной активности радионуклида ¹³⁷Cs на порядок выше по сравнению с результатами, полученными на почве с водотока штольни № 177, и на 2 по-

рядка – по сравнению с результатами, полученными на почве с площадки П-2. Количественные значения для радионуклида ²⁴¹Am установлены только в пробах *Lactuca sativa*, выращенных на почве с площадки П-2, а для образцов с остальных почв удельная активность находится вне пределов обнаружения используемого аппаратно-методического обеспечения. Для радионуклида ⁹⁰Sr высокие концентрации характерны как в почве, так и в *Lactuca sativa*. Максимальные значения удельной активности ⁹⁰Sr (71 000 Бк/кг) в экспериментальных растениях достигают на почве шт. № 176. Количественные значения удельной активности радионуклида ²³⁹⁺²⁴⁰Pu определены только для растений на почве с площадки П-2, в остальных вариантах эксперимента получены в основном оценочные значения (искл. шт. № 177 (повторность II)).

На основании значений удельной активности радионуклидов в экспериментальных растениях и почвенных модельных образцах рассчитаны Кн (таблица 3).

Как видно из таблицы 3, значения Кн ¹³⁷Cs для *Lactuca sativa*, выращенного на почве штольни № 176, превышают аналогичные показатели для почвы штольни № 177 в 5 раз, а для почвы с площадки П-2 – в 75 раз. Для радионуклида ⁹⁰Sr значения Кн, полученные на почве штольни № 176, выше, в среднем, в 184 и 30 раз по сравнению с результатами, полученными на почве штольни № 177 и площадки П-2, соответственно. Значение Кн ²³⁹⁺²⁴⁰Pu для растений, выращенных на почвенных образцах с площадки П-2, превышает аналогичный показатель для почвы штольни № 177 в 1,5 раза.

В целом, значения Кн ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr для культуры *Lactuca sativa*, выращенной на почве с водотоков штолен, можно считать достаточно однородными по сравнению с результатами натуральных исследований, диапазон варьирования для которых составил по ¹³⁷Cs – 2 порядка и ⁹⁰Sr – 4 порядка [2].

Таблица 2. Удельная активность радионуклидов в Lactuca sativa и модельных почвенных образцах

Вариант эксперимента	Вид пробы	Повторность	Удельная активность радионуклидов, Бк/кг			
			¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
шт. № 176	растение	I	420 ± 40	< 16	42000 ± 6000	<0,4
		II	700 ± 70	< 18	42000 ± 6000	<0,4
		III	700 ± 70	< 10	40000 ± 6000	<0,7
		IV	320 ± 60	< 1,8	71000 ± 11000	<0,7
		V	630 ± 130	< 2,6	–	–
	почва	I	8100 ± 1600	43 ± 9	7800 ± 1100	700 ± 30
шт. № 177	растение	I	15 ± 2	< 13	2600 ± 400	<0,24
		II	35 ± 4	< 5	1700 ± 300	1,6 ± 0,5
		III	40 ± 4	< 6	2200 ± 300	<0,5
		IV	70 ± 14	< 3	3600 ± 500	<0,7
	почва	I	3000 ± 600	720 ± 140	75000 ± 8000	20000 ± 1000
П-2	растение	I	2,4 ± 0,5	2,1 ± 0,4	750 ± 110	1,9 ± 0,8
	почва	I	2600 ± 500	10000 ± 2000	3600 ± 600	16000 ± 1000

Примечание: «–» – данные отсутствуют

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ КУЛЬТУРОЙ *LACTUCA SATIVA* НА ПОЧВАХ С РАЗЛИЧНЫМ ХАРАКТЕРОМ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Таблица 3. Вариационно-статистическая характеристика Кн ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ *Lactuca sativa*

Вариант эксперимента	Статистические показатели Кн					
	число случаев n	min-max	ср. геом. GM	станд. откл. GSD	ср. арифм. AM	станд. откл. SD
^{137}Cs						
шт. № 176	5	0,039 - 0,086	0,065	0,019	0,068	0,021
шт. № 177	4	0,005 - 0,023	0,012	0,006	0,013	0,007
П-2	1	0,0009	–	–	–	–
^{241}Am						
П-2	1	0,0002	–	–	–	–
^{90}Sr						
шт. № 176	4	5,13 - 9,10	6,063	1,650	6,25	1,905
шт. № 177	4	0,023 - 0,048	0,032	0,009	0,034	0,011
П-2	1	0,21	–	–	–	–
$^{239+240}\text{Pu}$						
шт. № 177	1	0,00008	–	–	–	–
П-2	1	0,00012	–	–	–	–

