

УДК 581.5:539.163

НАКОПЛЕНИЕ ПЛУТОНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ (ОБЗОР)

© 2023 г. А. А. Шупик¹, М. А. Эдомская¹, Б. И. Сынзыныс², К. Е. Шаврина^{1,*}¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия²Обнинский институт атомной энергетики — филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Обнинск, Россия

*E-mail: shavrina2000@gmail.com

Поступила в редакцию 14.12.2022 г.

После доработки 19.05.2023 г.

Принята к публикации 21.06.2023 г.

Обобщена информация о накоплении плутония растительностью. Рассмотрены факторы, влияющие на процесс миграции плутония в системе “почва–растение”. Дан обзор количественных величин в виде коэффициентов накопления плутония растительностью. Показано, что коэффициенты накопления изотопов плутония растительностью весьма изменчивы и охватывают шесть порядков величины. Отмечено, что для территории, подверженной глобальным выпадениям, коэффициент накопления существенно ниже, чем для загрязненной. Для этого рассмотрены специальные публикации МАГАТЭ, публикации по исследованию накопления плутония для фоновых территорий и территорий, подверженных радиоактивному загрязнению. Приведены данные о поступлении плутония в разные сельскохозяйственные культуры, выращенные на Семипалатинском испытательном полигоне. Показано, что для территории Семипалатинского полигона коэффициенты накопления плутония сельскохозяйственными культурами находятся в пределах $n \times 10^{-5}$ – $n \times 10^{-1}$. Рассмотрены литературные данные по накоплению плутония дикорастущей растительностью, произрастающей на подверженной чернобыльским выпадениям территории. В среднем коэффициенты накопления травянистой растительностью территории, подверженной чернобыльским выпадениям, находится на уровне $n \times 10^{-2}$. В статье обобщена и представлена информация по накоплению плутония разными органами растений. В целом на основе анализа литературных данных коэффициент накопления изотопов плутония находится в пределах $n \times 10^{-7}$ – $n \times 10^{-1}$.

Ключевые слова: плутоний, система “почва–растение”, коэффициент накопления, органы растений, миграция Pu, факторы миграции

DOI: 10.31857/S0869803123040082, EDN: KXYPAW

Плутоний — радиоактивный элемент и в окружающей среде имеет только техногенное происхождение, связанное с испытанием ядерного оружия, ядерными и радиационными авариями, выбросами и сбросами предприятий ядерно-топливных циклов [1].

Также плутоний является высокотоксичным химическим элементом. Несмотря на его плохую усвояемость в желудочно-кишечном тракте, при поглощении 0.5 г плутония развивается острое внутреннее облучение, способное привести к летальному исходу [2]. А его основные изотопы, ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu, были отнесены МАГАТЭ к радионуклидам “Группы 1” и относятся к числу наиболее радиотоксичных радионуклидов [3]. Ввиду своего длительного периода полураспада (24100 лет для ²³⁹Pu и 6537 лет для ²⁴⁰Pu) данные изотопы остаются в организме человека долгое время, что приводит к долговременному кумулятивному воздействию на организм человека. Коэффици-

ент накопления изотопов плутония растительностью является ключевым фактором, используемым в математических моделях для оценки концентрации радионуклидов в сельскохозяйственных культурах, а следовательно, и оценки возможного воздействия дозы на организм человека [4].

Цель настоящей обзорной статьи — систематизировать и обобщить литературные данные о миграции плутония в системе “почва–растение”.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НАКОПЛЕНИЕ ПЛУТОНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

В твердом состоянии плутоний в различных соединениях проявляет степени окисления: +3; +4; +5; +6; причем преобладают (3+) и (4+). Кроме того, он имеет и субнормальную степень окисления (2+). В водных растворах плутоний присутствует в степенях окисления от (+3) до (+6) в сле-

дующих ионных формах: Pu^{3+} , Pu^{4+} , PuO_2^+ (плутоноил), PuO_2^{2+} (плутонил). В двух последних случаях сам плутоний находится в степенях окисления (5+) и (6+) соответственно. Растворы плутония (7+) получены только в сильно окислительной щелочной среде [11].

Химическая форма изотопов плутония существенно влияет на его миграционную способность, поскольку от формы связи плутония с почвенными частицами зависит его количество, способное перейти в почвенный раствор, что определяет долю, которая может включаться в трофические цепи. На формы нахождения плутония в почвах и их относительное количество существенную роль оказывает тип почвы. Например, по содержанию мобильных форм плутония почвы могут быть расположены в следующий ряд: дерново-подзолистые > песчаные > дерновые > торфяно-болотные [8, 9].

Значительную роль играет и форма поступления плутония в окружающую среду. При этом химическая форма плутония, поступающего в природную среду, в зависимости от источника может меняться от труднорастворимых соединений, до относительно легкорастворимых форм [10]. Например, в зарядах атомных бомб использовались сплавы плутония с другими металлами. При этом растворимость двойных сплавов плутония с металлами побочных подгрупп очень ограничена; исключением являются твердые растворы с алюминием [11]. В зависимости от выбросов/сбросов плутоний может попасть в окружающую среду в виде тугоплавкого оксида с низкой растворимостью и медленной кинетикой превращения или в виде более активных/подвижных форм, включая нитраты, карбонаты и гидроксиды.

