

АГРОХИМИЯ И ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

УДК 546.798+631.427.3

НАКОПЛЕНИЕ ПЛУТОНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ НА РАЗНЫХ ПОЧВАХ

© 2023 г. М. А. Эдомская^а, *, С. Н. Лукашенко^а, А. А. Шупик^а, С. Г. Шаповалов^а

^аВсероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,
Киевское шоссе, 109 км, Обнинск, 249032 Россия

*e-mail: maisher@mail.ru

Поступила в редакцию 18.11.2022 г.

После доработки 30.01.2023 г.

Принята к публикации 01.02.2023 г.

Высокая вариабельность коэффициентов накопления плутония, представленных в литературных источниках, делает актуальным исследование по определению механизмов, влияющих на миграционную способность и доступность его для растительности. Изменчивость коэффициентов переноса объясняется различными свойствами почв, поскольку окислительно-восстановительный потенциал и кислотность почвы могут существенно влиять на подвижность плутония. В вегетационном опыте изучена миграция плутония в системе почва–сельскохозяйственное растение для разных почв. Анализ содержания $^{239+240}\text{Pu}$ проводили методом альфа-спектрометрии с предварительным радиохимическим выделением. Определены показатели миграции Pu с использованием в качестве тест-культур ячменя (*Hordeum*) и бобов (*Fabaceae*). Полученные в ходе вегетационных опытов коэффициенты накопления плутония находятся в диапазоне 3.1×10^{-4} – 6.8×10^{-3} при среднем значении 3.8×10^{-3} – для надземной части ячменя; 9.2×10^{-3} – 7.6×10^{-2} при среднем значении 3.8×10^{-2} – для корневой системы ячменя. Для надземной и корневой частей бобов диапазон коэффициента накопления составил 1.5×10^{-3} – 5.7×10^{-3} при среднем значении 3.7×10^{-3} и 5.8×10^{-2} – 6.5×10^{-2} при среднем значении 6.2×10^{-2} соответственно. Определено, что характер распределения плутония по вегетативным органам рассматриваемых культур неоднородный. В среднем коэффициент накопления плутония для надземной части растений в 40 раз меньше, чем для корневой. Установлено, что накопление плутония надземной частью растений, произрастающих на разных типах почв, неодинаково для отдельных видов/органов сельскохозяйственных растений. Для надземной части рассматриваемых сельскохозяйственных культур коэффициенты накопления различаются до нескольких порядков. В целом накопление плутония растительностью, произрастающей на разных типах почв, располагается в следующем ряду: дерново-подзолистая (Retisol) и серая лесная (Phaeozem) > болотная торфяная низинная (Histosol) ≧ чернозем типичный (Chernozem). Наименьшее накопление плутония растительностью наблюдается в почвах с большим содержанием органического вещества. Для корневой части зависимость коэффициентов накопления плутония от свойств почв неоднозначна.

Ключевые слова: Pu, коэффициент накопления, система почва–растение, ячмень, бобы

DOI: 10.31857/S0032180X22601463, **EDN:** FQBMUB

ВВЕДЕНИЕ

Оценки дозовых нагрузок, рассчитанные для территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварий, сбросов и выбросов предприятий ядерного энергетического цикла, демонстрируют, что в большинстве радиологических ситуаций вклад внутреннего облучения населения вследствие потребления продуктов питания, содержащих радионуклиды, в суммарную дозу сравним, а иногда даже выше вклада внешнего облучения [2].

В мировой практике достаточно исследований по изучению миграции искусственных радионуклидов в системе почва–растение. В основном, ис-

следования посвящены переходам таких традиционных изотопов, как ^{137}Cs и ^{90}Sr , и гораздо меньшее количество исследованы переходы изотопов плутония.

Результаты мировых исследований миграции плутония в системе почва–растение обобщены группой экспертов МАГАТЭ и представлены в специальных публикациях [7–9]. Представленные в данных публикациях коэффициенты накопления (*K_n*) плутония отличаются высокой вариативностью значений до 4 порядков. Например, диапазон *K_n* для зерна злаковых культур составляет 2.0×10^{-7} – 1.1×10^{-3} , для кустарников – 6.4×10^{-5} – 6.6×10^{-1} . Возможно, это связано с тем,

что K_n представлены для объединенных групп различных видов растений, а также получены в различных почвенно-климатических условиях.