Таблица 4. Значения Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$, физико-химические свойства почв и формы нахождения радионуклидов в них [5]

Вариант эксперимента	Среднее значение Кн			Содержание обменных форм в почве, % от суммарного содержания			Химический и механический состав почв		
	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$	гумус, %	$\sum \text{K}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$, мг-экв / 100 г	физ. глина, %
шт. № 176	0,068	6,25	–	6,8	53,4	–	14	27	23
шт. № 177	0,013	0,034	0,000038	< 0,4	53,0	1,0	16	41	42
П-2	0,0009	0,21	0,00012	< 0,7	< 1,4	< 0,01	2,5	14,7	27,5

Для количественной оценки разницы в накоплении радионуклидов *Lactuca sativa* для каждого варианта эксперимента рассчитаны отношения Кн ^{90}Sr / Кн ^{137}Cs , Кн ^{137}Cs / Кн $^{239+240}\text{Pu}$, Кн $^{239+240}\text{Pu}$ / Кн ^{241}Am .

Средние значения данных отношений составили:

для *Lactuca sativa* с штольни № 176:

– Кн ^{90}Sr / Кн ^{137}Cs ~ 92.

для *Lactuca sativa* с штольни № 177:

– Кн ^{90}Sr / Кн ^{137}Cs ~ 3;

– Кн ^{137}Cs / Кн $^{239+240}\text{Pu}$ ~ 163.

для *Lactuca sativa* с площадки П-2:

– Кн ^{90}Sr / Кн ^{137}Cs ~ 233;

– Кн ^{137}Cs / Кн $^{239+240}\text{Pu}$ ~ 7,5;

– Кн $^{239+240}\text{Pu}$ / Кн ^{241}Am ~ 0,6.

Согласно рассчитанным значениям отношений между Кн радионуклидов для каждого варианта эксперимента видно, что максимальное накопление в растениях характерно для ^{90}Sr .

Различия в значениях Кн радионуклидов для вариантов почвенных образцов обусловлены как характером радиоактивного загрязнения, так и их физико-химическими свойствами, определяющими переход радиоизотопов в системе «почва-растение». В целом, на подвижность радионуклидов в почве и их доступность растениям влияют такие показатели, как влажность почвы, ее гранулометрический и минералогический состав, содержание органического вещества и обменных K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , емкость катионного обме-

на, pH, а также формы нахождения в ней радионуклидов [9]. При этом, переход радионуклидов из почвы в растения является результатом физиологического процесса, связанного с поглощением радионуклидов корневой системой непосредственно из почвенного раствора [10]. Так, биологически доступными для растений являются водорастворимая и обменная формы. В таблице 4 представлены экспериментальные значения Кн для *Lactuca sativa*, а также данные о физико-химических свойствах почвенных образцов и содержании в них обменных форм радионуклидов. Значения содержания водорастворимых форм радионуклидов во всех модельных почвенных образцах оказались меньше предела обнаружения используемого аппаратно-методического обеспечения [5].

Исходя из представленных данных, можно предположить, что минимальное накопление радионуклидов культурой *Lactuca sativa* на почве с площадки П-2 обусловлено отсутствием их обменных форм в почве (искл. $^{239+240}\text{Pu}$). В свою очередь, наиболее высокие Кн ^{137}Cs на почве со штольни № 176 наоборот напрямую могут быть связаны с наличием его биологически доступных форм. Также на накопление радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ культурой *Lactuca sativa* определенное влияние могли оказать и отдельные физико-химические свойства почв. Например, повышенное содержание в почве со штольни № 177 гумуса, физической глины и обменных катионов спо-