Помимо влияния типа почв, условия выращивания, такие как климат и методы ведения сельского хозяйства, также могут оказывать влияние на коэффициенты накопления плутония растительностью. В литературе имеется ряд данных о зависимости поведения радионуклидов от климатических условий, таких как влажность и температура. Например, наблюдаются значительные различия между коэффициентами накопления для более изученного поведения цезия в регионах с умеренным и субтропическим или тропическим климатом [12]. Однако влияние климатических факторов в отношении плутония не изучено. Методы ведения сельского хозяйства могут оказывать влияние на свойства почв (орошение, вспашка, известкование и внесение удобрений) и привести к перераспределению радионуклидов, изменению pH почв, формы нахождения радионуклидов, а следовательно, к способности поглощения их растительностью [13, 14]. Однако данные факторы слабо изучены в отношении изотопов плутония.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МИГРАЦИИ ПЛУТОНИЯ В СИСТЕМЕ “ПОЧВА–РАСТЕНИЕ”

Авторами используются разные критерии и единицы оценки миграционных способностей плутония. Для оценки интенсивности поглощения радионуклидов различными видами живых организмов используется коэффициент накопления (K_n), рассчитываемый как отношение удельной активности радионуклида в сухом растении Бк/кг к удельной активности сухой почвы Бк/кг, на которой выращено растение.

С целью сравнения литературных данных в работе произведен перерасчет к единому коэффициенту накопления. Так, при обработке информации из литературных источников, в которых не проведен расчет коэффициентов накопления, но представлена информация по содержанию изотопов плутония в растительности и почве, на которой она выращена, были рассчитаны коэффициенты накопления. Для данных по выпадению плутония, которые представлены в Бк/м², произведен пересчет в Бк/кг с учетом 95%-ного содержания плутония в 20 см слое почвы и средней плотности почвы 1.6 г/см³. Данные содержания изотопов плутония в растительности на свежий вес (часто встречается при оценке коэффициентов накопления во фруктах) приведены к содержанию плутония в сухом весе с учетом средней влажности рассматриваемой растительности или ее части [31].

КОЭФФИЦИЕНТЫ НАКОПЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ В СИСТЕМЕ “ПОЧВА–РАСТЕНИЕ”

Коэффициенты накопления плутония по данным МАГАТЭ

Все значимые результаты мировых исследований по переходу радионуклидов из почвы в растение были обобщены группой экспертов МАГАТЭ и представлены в специальных публикациях [5–7]. Приведенные коэффициенты накопления (K_n) для плутония МАГАТЭ отличаются высокой вариативностью значений (до четырех порядков) и определены для объединенных групп различных видов растений и получены в различных почвенно-климатических условиях. Кроме того, рекомендованные данные были рассчитаны на основе ограниченных источников данных, что во многих случаях сделало бы коэффициенты накопления плутония неподходящими. Согласно отчету МАГАТЭ [5], приемлемое количество записей данных о коэффициентах накопления растениями имелось только для нескольких радионуклидов, таких как Cs, Sr, в то время как для трансурановых элементов (Th, Am, Pu) вводных данных

(100–500 оценок данных) было недостаточно для полноценной оценки.

Коэффициенты накопления растительностью изотопов плутония, поступивших в окружающую среду в результате глобальных выпадений

Во всем мире было проведено более 2400 испытаний ядерного оружия. Атмосферные ядерные взрывы стали крупнейшим источником поступления плутония в окружающую среду. В целом по миру уровень глобальных выпадений $^{239+240}\text{Pu}$ находится на уровне десятков Бк/м², что составляет десятые доли Бк/кг [29]. Диапазон концентраций, обусловленных глобальными выпадениями $^{239+240}\text{Pu}$ в северном полушарии, значительно выше значений концентраций, обусловленных глобальными выпадениями, южного полушария.

В литературе представлено ограниченное число работ по изучению миграции изотопов плутония, глобального происхождения, в системе “почва–растение”. Это связано с очень низкими концентрациями плутония в почве, а также трудоемкими методами анализа его ультранизких концентраций в объектах окружающей среды.

Наиболее подробно параметры переноса плутония глобальных выпадений в системе “почва–растение” изучены для территории Финляндии [26, 27]. Большая часть территории Финляндии покрыта бореальными лесами с подзолистой почвой. Диапазоны коэффициентов накопления плутония внутри типов рассматриваемой растительности варьируются в пределах 1–3 порядков. Например, для грибов диапазон накопления плутония составил 0.018–0.16, для лишайников – 0.003–0.079, для лесных ягод – 0.0026–0.11.

Крупное исследование проведено по изучению коэффициентов накопления изотопов плутония зерном риса для всей территории Японии [28]. Авторы проводили анализ для очищенного зерна. Концентрации плутония в образцах отшелушенного риса варьировались от 4.5×10^{-6} до 1.2×10^{-4} .

Данные из других литературных источников, как правило, единичны, получены на малых территориях или представлены в виде литературных обзоров.

Коэффициенты накопления плутония растительностью для территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона

Семипалатинский испытательный полигон (СИП) был одним из основных полигонов, использовавшихся Советским Союзом для испытаний ядерного оружия. С 1949 по 1989 г. было проведено 456 ядерных испытаний, что составляет

64% от всех испытаний в СССР. СИП в настоящее время является наиболее полно изученным ядерным полигоном с точки зрения оценки последствий проведенных испытаний [24, 25].