Значительный объем исследований накопления изотопов плутония в дикорастущей растительности произведен на территории 30 км зоны отчуждения и Полесского радиоэкологического заповедника [4–6, 13, 14]. Например, K_n плутония для травянистой растительности территории, подверженной чернобыльским выпадениям, находится на уровне $n \times 10^{-2}$. Так, для стеблей злаковых культур диапазон K_n составляет 3.0×10^{-3} – 4.1×10^{-1} , для осоки – 3.0×10^{-3} – 1.4×10^{-1} .

Обширные исследования были проведены по изучению накопления изотопов плутония дикорастущими и сельскохозяйственными растениями на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) [2, 11, 12]. Исследования проводили в естественных условиях, на участках с высоким содержанием плутония (до $n \times 10^4$ Бк/кг), на одном типе почвы в одной климатической зоне, что позволяет предположить, что систематическая погрешность при проведении данных исследований сведена к минимуму. Экспериментальные данные по коэффициентам накопления плутония растительностью, полученные при исследованиях, проведенных на территории СИП, выше обобщенных данных МАГАТЭ на 1–2 порядка для некоторых сельскохозяйственных культур. Например, среднее значение K_n надземной части моркови по данным МАГАТЭ составляет 2.2×10^{-3} , в то время как для территории СИП – 6.9×10^{-2} , для корнеплода моркови K_n составляет 3.9×10^{-4} и 3.9×10^{-2} соответственно. На 3 порядка выше значение K_n плодов баклажана, которые составили 5.5×10^{-2} для территории СИП и 6.2×10^{-5} по данным МАГАТЭ (данные представлены как плоды нелистных овощей). На 2 порядка отличаются и K_n для листовых овощей. Так, средний K_n составляет 8.3×10^{-5} , в то время как для листовой части капусты, выращенной на территории СИП, K_n составляет 1.2×10^{-3} .

Такая высокая вариабельность коэффициентов накопления плутония делает актуальным исследование по определению механизмов, влияющих на миграционную способность и доступность его для растительности.

Изменчивость коэффициентов переноса объясняется, различными свойствами почв, поскольку окислительно-восстановительный потенциал и кислотность почвы могут существенно влиять на подвижность плутония [8]. Например, как показано в публикации МАГАТЭ, наибольшие коэффициенты переноса для цезия характерны для торфяных или легких песчаных почв. Наименьшие коэффициенты переноса стронция характерны для органических почв, таких как

торф, и для почв с высоким содержанием кальция. Перенос как плутония, так и америция ниже в суглинистых, органических и известковых почвах [7]. Однако обзорные публикации, как правило, объединяют ряд исследований, проведенных в разное время при разных климатических условиях, что вносит некоторую неопределенность в результат.

Цель настоящей работы – исследовать зависимость коэффициента накопления плутония в системе почва–сельскохозяйственное растение для разных типов почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование зависимости коэффициентов накопления $^{239+240}\text{Pu}$ в системе почва–сельскохозяйственное растение для разных типов почв проводили для тест-культур: бобы (*Fabaceae*), сорт “Янтарный” и ячмень (*Hordeum*), сорт “Заерский-85”. Культуры выращивали на образцах пахотных горизонтов (20 см) 4 типов почв: болотная торфяная низинная (Histosol) Брянской области, чернозем типичный (Chernozem) Курской области, дерново-подзолистая (Retisol) Калужской области и серая лесная (Phaeozem) Липецкой области.

Подготовка почвы. Исходные физические и химические показатели почв представлены в табл. 1. Почвы высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито с диаметром отверстий 3 мм. При тщательном перемешивании вносили водный раствор ^{239}Pu , приготовленный методом разбавления стандартного образца, представляющего азотнокислый раствор плутония, удельной активностью 2.24×10^4 Бк/мл. Общая концентрация плутония в почве составляла 425 Бк/кг для чернозема типичного и болотной торфяной низинной почв, 375 Бк/кг для дерново-подзолистой почвы и 490 Бк/кг для серой лесной почвы.

Подготовленные почвы инкубировали с поддержанием 60% влажности от полной влагоемкости в течение 45 сут при периодическом перемешивании.

После инкубирования почвы измеряли концентрацию $^{239+240}\text{Pu}$. Результаты анализа почвы представлены в табл. 2. Анализ образцов почвы показывает, что расхождение между расчетным и измеренным содержанием ^{239}Pu в почве не превышает 10%, при среднем 3.7%.