собно снизить подвижность радионуклидов, что подтверждается полученными Кн. При этом предполагаемая зависимость, полученная в результате модельного эксперимента, хорошо согласуется с данными, полученными ранее в натуральных условиях для растений естественных экосистем водотоков штолен № 176 и 177 [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного модельного эксперимента на примере культуры *Lactuca sativa* получены количественные значения Кн радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для почв участков СИП с различным характером радиоактивного загрязнения. При этом значения Кн ^{137}Cs и ^{90}Sr на почве с водотоков штолен можно считать достаточно однородными по сравнению с результатами натуральных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. – № 186. – P. 163–170.
2. Kozhakhonov T. E., Lukashenko S. N., Larionova N. V. Accumulation of artificial radionuclides in agricultural plants in the area used for surface nuclear tests // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – Vol. 137. – P. 217–226.
3. Опекунова М. Г. Биоиндикация загрязнений: учеб. пособие. – 2-е изд. – СПб.: СПб ГУ, 2016. – 182 с.
4. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / пер. с нем.; под. ред. Р. Шуберта. – М.: Мир, 1988. – С. 212–213.
5. Кундузбаева А. Е., Кабдыракова А. М., Лукашенко С. Н., Магашева Р. Ю. Сравнительная оценка форм нахождения радионуклидов в почвах некоторых участков территории СИП // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана: сб. тр. Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2010 г. – Павлодар: Дом печати, 2011. – Вып. 3. – С. 107–113.
6. Методы исследований в агрохимии: краткий курс лекций для аспирантов направления подготовки / сост.: Е.А. Нарушева // Сельское хозяйство. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2014. – С. 16–23.
7. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре МИ 2143-91: МИ 5.06.001.98 РК. – Алматы, 1998. – 18 с.
8. Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239-240), стронция-90 в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях). – Алматы, 2010. – 25 с.
9. Сельскохозяйственная радиоэкология / под. ред. акад. ВАСХНИЛ Р. М. Алексахина и акад. ВАСХНИЛ Н. А. Корнеева. – М.: 1991. – С. 49–66.
10. Санжарова Н. И., Сысоева А. А., Исамов Н. Н., Алексахин Р. М., Кузнецов В. К., Жигарева Т. Л. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению // Российский химический журнал. – 2005. – № XLIX. – С. 26–29.

ТӘЖІРИБЕЛІК ҮЛГІ ЖАҒДАЙЫНДА РАДИОАКТИВТІ ЛАСТАНУДЫҢ ТҮРЛІ СИПАТЫМЕН ТОПЫРАҚТАҒЫ *LACTUCA SATIVA* ДАҚЫЛДАРЫНДА РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ЖИНАҚТАЛУЫ

Т.С. Пономарева, Е.Н. Поливкина, Н.В. Ларионова

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

Бұл мақалада, *Lactuca sativa* дақылдың үлгісінде өсімдік шаруашылығы өнімдеріндегі техногенді радионуклидтердің жинақталу параметрлерінің репрезентативтік мәнін алудың тәжірибелік үлгісін қолдану мүмкіндігі көрсетілді. Тәжірибе барысында радиоактивті ластану типі мен сипаты бойына ерекшеленетін Семей сынақ полигоны (ССП) телімдерінің топырағы пайдаланылды. *Lactuca sativa* дақылы үшін ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr және $^{239+240}\text{Pu}$ техногенді радионуклидтерінің жинақталу коэффициенттері (ЖК) алынды. Радиоактивті ластануы сипаты ССП телімдері үшін радионуклидтердің ЖК салыстырмалы талдамасы жасалды.

Кілт сөздер: Семей сынақ полигоны (СИП), радиоактивті ластану, техногенді радионуклидтер, *Lactuca sativa*, жинақталу коэффициенттері (ЖК), тәжірибелік үлгі.

Также отмечены определенные различия в накоплении ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$, обусловленные как характером радиоактивного загрязнения, так и физико-химическими свойствами почв, определяющими переход радионуклидов в системе «почва-растение». В целом, на примере культуры *Lactuca sativa* показана возможность применения модельного эксперимента для получения репрезентативных значений Кн техногенных радионуклидов для растениеводческой продукции.

Работа выполнена в рамках научно-технической программы 036 «Развитие атомных и энергетических проектов», подпрограммы 105 «Прикладные научные исследования технологического характера в сфере атомной энергетики», мероприятия «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

ACCUMULATION OF RADIONUCLIDES BY *LACTUCA SATIVA* CULTURE IN SOILS OF DIFFERENT
NATURE OF RADIOACTIVE CONTAMINATION IN MODEL EXPERIMENT CONDITIONS

T.S. Ponomaryova, Ye.N. Polivkina, N.V. Larionova

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

The article shows the possibility of applying a simulation experiment to obtain representative values of the accumulation of artificial radionuclides by agricultural products the case of *Lactuca sativa* culture. The experiment used soils from areas of Semipalatinsk Test Site (STS) different in type and nature of radioactive contamination. Transfer factor (Tf) were derived for artificial ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr and $^{239+240}\text{Pu}$ for *Lactuca sativa*. A comparative analysis was carried out for Tf of radionuclides in STS areas with a different nature of radioactive contamination.

Keywords: Semipalatinsk Test Site (STS), radioactive contamination, man-made radionuclides, *Lactuca sativa*, transfer factor (Tf), model experiment.