Обширные исследования были проведены по изучению накопления изотопов плутония дикорастущими и сельскохозяйственными растениями на территории СИП [15–17]. Исследования проводились в естественных условиях, на участках с высоким содержанием плутония (до $n \times 10^4$ Бк/кг), на одном типе почвы в одной климатической зоне, одним коллективом исследователей по одной методике, что позволяет однозначно сравнивать данные при разных концентрациях плутония в почве и делать выводы о характере его накопления растениями.

Следует отметить, что в литературных данных, как правило, практически отсутствуют работы, проведенные в природно-климатических условиях, характерных для территории бывшего СИП. Кроме того, в данных работах наиболее полно представлены сельскохозяйственные культуры, употребляемые в пищу человеком, что делает их более весомыми для оценки с точки зрения радиозоологических рисков для человека.

Коэффициенты накопления изотопов плутония сельскохозяйственными растениями, выращенными на СИП, представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что K_n плутония сельскохозяйственными культурами находятся в пределах $n \times 10^{-5}$ – $n \times 10^{-1}$. При этом наблюдается существенное различие в накоплении плутония разными органами растений. Для ряда сельскохозяйственных культур наименьшие коэффициенты накопления отмечаются в надземной части растений. Однако такое распределение не является типичным. Например, K_n плутония плодами баклажан, равный 5.5×10^{-2} , имеет тот же порядок, что и K_n для корневой части, равный 1.6×10^{-2} . Для моркови K_n надземной частью и корнеплодом также имеет один порядок и составляют 6.9×10^{-2} и 3.9×10^{-2} соответственно. В отношении картофеля наименьший K_n в 4.3×10^{-4} отмечается для корнеплодов, в то время как для корневой системы картофеля данный коэффициент составляет 4.7×10^{-2} , а для листьев и стеблей – 2.2×10^{-2} и 8.0×10^{-3} соответственно.

Коэффициенты накопления плутония растительностью для 30-километровой зоны отчуждения Чернобыльской аварии и Полесского радиозоологического заповедника

Во время аварии на Чернобыльской АЭС, 1986 г. было выброшено в окружающую среду около 20 ТБк ^{238}Pu , 15 ТБк ^{239}Pu , 23 ТБк ^{240}Pu , 3000 ТБк ^{241}Pu и 0.04 ТБк ^{242}Pu . Выпадение соеди-

Таблица 1. Средние значения коэффициентов накопления $^{239+240}\text{Pu}$ многолетних опытов на территории СИП [15–17]**Table 1.** Average values $^{239+240}\text{Pu}$ transfer factors of many years of experience on the STS territory

Вид растения	Орган	$K_n^{239+240}\text{Pu}$	Вид растения	Орган	$K_n^{239+240}\text{Pu}$
Картофель	Клубни	4.3×10^{-4}	Томат	плоды	$<1.0 \times 10^{-3}$
	Листья	2.2×10^{-2}		листья	4.8×10^{-3}
	Стебли	8.0×10^{-3}		стебли	1.7×10^{-3}
	Корни	4.7×10^{-2}		корни	2.9×10^{-1}
Морковь	Листья	6.9×10^{-2}	Свекла	листья	1.0×10^{-2}
	корнеплод	3.9×10^{-2}		корнеплод	1.6×10^{-3}
Перец	Плоды	1.1×10^{-4}	Тыква	плоды	3.1×10^{-5}
	Листья	1.1×10^{-2}		листья	3.4×10^{-3}
	Стебли	1.8×10^{-3}		стебли	7.4×10^{-4}
	Корни	9.0×10^{-3}		корни	6.6×10^{-3}
Огурец	Плоды	1.9×10^{-4}	Капуста	листья	1.2×10^{-3}
	Листья	5.0×10^{-3}		стебель	7.1×10^{-3}
	Стебли	3.7×10^{-3}		корни	2.8×10^{-2}
Лук	Листья	2.8×10^{-3}	Баклажан	плоды	5.5×10^{-2}
	Луковицы	1.3×10^{-2}		листья	5.1×10^{-2}
Пшеница	Зерно	8.1×10^{-4}		стебли	9.5×10^{-4}
	Стебли	2.6×10^{-3}		корни	1.6×10^{-2}
	Корни	8.3×10^{-2}			

нений плутония из атмосферы проходило быстрее, чем выпадение более легких радионуклидов, и площади высокого загрязнения его изотопами ограничены территориально.

На данной территории проведено большое количество исследований по изучению накопления плутония дикорастущими растениями [18–23]. Результаты анализа литературных данных по накоплению изотопов плутония растительностью, произрастающей в 30-километровой зоне отчуждения и Полесском радиозоологическом заповеднике, представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что K_n плутония для травянистой растительности территории, подверженной чернобыльским выпадениям, находится на уровне $n \times 10^{-2}$. Следует отметить, что по данным исследований K_n надземной частью растений существенно ниже, чем в корнях.

Коэффициенты накопления растительностью изотопов плутония, поступившего из других источников выбросов и сбросов

В период с 1952 по 1992 г. с площадки “Селлафилд” в атмосферу было выброшено 3.7 ТБк (1.63 кг) ^{239}Pu и 23 ТБк (6.3 г) ^{241}Pu . Суммарные

выбросы в атмосферу были более чем на два порядка меньше, чем сбросы в Ирландское море в виде радиоактивных стоков, которые в период с 1950 по 1992 г. составили около 720 ТБк $^{238,239,240}\text{Pu}$. Количество плутония, сброшенного со сточными водами, составляет 120 ТБк (0.2 кг) для ^{238}Pu , 620 ТБк (270 кг) для ^{239}Pu и 22000 ТБк (5.7 кг) для ^{241}Pu . Масштабы загрязнения оценить сложно, однако приводится информация, что содержание ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах зоны влияния комплекса “Селлафилд” находится в диапазоне 0.9–1980 и 0.68860 Бк/кг соответственно [29]. Для данной зоны подробно изучены коэффициенты накопления фруктами, диапазон которых составляет 3.78×10^{-3} – 1.67×10^{-1} . Для травянистой растительности данной территории K_n колеблются в очень широких пределах от 1.10×10^{-6} до 3.30×10^{-1} .