Проведение вегетационного опыта. Для выращивания культур ячменя и бобов использовали сосуды диаметром 22 см и высотой 20 см. Навивку сосудов осуществляли согласно стандартным методикам проведения вегетационных опытов в агрохимии [1]. На дно сосуда помещали дренаж в виде пластиковых гранул диаметром 5 мм, поверх

Таблица 1. Основные характеристики почв ($\pm SD$, $n = 3$)

Показатель	Тип почвы			
	болотная торфяная низинная	чернозем типичный	дерново-подзолистая	серая лесная
pH_{H_2O}	4.7 ± 0.01	6.2 ± 0.02	6.0 ± 0.01	–
pH_{KCl}	4.4 ± 0.01	5.5 ± 0.01	5.0 ± 0.01	5.7 ± 0.01
Органический углерод, %	21 ± 0.9	4.3 ± 0.08	1.0 ± 0.01	2.2 ± 0.19
N_T , смоль(экв)/кг	44 ± 1.9	3.2 ± 0.01	1.9 ± 0.02	–
Сумма обменных оснований, смоль(экв)/кг	110 ± 1.0	34 ± 0.2	5.3 ± 0.1	–
Обменный K_2O , мг/кг (по Масловой)	370 ± 4.0	120 ± 2.0	78 ± 1.3	93 ± 3.3
Подвижный P_2O_5 , мг/кг (по Кирсанову)	28 ± 0.6	120 ± 1.0	130 ± 2.0	200 ± 23

Таблица 2. Результаты контрольного анализа содержания ^{239}Pu в подготовленных почвах ($\pm \Delta$)

Тип почвы	Концентрация $^{239+240}Pu$, Бк/кг		Разница, %
	расчетное количество	полученное в ходе анализа	
Болотная торфяная низинная	425	424 ± 42	<1
		410 ± 62	4
		Среднее 417	Среднее 2
Чернозем типичный	425	423 ± 63	<1
		470 ± 71	10
		Среднее 447	Среднее 5
Дерново-подзолистая	375	343 ± 48	8
		386 ± 54	3
		368 ± 52	2
		Среднее 366	Среднее 2
Серая лесная	490	481 ± 72	2
		500 ± 75	2
		Среднее 491	Среднее <1

дренажа укладывали инертный водопроницаемый материал и ставили дренажную трубку, сверху насыпали сухую почву массой ~3.5 кг.

Каждый сосуд доводили по весу до 60% от полной влагоемкости почвы. Для достижения равномерного увлажнения почвы, подготовленные сосуды выдерживали 10 дней с ежедневным доливом воды на весах до соответствующей массы. Чтобы уменьшить испарение влаги, предотвратить образование почвенной корочки и уменьшить нагрев почвы солнцем, сверху насыпали пластиковые гранулы диаметром 5 мм светло-бежевого цвета.

Культуры высевали пророщенными семенами на глубину 0.5 см. Вегетационные опыты проводили в вегетационном домике, защищенном от внешних осадков. Повторность опыта 2-кратная.

Условия проведения вегетационного опыта контролировали с помощью регистратора температуры и влажности Elitech GSP-6 с автоматической записью каждый час. Диапазон температур вегетационного периода составил от +7 до +33°C, при среднем значении +16°C. Влажность воздуха находилась в пределах 12–96%, при средней 65%. Вегетационный период составлял 38 дней.

Пробоподготовка. По окончании вегетационного периода надземную часть бобов и ячменя срезали ножницами на расстоянии 5 мм от поверхности почвы. Отобранные образцы растений сразу после отбора промывали водопроводной водой и ополаскивали дистиллированной водой.

Почву с корневой системой аккуратно перенесли на сито диаметром 3 мм, почву отсеивали. Оставшиеся частицы почвы отмучивали в водо-

проводной воде до полного осветления воды и отсутствия видимых частиц минеральной составляющей почвы. Далее корни отмывали под проточной водой при постоянном потирании поверхности пальцами рук с визуальным контролем до полного отсутствия частиц почвы в воде. Отмытые корни опускали в емкость с дистиллированной водой. Воду с корнями перемешивали в течение ~1 мин, визуально контролируя отсутствие почвенных частиц на дне емкости. При обнаружении почвенных частиц проводили дополнительную отмывку корней.

Образцы надземной и корневой частей рассматриваемых сельскохозяйственных культур просушивали в сушильном шкафу при температуре 75°C до постоянного веса в течение 10–20 ч.

Анализ проб. Анализ содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в образцах проводили методом, описанном в работе [10]. Сухие образцы растений помещали в керамические тигли, вносили ^{242}Pu в качестве трассера и проводили озоление в муфельной печи при температуре 500°C в течение 7–8 ч. Озоленные образцы количественно переносили в тefлоновый стакан 50 см³ концентрированной HNO_3 . Стакан накрывали фторопластовой крышечкой и выпаривали на плитке до влажных солей. Далее последовательно вносили 25 см³ концентрированной HCl , 50 см³ концентрированной HNO_3 , 1–2 см³ H_2O_2 , 5–10 см³ 7.5 моль/л HNO_3 , упаривая до влажных солей после каждого добавления. К влажным солям добавляли 50–80 см³ 7.5 моль/л HNO_3 и нагревали в течение 10–15 мин. При неполном растворении образца пробу центрифугировали повторяли процедуру разложения осадка до полного разложения. Полученные растворы объединяли.

В полученный после разложения раствор внесли 0.2–0.3 г NaNO_2 для стабилизации плутония в состоянии Pu^{4+} . Радиохимическое выделение плутония проводили методом ионообменной хроматографии на анионите АВ-17х8. Элюирование изотопов плутония проводили 5%-ном раствором гидроксилamina солянокислого ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$). Из полученного элюента методом соосаждения со LaF_3 с последующей фильтрацией на мембране из полиэфирсульфона с максимальным размером пор 0.1 мкм получали спектрометрические источники плутония.

Измерение удельной активности альфа-излучающих изотопов плутония в подготовленном источнике проводили альфа-спектрометрическим методом в альфа-спектрометрах Alpha Duo, ORTEC, в течение 24 ч. Расчет активности изотопов плутония (^{239}Pu и ^{240}Pu в сумме) выполняли из соотношения регистрируемых импульсов, исходя из известной активности предварительно введенной в пробу изотопной метки ^{242}Pu .

Коэффициенты накопления $^{239+240}\text{Pu}$, необходимые для количественного описания параметров переноса радионуклидов из почвы в сельскохозяйственные растения, рассчитывали как отношение содержания элементов в сухой биомассе растений к их содержанию в почве.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные данные о содержании плутония в образцах рассматриваемых сельскохозяйственных культур представлены в табл. 3. Диапазон коэффициентов накопления плутония по результатам исследования составил 3.1×10^{-4} – 6.8×10^{-3} для надземной части ячменя и 9.2×10^{-3} – 7.6×10^{-2} для корней (рис. 1). Для надземной и корневой частей бобов диапазон K_n составил 1.5×10^{-3} – 5.7×10^{-3} и 5.8×10^{-2} – 6.5×10^{-2} соответственно. При этом средние значения K_n для надземной части ячменя и бобов составили 3.8×10^{-3} и 3.7×10^{-3} соответственно. Для корней средние значения K_n – 3.8×10^{-2} для ячменя и 6.2×10^{-2} для бобов.

С целью оценки полученных K_n плутония для выращенных в ходе вегетационных опытов сельскохозяйственных культур проведено сравнение с аналогичными K_n , приведенными для сельскохозяйственных растений в обобщенных данных мировых исследований.

В связи с тем, что данных по накоплению плутония в мировой практике недостаточно, и представлены они для объединенных по биологическим особенностям групп растений, были взяты значения K_n для тех групп растений, к которым можно отнести исследуемые культуры (табл. 4).

Максимальное значение диапазона K_n для надземной части злаковых культур по данным МАГАТЭ – 9.0×10^{-4} – сравнимо с минимальным значением, полученным в настоящей работе – 3.1×10^{-4} , и на порядок меньше минимального значения, полученного для чернобыльских выпадений – 4.0×10^{-3} . При этом среднее значение коэффициента накопления плутония по данным МАГАТЭ, составляющее 1.6×10^{-4} , на порядок ниже, чем полученные в настоящей работе и для территорий СИП, составляющие 3.8×10^{-3} и 2.6×10^{-3} соответственно, а также на 2 порядка меньше, полученных для чернобыльских выпадений. Возможно, это связано с тем, что данные МАГАТЭ охватывают более широкий диапазон злаковых культур. Однако даже максимальные значения K_n плутония для злаковых культур, представленные в публикациях МАГАТЭ, меньше, чем в данных, представленных в публикациях по чернобыльским выпадениям и СИП.