В работе [30] представлены коэффициенты накопления изотопов плутония в вегетативных органах черной смородины, произрастающей в районе воздействия Горно-химического комбината (ГХК), производившего оружейный плутоний. Точных данных по объемам выброса изотопов плутония в открытых источниках нет. Наиболее загрязненными плутонием являются пойменные

Таблица 2. Коэффициенты накопления $^{239+240}\text{Pu}$ по опубликованным данным для Чернобыльских выпадений
Table 2. Transfer factors of $^{239+240}\text{Pu}$ according to published data for Chernobyl fallout

Группа	Семейство	Орган	K_n $^{239+240}\text{Pu}$	
			среднее	диапазон
Травянистые растения	разнотравье	листья и стебли	8.94×10^{-2}	$8.70 \times 10^{-4} - 7.80 \times 10^{-1}$
		корни	5.69×10^{-1}	$1.12 \times 10^{-1} - 9.72 \times 10^{-1}$
	астровые	надземная часть	1.01×10^{-2}	$9.00 \times 10^{-3} - 1.11 \times 10^{-2}$
		корни	4.41×10^{-1}	
	бобовые злаки	надземная часть	3.05×10^{-2}	$3.00 \times 10^{-3} - 1.30 \times 10^{-1}$
		зерно	1.67×10^{-2}	$3.00 \times 10^{-3} - 3.30 \times 10^{-2}$
		надземная часть	9.72×10^{-2}	$4.00 \times 10^{-3} - 4.10 \times 10^{-1}$
		корни	6.75×10^{-1}	$3.78 \times 10^{-1} - 9.72 \times 10^{-1}$
Травянистые ягодные растения	осоковые	надземная часть	3.91×10^{-2}	$3.00 \times 10^{-3} - 1.40 \times 10^{-1}$
		корни	9.16×10^{-1}	—
	сложноцветные	надземная часть	3.40×10^{-2}	$3.00 \times 10^{-3} - 7.00 \times 10^{-2}$
	розовые (земляника, костяника)	листья	1.14×10^{-2}	$2.17 \times 10^{-3} - 2.00 \times 10^{-2}$
		стебли	6.58×10^{-2}	$8.70 \times 10^{-4} - 2.41 \times 10^{-1}$
		ягоды	2.51×10^{-1}	$1.74 \times 10^{-1} - 3.28 \times 10^{-1}$
Кустарники	—	ягоды	2.91×10^{-2}	$1.95 \times 10^{-2} - 3.87 \times 10^{-2}$
		надземная часть	2.32×10^{-1}	—
		корни	4.69×10^{-2}	$3.91 \times 10^{-3} - 1.74 \times 10^{-1}$
Лишайники и мохообразные	лишайники мох		1.80×10^{-1}	—
			8.78×10^{-2}	$1.60 \times 10^{-2} - 2.80 \times 10^{-1}$

почвы и донные отложения реки Енисей зоны влияния ГХК, которая тянется до 1500 км вниз по течению реки от г. Железногорска. Установлено, что накопление $^{239+240}\text{Pu}$ в органах смородины с территории “Атаманово (остров)”, на пойменных участках р. Енисей, загрязненных в результате водных сбросов, возрастает в ряду “ветки (0.01) < листья (0.026) < ягоды (0.056)”. При этом K_n корневой системой составил 0.027, что очень близко к K_n в листьях.

С 1974 по 1987 г. на территории Якутии было произведено 12 мирных подземных ядерных взрывов (ПЯВ), два из которых — “Кристалл” и “Кратон-3” — привели к одноактному загрязнению территории продуктами ядерного деления и актинидами. Через 3 года после аварии были проведены рекультивационные работы: снят грунт с территории ~5000 м², который вместе с технологическим оборудованием был захоронен в могильник. В последующем было установлено, что обваловка, защищающая могильник, местами смыва, что усилило вынос радионуклидов. Основными радионуклидами загрязненных участков являются ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ [32]. На расстоянии 200 м на северо-восток от эпицентра взрыва

ПЯВ “Кратон-3” концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ в почве превышала в 100 раз уровень его глобального выпадения и в 2.5 раза выше среднего содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС. В работе [32] исследованы коэффициенты накопления листьями и хвоей деревьев, произрастающих на разном расстоянии от оси следа. Коэффициенты накопления растительностью для изученной территории составили 4.0×10^{-4} для хвои, $3.2 \times 10^{-3} - 5.4 \times 10^{-3}$ для листьев деревьев, $1.1 \times 10^{-2} - 3.2 \times 10^{-1}$ для разнотравья, $5.3 \times 10^{-2} - 1.5 \times 10^{-1}$ для лишайника и $2.5 \times 10^{-1} - 9.7 \times 10^{-1}$ для мха.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как упоминалось выше, на коэффициент накопления плутония растительностью может оказывать влияние множество факторов, такие как типы и виды растений, рассматриваемый вегетационный орган, типы почв, климат, методы ведения сельского хозяйства, а также формы поступления изотопов плутония в окружающую среду. В табл. 3 представлена обобщенная информация по коэффициентам накопления для разного типа