Для надземной части бобовых также наблюдаются меньшие K_n в данных, представленных в

Таблица 3. Содержание плутония в вегетативных органах бобов и ячменя ($\pm SD$, $n = 2$)

Тип почвы	Орган	Сухая масса образца	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в образце, Бк	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$, Бк/кг
Бобы сорт "Янтарные"				
Болотная торфяная низинная	Надземная часть	7.50	$(1.08 \pm 0.22) \times 10^{-2}$	1.44 ± 0.29
Чернозем типичный		9.77	$(6.19 \pm 1.86) \times 10^{-3}$	0.63 ± 0.19
Дерново-подзолистая		1.88	$(3.84 \pm 0.76) \times 10^{-3}$	2.04 ± 0.41
Серая лесная		4.94	$(1.06 \pm 0.21) \times 10^{-2}$	2.15 ± 0.43
Болотная торфяная низинная	Корни	2.80	$(7.69 \pm 1.15) \times 10^{-2}$	27.5 ± 4.1
Чернозем типичный		2.56	$(6.47 \pm 0.97) \times 10^{-2}$	25.3 ± 3.8
Дерново-подзолистая		1.69	$(3.52 \pm 0.53) \times 10^{-2}$	20.8 ± 3.1
Серая лесная		2.16	$(6.79 \pm 1.02) \times 10^{-2}$	31.4 ± 4.7
Ячмень сорт "Зазерский-85"				
Болотная торфяная низинная	Надземная часть	0.41	$(3.37 \pm 1.04) \times 10^{-4}$	0.82 ± 0.25
Чернозем типичный		0.41	$(5.47 \pm 1.71) \times 10^{-5}$	0.13 ± 0.04
Дерново-подзолистая		0.53	$(1.17 \pm 0.23) \times 10^{-3}$	2.20 ± 0.44
Серая лесная		0.29	$(9.68 \pm 1.94) \times 10^{-4}$	3.34 ± 0.67
Болотная торфяная низинная	Корни	0.29	$(1.13 \pm 0.17) \times 10^{-3}$	3.90 ± 0.58
Чернозем типичный		0.17	$(2.18 \pm 0.33) \times 10^{-3}$	12.8 ± 1.9
Дерново-подзолистая		0.43	$(1.17 \pm 0.18) \times 10^{-2}$	27.1 ± 4.1
Серая лесная		0.1	—	—

Таблица 4. Коэффициенты накопления $^{239+240}\text{Pu}$ по результатам вегетационных опытов и опубликованным данным

Вид	Орган	Параметр значения	Коэффициент накопления $^{239+240}\text{Pu}$			
			СИП	МАГАТЭ	чернобыльские выпадения	настоящее исследование
Злаковые	Надземная часть	Диапазон	—	$4.4 \times 10^{-7} - 9.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3} - 4.1 \times 10^{-1}$	$3.1 \times 10^{-4} - 6.8 \times 10^{-3}$
		Среднее	2.6×10^{-3}	1.6×10^{-4}	9.7×10^{-2}	3.8×10^{-3}
	Корни	Диапазон	—	—	$3.8 \times 10^{-1} - 9.7 \times 10^{-1}$	$9.2 \times 10^{-3} - 7.6 \times 10^{-2}$
		Среднее	8.3×10^{-2}	—	6.8×10^{-1}	3.8×10^{-2}
Бобовые	Надземная часть	Диапазон	—	$1.1 \times 10^{-4} - 2.9 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3} - 1.3 \times 10^{-1}$	$1.5 \times 10^{-3} - 5.7 \times 10^{-3}$
		Среднее	—	5.6×10^{-4}	3.16×10^{-2}	3.7×10^{-3}
	Корни	Диапазон	—	—	—	$5.8 \times 10^{-2} - 6.5 \times 10^{-2}$
		Среднее	—	—	—	6.2×10^{-2}

публикациях МАГАТЭ. Так, в настоящем исследовании среднее значение K_n надземной части бобов составило 3.7×10^{-3} , что на порядок выше данных МАГАТЭ (5.6×10^{-4}). Для надземной части дикорастущих бобовых культур на территории чернобыльских выпадений K_n составляет 3.16×10^{-2} , что на 2 порядка больше данных МАГАТЭ.