Таблица 3. Коэффициенты накопления изотопов плутония растительностью на основе литературных данных
Table 3. Transfer factors of ²³⁹⁺²⁴⁰Pu by vegetation based on literature data

Группа	Орган	МАГАТЭ	Глобальные выпадения	Чернобыльские выпадения	СИП	Селлафилд	ГХК	ПЯВ Кратон-3	Вегетационные опыты	По всем данным
Грибы	грибы	1.10 × 10 ⁻¹ – 5.90 × 10 ⁻¹	1.82 × 10 ⁻² – 1.59 × 10 ⁻¹	3.94 × 10 ⁻¹						1.10 × 10 ⁻¹ – 5.90 × 10 ⁻¹
		1.54 × 10 ⁻¹ – 2.46 × 10 ⁻¹	1.10 × 10 ⁻¹	1.80 × 10 ⁻¹				2.47 × 10 ⁻¹ – 9.72 × 10 ⁻¹		1.10 × 10 ⁻¹ – 9.72 × 10 ⁻¹
Лишайник			3.02 × 10 ⁻² – 7.87 × 10 ⁻²	1.60 × 10 ⁻² – 2.80 × 10 ⁻¹				5.38 × 10 ⁻² – 1.50 × 10 ⁻¹		1.54 × 10 ⁻¹ – 2.80 × 10 ⁻¹
								4.00 × 10 ⁻⁴ – 5.38 × 10 ⁻²		4.00 × 10 ⁻⁴ – 5.38 × 10 ⁻²
Деревья	надземная часть									
	фрукты	1.30E–06– 2.10 × 10 ⁻²				3.78 × 10 ⁻³ – 1.67 × 10 ⁻¹			1.00 × 10 ⁻⁵ – 1.15 × 10 ⁻⁴	1.30 × 10 ⁻⁶ – 1.67 × 10 ⁻¹
Кустарники	ягоды	6.40 × 10 ⁻⁵ – 6.60 × 10 ⁻¹		1.95 × 10 ⁻² – 3.87 × 10 ⁻²			5.60 × 10 ⁻²			6.40 × 10 ⁻⁵ – 6.60 × 10 ⁻¹
	корни			2.32 × 10 ⁻¹			2.70 × 10 ⁻²			2.70 × 10 ⁻² – 2.32 × 10 ⁻¹
	надземная часть	6.40 × 10 ⁻⁵ – 2.70 × 10 ⁻⁴	2.62 × 10 ⁻³ – 1.18 × 10 ⁻¹	3.91 × 10 ⁻³ – 1.74 × 10 ⁻¹			1.00 × 10 ⁻² – 2.60 × 10 ⁻²			6.40 × 10 ⁻⁵ – 1.74 × 10 ⁻¹
Разнотравье	все растение	1.40 × 10 ⁻² – 5.03 × 10 ⁻²								1.40 × 10 ⁻² – 5.03 × 10 ⁻²
	листья и стебли	5.00 × 10 ⁻⁵ – 3.90 × 10 ⁻³	8.80 × 10 ⁻³	8.70 × 10 ⁻⁴ – 7.80 × 10 ⁻¹		1.10 × 10 ⁻⁶ – 3.30 × 10 ⁻¹		1.12 × 10 ⁻² – 3.23 × 10 ⁻¹		1.10 × 10 ⁻⁶ – 7.80 × 10 ⁻¹
	корни			1.12 × 10 ⁻¹ – 9.72 × 10 ⁻¹						1.12 × 10 ⁻¹ – 9.72 × 10 ⁻¹
Ягодные	листья и стебли			8.70 × 10 ⁻⁴ – 2.41 × 10 ⁻¹	7.40 × 10 ⁻⁴ – 3.40 × 10 ⁻³					7.40 × 10 ⁻⁴ – 2.41 × 10 ⁻¹
	ягоды	2.70 × 10 ⁻⁵ – 8.30 × 10 ⁻⁴	5.69 × 10 ⁻³ – 8.30 × 10 ⁻³	1.74 × 10 ⁻¹ – 3.28 × 10 ⁻¹					5.62 × 10 ⁻⁴ – 1.23 × 10 ⁻³	2.70 × 10 ⁻⁵ – 3.28 × 10 ⁻¹
Бобовые	листья и стебли	1.10 × 10 ⁻⁴ – 2.90 × 10 ⁻³		3.00 × 10 ⁻³ – 1.30 × 10 ⁻¹					3.60 × 10 ⁻⁴	1.10 × 10 ⁻⁴ – 1.30 × 10 ⁻¹
	семена и стручки	3.70 × 10 ⁻⁵ – 1.50 × 10 ⁻⁴								3.70 × 10 ⁻⁵ – 1.50 × 10 ⁻⁴

Таблица 3. Окончание

Группа	Орган	МАГАТЭ	Глобальные выпадения	Чернобыль- ские выпадения	СИП	Селлафилд	ГХК	ПЯВ Кратон-3	Вегета- ционные опыты	По всем данным
Зерновые	корни				8.30×10^{-2}				1.50×10^{-1}	8.30×10^{-2} – 1.50×10^{-1}
	листья и стебли				2.60×10^{-3}				4.60×10^{-2}	2.60×10^{-3} – 4.60×10^{-2}
	все растение								2.50×10^{-6} – 5.00×10^{-1}	2.50×10^{-6} – 5.00×10^{-1}
Кукуруза	зерно	2.00×10^{-7} – 1.10×10^{-3}	4.50×10^{-6} – 1.20×10^{-4}	3.00×10^{-3} – 3.30×10^{-2}	8.10×10^{-4}					2.00×10^{-7} – 3.30×10^{-2}
	листья и побеги	2.00×10^{-6} – 3.20×10^{-4}							2.90×10^{-4}	2.00×10^{-6} – 3.20×10^{-4}
	зерно	3.00×10^{-6}							2.10×10^{-5}	3.00×10^{-6} – 2.10×10^{-5}
Листовые овощи	листья	1.00×10^{-5} – 2.00×10^{-3}			1.20×10^{-3} – 7.10×10^{-3}				4.30×10^{-6} – 4.60×10^{-5}	4.30×10^{-6} – 7.10×10^{-3}
	корни				9.00×10^{-3} – 2.90×10^{-1}					9.00×10^{-3} – 2.90×10^{-1}
Нелистовые овощи	надземная часть		3.00×10^{-5} – 3.00×10^{-4}		9.50×10^{-4} – 5.10×10^{-2}					3.00×10^{-5} – 5.10×10^{-2}
	плоды	6.00×10^{-6} – 1.20×10^{-3}			1.10×10^{-4} – 5.50×10^{-2}					6.00×10^{-6} – 5.50×10^{-2}
	клубни	3.80×10^{-6} – 5.00×10^{-3}			4.30×10^{-4}				1.10×10^{-5} – 1.70×10^{-5}	3.80×10^{-6} – 5.00×10^{-3}
Клубни	листья и побеги				8.00×10^{-3} – 2.20×10^{-2}					8.00×10^{-3} – 2.20×10^{-2}
	корнеплод	7.00×10^{-5} – 8.60×10^{-3}			1.60×10^{-3} – 3.90×10^{-2}				1.10×10^{-5} – 1.90×10^{-4}	1.10×10^{-5} – 3.90×10^{-2}
Корне- плоды	листья	2.50×10^{-4} – 4.90×10^{-3}			1.00×10^{-2} – 6.90×10^{-2}				2.30×10^{-3}	2.50×10^{-4} – 6.90×10^{-2}

загрязнения почвы изотопами плутония. Для удобства сравнения полученных результатов некоторые виды растительности объединены в группы, согласно группированию в отчетах МАГАТЭ.

Таким образом, K_n для изотопов плутония находятся в пределах $n \times 10^{-7} - n \times 10^{-1}$. При этом рекомендованные МАГАТЭ значения коэффициентов накопления растительностью изотопов плутония хорошо согласуются с данными его накопления для территорий, подверженных глобальным выпадениям и находятся в пределах видовых вариаций. Однако в целом для плутония глобального происхождения наблюдаются более низкие средние значения коэффициентов накопления в сравнении с рекомендованными МАГАТЭ для грибов, мхов и лишайников, в то время как для травянистой растительности и кустарников — более высокие.

Для загрязненных территорий K_n плутония существенно выше, чем рекомендованные МАГАТЭ и полученные на территории, подверженной глобальным выпадениям. Например, экспериментальные данные $K_n^{239+240}\text{Pu}$ растительностью, полученные при исследованиях, проведенных на территории бывшего СИП, выше обобщенных данных МАГАТЭ на 1–2 порядка для многих с/х культур.

На два порядка выше K_n плутония для травянистой растительности территории, подверженной чернобыльским выпадениям. Однако для мхов и лишайников средние значения коэффициентов накопления соизмеримы с данными МАГАТЭ. В то время как наблюдаются более высокие K_n для кустарников, сопоставимые с K_n для кустарников, произрастающих на территории, подверженных глобальным выпадениям.

Поглощение изотопов плутония корнями растений не представлено в отчетах МАГАТЭ, однако довольно хорошо изучено для загрязненных территорий. В целом наибольшие коэффициенты накопления характерны для корневой системы, в меньшей степени плутоний накапливается в наземной части, в наименьшей — в плодах и зернах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что представленные данные коэффициентов накопления для изотопов плутония дополняют базу данных МАГАТЭ, содержат новые данные по K_n для некоторых видов растительности и их органам.

Значения коэффициента накопления изотопов плутония растительностью весьма изменчивы и охватывают шесть порядков величины. При этом для территории, подверженной гло-

бальным выпадениям, коэффициент накопления существенно ниже, чем для загрязненной.

На основе имеющегося набора данных трудно определить степень зависимости K_n плутония от вида растений. Распределение изотопов плутония по вегетативным органам неодинаково.

На K_n плутония растительностью может оказывать влияние множество факторов, такие как типы и виды растений, рассматриваемый вегетационный орган, типы почв, климат, методы ведения сельского хозяйства, а также формы поступления изотопов плутония в окружающую среду.