Характер распределения плутония в органах растений указывает, что наибольшие концентрации $^{239+240}\text{Pu}$ наблюдаются в корнях рассматриваемых сельскохозяйственных культур. Содержание плутония в надземной части растений существенно ниже корневой до нескольких порядков. Так, коэффициенты накопления плутония для

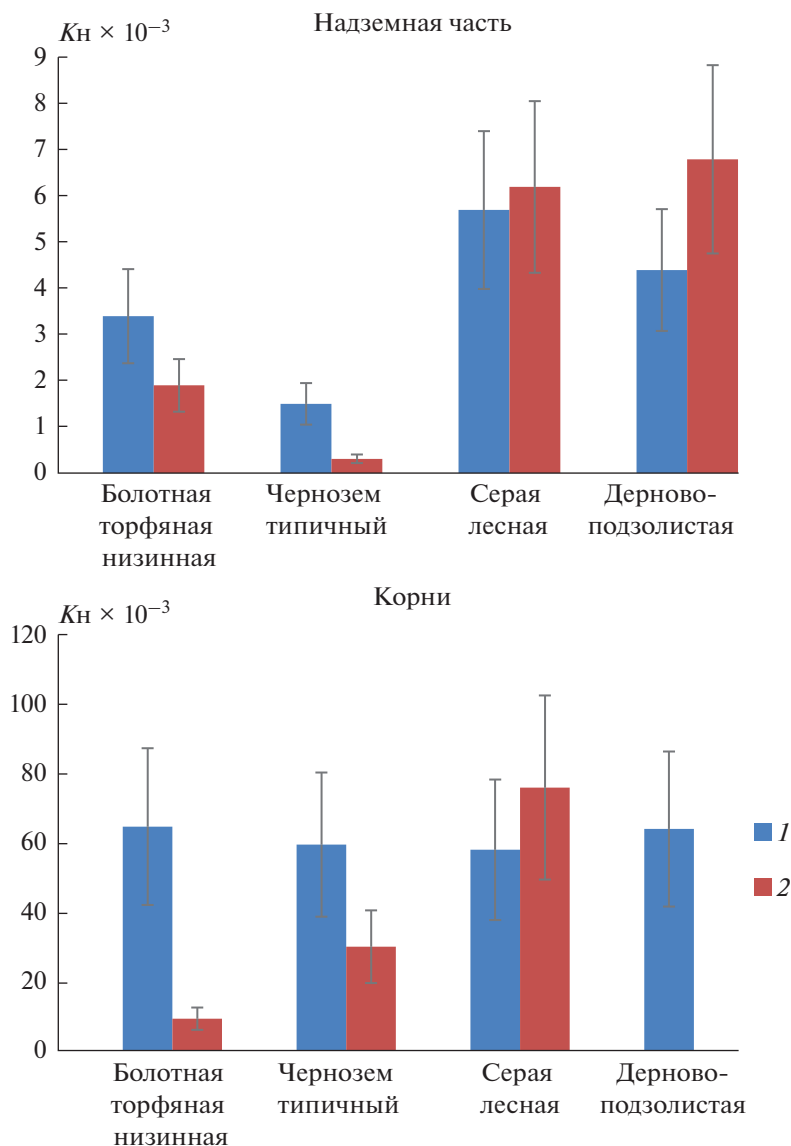


Рис. 1. Коэффициенты накопления плутония в вегетативных органах бобов сорта “Янтарные” (1) и ячменя сорта “За-зерский-85” (2).

корней бобов и ячменя больше K_n для надземной части в ~15 и ~10 раз соответственно.

Обширные исследования по изучению накопления изотопов плутония разными органами растений проведены на территории СИП [14]. Прежде всего, необходимо отметить очень высокую разницу в накоплении плутония разными органами растений, достигающую 2 порядков величин. Например, для томатов K_n для листьев и стеблей, по данным [3], составляет 4.8×10^{-3} и 1.7×10^{-3} соответственно, в то время как для корневой части этот коэффициент оценивается в 2.9×10^{-1} . Однако у некоторых культур наблюдается более высокие K_n плутония для надземных органов растения. Так, для перца наибольший K_n , по дан-

ным [3], фиксируется в листьях 1.1×10^{-2} , а для стеблей и корней он составляет 1.8×10^{-3} и 9.0×10^{-3} .

В целом данные литературных источников свидетельствуют о превышении коэффициентов накопления плутония корневой системой по сравнению с надземной частью растений.

В ходе исследования миграции плутония в системе почва–растение от типа почв для тест-культур ячменя и бобов установлено, что коэффициенты накопления плутония надземной частью можно ранжировать следующим образом:

– 6.8×10^{-3} (дерново-подзолистая) > 6.2×10^{-3} (серая лесная) > 1.9×10^{-3} (болотная торфяная низинная) > 3.1×10^{-4} (чернозем типичный) для тест-культуры ячмень сорта “За-зерский-85”;

– 5.7×10^{-3} (серая лесная) $> 4.4 \times 10^{-3}$ (дерново-подзолистая) $> 3.4 \times 10^{-3}$ (болотная торфяная низинная) $> 1.5 \times 10^{-4}$ (чернозем типичный) для тест-культуры бобы сорта “Янтарные”.