Несмотря на довольно большой объем информации по коэффициентам накопления плутония в растения, имеющихся данных пока недостаточно для полного понимания процессов миграции плутония в системе “почва–растение” и факторов, влияющих на них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clark D.L., Geeson D.A., Hanrahan R.J. Environmental Chemistry of Plutonium. The Plutonium Handbook. 2nd ed. V. 4. Publisher: American Nuclear Society, 2019. 3314 p.
2. Асеев А.Г., Субботин С.А. Оценка и сравнение потенциальной опасности плутония // Изв. Вузов. Ядерная энергетика. 1999. № 2. С. 39–47. [Aseev A.G., Subbotin S.A. Assessment and comparison of the potential hazard of plutonium // Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika. 1999. V. 2. P. 39–47 (In Russ.)]
3. International Atomic Energy Agency (IAEA). Safe Handling of Radionuclides. Safety Series. V. 1. Vienna, 1973. 93 p.
4. Mollah A.S. Radionuclide Uptake from Soil to Plants: Influence of Soil Classification // Radionuclide Contamination and Remediation Through Plants. 2014. P. 55–89.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-07665-2_3
5. Barnett C.L. et al. Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. IAEA-TECDOC-1616. IAEA, 2009.
6. International Atomic Energy Agency (IAEA). Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical Reports Series No. 472. Vienna: IAEA, 2010. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs472_web.pdf.
7. International Atomic Energy Agency (IAEA). Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer to Wildlife. Technical Reports Series No. 479. Vienna: IAEA, 2014. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Trs479_web.pdf.
8. Соколик Г.А., Овсянникова С.В., Войникова Е.В., Попеня М.В. Современное состояние и подвижность плутония и америция чернобыльского выброса в почвенно-растительном покрове // Мед.-биол. пробл. жизнедеят. 2011. № 1 (5). С. 197–184. [Sokolik G.A., Ovsyannikova S.V., Voinikova E.V., Stump M.V. Current state and mobility of plutonium

- and americium from the Chernobyl release in the soil and vegetation cover // *Medico-biological Problems of Life*. 2011. V. 1. № 5. P. 197–184 (In Russ.)]
9. Научно-технический отчет о выполнении 4 этапа Государственного контракта № 14.740.11.1047 от 23 мая 2011 г. Дополнение от 19 марта 2012 г. № 1. Доступно по: <http://www.geokhi.ru/PublishingImages/>. [Scientific and technical report on the implementation of the 4th stage of the State Contract № 14.740.11.1047 of May 23, 2011 Addition of March 19, 2012. № 1. Available at: <http://www.geokhi.ru/PublishingImages/> (In Russ.)]
 10. Уоттерс Р.Л., Эджинтон Д.Н., Хаконсон Т.Э. и др. Трансурановые элементы в окружающей среде / Под ред. У. С. Хэнсона; Пер. с англ. Г.Н. Романова. М.: Энергоатомиздат, 1985. 344 с. [Watters R.L., Edginton D.N., Hackonson T.E. et al. Transuranic elements in the environment / Ed. U.S. Hanson: Translat. Engl. G.N. Romanov / Ed. R.M. Alexakhin. M.: Energoatomizdat, 1985. 344 p. (In Russ.)]
 11. Жерин И.И. Химия тория, урана, плутония: Учебное пособие. Томск: ТПУ, 2010. 147 с. [Zherin I.I. Chemistry of thorium, uranium, plutonium: A tutorial. Tomsk: TPU, 2010. 147 p. (In Russ.)]
 12. Carini F. Radionuclide transfer from soil to fruit // *J. Environ. Radioact.* 2001. V. 52. № 2. P. 237–279.
 13. Ishii N., Takeda H., Uchida S. Migration behavior of [1, 2–¹⁴C] sodium acetate in a flooded soil // *Radio-prot.* 2009. V. 44. № 5. P. 547–551 27.
 14. Алексахин Р.М. и др. Сельскохозяйственная радиоэкология. Экология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М., 1992. [Alexakhin R.M., Korneev N.A. Agricultural radioecology. Ecology. M., 1992 (In Russ.)]
 15. Лукашенко С.Н. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Вып. 3. Т. 2. Павлодар: Дом печати, 2011. [Lukashenko S.N. Topical issues of radioecology of Kazakhstan. Issue. 3. V. 2. Pavlodar: Dom pechati, 2011 (In Russ.)]
 16. Kozhahanov 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.
 17. Larionova N.V., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M. et al. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site // *J. Environ. Radioact.* 2018. V. 186. P. 63–70.
 18. Sokolik G., Ovsiannikova S., Ivanova T. & Leinova S. Soil–plant transfer of plutonium and americium in contaminated regions of Belarus after the Chernobyl catastrophe // *Environ. Int.* 2004. V. 30. № 7. P. 939–947. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.003>
 19. 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. 173–174. P. 375–384. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04741-7](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04741-7)
 20. Шуранкова, О.А. Поступление трансурановых элементов (²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ²⁴¹Am) Чернобыльского происхождения в луговую растительность // Пробл. здоровья и экологии. 2006. № 1 (7). С. 67–71. [Shurankova O.A. Input of transuranium elements (²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ²⁴¹Am) of Chernobyl origin into meadow vegetation // *Problems of health and ecology*. 2006. № 1 (7). P. 67–71 (In Russ.)]
 21. Спиоров 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. [Spirov R.K., Nikitin A.N., Cheshik I.A., King R.A. Accumulation of transuranium elements by aboveground and underground organs of vascular plants // *Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2017. V. 61. № 2. P. 51–57 (In Russ)]
 22. Тагай С.А. Параметры перехода ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в сельскохозяйственные культуры // Современные проблемы радиобиологии: Мат. Междунар. науч. конф., Гомель, 23–24 сентября 2021 года. Минск: Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь, 2021. С. 166–169. [Tagay S.A. Parameters of the transition of ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu into agricultural crops. Modern problems of radiobiology: Proceedings of the international scientific conference, Gomel, September 23–24, 2021. Minsk: Information and Computing Center of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus, 2021. P. 166–169 (In Russ)]
 23. Пузан Н.А., Кудряшов В.П., Аммон А.А. Поступление ТУЭ в травянистые растения на радионуклидно загрязненных территориях прилегающих к ЧАЭС // БГУ <https://elib.bsu.by/handle/123456789/17850>. [Puzan N.A., Kudryashov V.P., Ammon A.A. The entry of TUE into herbaceous plants in radionuclide contaminated areas adjacent to the Chernobyl NPP // *BGU https://elib.bsu.by/handle/123456789/17850* (In Russ)]
 24. Лукашенко С.Н. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Вып. 5. Павлодар: Дом печати, 2015. 356 с. [Lukashenko S.N. Topical issues of radioecology of Kazakhstan. Issue. 5. Pavlodar: Dom pechati, 2015. 356 p. (In Russ.)]
 25. Умаров М.А., Лукашенко С.Н., Мошков А.С. и др. Исследование площадного радиоактивного загрязнения испытательной площадки “Опытное поле” (2012–2014 гг.) // Вестн. НЯЦ РК. 2016. № 1. С. 142–149. [Umarov M.A., Lukashenko S.N., Moshkov A.S. et al. Study of the areal radioactive contamination of the test site “Experimental field” (2012–2014) // *NNC RK Bull.* 2016. V. 1. P. 142–149 (In Russ.)]
 26. Lehto J., Vaaramaa K. & Leskinen A. ¹³⁷Cs, ^{239,240}Pu and ²⁴¹Am in boreal forest soil and their transfer into wild mushrooms and berries // *J. Environ. Radioact.* 2013. V. 116. P. 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.08.012>
 27. Outola I., Pehrman R. & Jaakkola T. Effect of industrial pollution on the distribution of ¹³⁷Cs in soil and the soil-to-plant transfer in a pine forest in SW Finland // *Sci. Total Environ.* 2003. V. 303. № 3. P. 221–230. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00402-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00402-3)
 28. Ni Y., Wang Z., Zheng J. et al. The transfer of fallout plutonium from paddy soil to rice: A field study in Japan // *J. Environ. Radioact.* 2019. V. 196. P. 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.10.010>

29. Лукашенко С.Н., Эдомская М.А. Плутоний в окружающей среде: источники, механизмы распространения, концентрации // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61. № 4. С. 394–424. [Lukashenko S.N., Edomsкая M.A. Plutonium in the environment: sources, dissemination mechanisms, concentrations // Radiation biology. Radioecology. 2021. V. 61. № 4. P. 394–424 (In Russ.)]
30. Дементьев Д.В., Болсуновский А.Я. Накопление радионуклидов в ягодных кустарниках лесных экосистем бассейна реки Енисей / Изв. Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 1–4. С. 990–992. [Dementiev D.V., Bolsunovskiy A.Ya. Accumulation of radionuclides in berry bushes of forest ecosystems of the Yenisei River basin // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2011. V. 13. № 1–4. P. 990–992 (In Russ.)]
31. Carini F. Radionuclide transfer from soil to fruit // J. Environ. Radioact. 2001. V. 52(2-3):237–279. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(00\)00035-7](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(00)00035-7)
32. Горяченкова Т.А., Собакин П.И., Чевычелов А.П. и др. Содержание радионуклидов в почвах и биоте зоны воздействия аварийного подземного ядерного взрыва “кратон-3”, Якутия // Геохимия. 2017. № 7. С. 644–652. [Goryachenkova T.A., Sobakin P.I., Chevychelov A.P. et al. Content of radionuclides in soils and biota of the area affected by the accidental underground nuclear explosion Kraton-3, Yakutia // Geochem. 2017. V. 7. P. 644–652. (In Russ.)] <https://doi.org/10.7868/S0016752517070056>

The Plutonium Uptake by Plants (Review)

A. A. Shupik^a, M. A. Edomsкая^a, B. I. Synzynys^b, and K. E. Shavrina^{a, #}

^aRussian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

^bObninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia

[#]E-mail: shavrina2000@gmail.com

The article summarizes information on the accumulation of plutonium by plants. The factors influencing the process of plutonium migration in the “soil-plant” system are considered. A review is given of plutonium transfer factors by plants as quantitative indicators of migration. It is shown that the plutonium transfer factors by plants are very variable and cover six orders of magnitude. It is noted that for a territory subject to global fallout, the transfer factors of plutonium are significantly lower than for a polluted one. For this, special publications of the IAEA, publications on the study of the accumulation of plutonium for background territories and territories subject to radioactive contamination, were considered. The data on the influx of plutonium into various agricultural crops grown at the Semipalatinsk test site are given. Transfer factors of plutonium by agricultural crops are in the range $n \times 10^{-5} - n \times 10^{-1}$ for the territory of the Semipalatinsk test site. Literature data on the accumulation of plutonium by wild vegetation growing in the Chernobyl fallout territory, etc. are considered. Transfer factors of plutonium by herbaceous vegetation for the territory of Chernobyl fallout are at the level of $n \times 10^{-2}$. The article summarizes and presents information on the plutonium transfer factors by various plants organs. In general, based on the analysis of literature data, the plutonium transfer factors are in the range $n \times 10^{-7} - n \times 10^{-1}$.

Keywords: plutonium, soil-plant system, transfer factor, plants organs, migration, migration factors, global fallout, contaminated areas