Результаты исследования показывают, что в целом K_n плутония для разных типов почв располагаются в следующем ряду: дерново-подзолистая и серая лесная $>$ болотная торфяная низинная \gg чернозем типичный. В среднем максимальные и минимальные значения различаются на порядок (в ~ 30 раз).

Зависимости коэффициента накопления корневой частью от типа почв для тест-культуры бобов не выявлена, в среднем значение K_n плутония составило ~ 0.060 . Коэффициенты накопления плутония корневой частью для тест-культуры ячмень располагаются в ряд: 7.6×10^{-2} серая лесная $> 3.0 \times 10^{-2}$ чернозем типичный $> 9.2 \times 10^{-3}$ болотная торфяная низинная.

Анализ данных для корневой части растений показал неоднозначные данные о зависимости накопления плутония корнями от типа почв, на которых выращено растение.

Как описывалось выше, данные по K_n плутония, полученные в одинаковых условиях для определенных типов почв, в литературных источниках отсутствуют. Для сравнения полученных результатов выбраны объединенные данные для соответствующих групп растений и разрядов почв [7]:

– 5.4×10^{-4} (органические) $> 3.3 \times 10^{-5}$ (песчаные) $> 7.4 \times 10^{-6}$ (глинистые) $> 4.9 \times 10^{-6}$ (суглинистые) для зерна злаковых культур;

– 4.5×10^{-4} (суглинистые) $> 4.0 \times 10^{-5}$ (песчаные) $> 2.4 \times 10^{-6}$ (глинистые) для стеблей и побегов зерновых;

– 5.8×10^{-4} (суглинистые) $> 4.8 \times 10^{-4}$ (песчаные) $> 4.1 \times 10^{-4}$ (глинистые) для стеблей и побегов бобовых.

Данные литературных источников показывают различие коэффициентов накопления плутония растениями, выращенными на разных почвах, до 2 порядков величин.

С учетом проведенного исследования и объединенных данных МАГАТЭ можно предположить, что K_n плутония различаются до 2 порядков для растений, выращенных на разных типах почв. При этом для почв с большим содержанием органического вещества наблюдаются меньшие коэффициенты накопления. Вероятно, органическое вещество почв способствует уменьшению накопления плутония растениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе вегетационных экспериментов установлено, что особенности накопления плутония

сельскохозяйственными растениями, выращенными на разных типах почв, неодинаковы для отдельных видов/органов рассматриваемых культур.

В целом коэффициенты накопления плутония надземной частью растений для разных типов почв располагаются в следующем ряду: дерново-подзолистая и серая лесная $>$ болотная торфяная низинная \gg чернозем типичный. При этом органическое вещество почв способствует снижению накопления плутония растениями.

Для корневой части рассматриваемых сельскохозяйственных культур зависимость коэффициентов накопления плутония неоднозначна. Для тест-культуры бобов зависимость не выявлена, в среднем значение K_n плутония составило $\sim 6.0 \times 10^{-2}$. Коэффициенты накопления плутония корневой частью для тест-культуры ячмень располагаются в ряд: 7.6×10^{-2} серая лесная $> 3.0 \times 10^{-2}$ чернозем типичный $> 9.2 \times 10^{-3}$ болотная торфяная низинная.

Установлено, что широкий диапазон K_n до 4 порядков величин, представленный в литературных данных, обуславливается условиями их произрастания и, в частности, типом почв.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках госзадания № FGNE-2021-0002.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клечковский В.М., Петербургский А.В. Агрехимия: Уч. пос. Колос, 1967. 583 с.
2. Лукашенко С.Н. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Павлодар: Дом печати, 2011. Вып. 3. Т 2. 396 с. ISBN: 978-601-7112-38-7
3. Лукашенко С.Н., Эдомская М.А. Плутоний в окружающей среде: источники, механизмы распространения, концентрации // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61. № 4. С. 394–424. <https://doi.org/10.31857/S086980312104007X>
4. Спиров Р.К., Никитин А.Н., Чешик И.А., Король Р.А. Аккумуляция трансурановых элементов надземными и подземными органами сосудистых растений // Докл. Национальной академии наук Беларуси. 2017. Т. 61. № 2. С. 51–57.
5. Тагай С.А. Дударева Н.В., Нилова Е.К. Параметры перехода ^{241}Am , $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ в сельскохозяйственные культуры // Современные проблемы радиобиологии – 2021: Мат-лы междунар. научн. конф. Гомель, 23–24 сентября 2021 г. Минск: Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь, 2021. С. 166–169.

6. Шуранкова О.А., Кудряшов В.П. Поступление трансурановых элементов ($^{239} + ^{240}\text{Pu}$, ^{241}Am) Чернобыльского происхождения в луговую растительность // Проблемы здоровья и экологии. 2006. № 1(7). С. 67–71.
7. Balonov M. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical Reports Series No. 472. IAEA, 2010.
8. Barnett C.L. Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. IAEA-TECDOC-1616. IAEA, 2009.
9. Beresford N.A., Howard B.J. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer to wildlife. Technical Reports Series No. 479. IAEA, 2014.
10. Edomskaia M.A., Lukashenko S.N., Stupakova G.A., Kharkin P.V., Gluchshenko V.N., Korovin S.V. Estimation of radionuclides global fallout levels in the soils of CIS and eastern Europe territory // J. Environ. Radioact. 2022. V. 247. P. 106865. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106865>
11. Kozhakhhanov T.E., Lukashenko S.N., Larionova N.V. Accumulation of artificial radionuclides in agricultural plants in the area used for surface nuclear tests // J. Environ. Radioact. 2014. V. 137. P. 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.06.026>
12. 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. V. 186. P. 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.006>
13. Lux D., Kammerer L., Rühm W., Wirth E. Cycling of Pu, Sr, Cs, and other longliving radionuclides in forest ecosystems of the 30-km zone around Chernobyl // Sci. Total Environ. 1995. V. 173. P. 375–384. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04741-7](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04741-7)
14. Sokolik G.A., Ovsiannikova S.V., Ivanova T.G., Leinova S.L. Soil–plant transfer of plutonium and americium in contaminated regions of Belarus after the Chernobyl catastrophe // Environ. Int. 2004. V. 30. P. 939–947. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.003>

Plutonium Accumulation by Vegetation on Different Soils

M. A. Edomskaia^{1, *}, S. N. Lukashenko¹, A. A. Shupik¹, and S. G. Shapovalov¹

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, 249032 Russia

*e-mail: maisher@mail.ru

The high variability of the plutonium transfer factors presented in the literature makes it relevant to study the mechanisms that affect its migration ability and its availability for vegetation. The variability of transfer factors is explained by different properties of soils, since the redox potential and soil acidity can significantly affect the mobility of plutonium. In the vegetation experiment, the migration of plutonium in the “soil-agricultural plant” system was studied for different types of soils. The content of $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ was analyzed by alpha spectrometry with preliminary radiochemical isolation. Plutonium migration parameters were determined using barley (*Hordeum*) and beans (*Fabaceae*) as test cultures. The plutonium accumulation coefficients obtained in the course of vegetation experiments are in the range of 3.1×10^{-4} – 6.8×10^{-3} , with an average value of 3.8×10^{-3} for the aboveground part of barley and 9.2×10^{-3} – 7.6×10^{-2} , with an average value of 3.8×10^{-2} – for the root system of barley. The transfer factor range was 1.5×10^{-3} – 5.7×10^{-3} with an average value of 3.7×10^{-3} and 5.8×10^{-2} – 6.5×10^{-2} with an average value of 6.2×10^{-2} for the aboveground part and the root system of the beans, respectively. It has been determined that the nature of the plutonium distribution over the vegetative organs of the crops under consideration is non-uniform. On average, the plutonium transfer factor for the aboveground part of plants is lower than for the root part by more than 40 times. It has been determined that the accumulation of plutonium in the aboveground parts of plants growing on different types of soil is not the same for individual species/organs of agricultural plants. For the aboveground part of the agricultural crops under consideration, the transfer factors differ up to several orders of magnitude. In general, the accumulation of plutonium by vegetation growing on different soils types is arranged in the following row: soddy-podzolic (Retisol) and gray forest soil (Phaeozem) > lowland peat-bog (Histosol) \gg typical chernozem (Chernozem). The smallest accumulation of plutonium by vegetation is observed in soils with a high content of organic matter. For the root system of plants, the dependence of the plutonium accumulation coefficients on the soil type is uncertain.

Keywords Pu, transfer factor, soil–plant system, barley, beans