

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РАСТВОРЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ КОМПОНЕНТЫ
ВЫПАДЕНИЙ В ПОЧВАХ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

А. А. Одинцов

ГСП «Техноцентр», Чернобыль

Методом последовательных экстракций изучено перераспределение основных долгоживущих радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{244}Cm между «горячими» топливными частицами и различными компонентами поглощающего почвенного комплекса в ближней зоне ЧАЭС на западном и северо-западном следах радиоактивных выпадений. Показано, что в дерново-подзолистой песчаной почве поймы р. Припять на северо-западном следе выпадений более 85 % ^{90}Sr , 55 % $^{239+240}\text{Pu}$, 75 % ^{241}Am и ^{244}Cm связано с различными компонентами поглощающего почвенного комплекса и находится в потенциально мобильных формах. На узком западном следе выпадений трансформация (растворение) топливных частиц находится в пределах 15 – 20 %. Одним из основных факторов, влияющих на степень трансформации топливных частиц, являются их физико-химические свойства.

Введение

Радиоактивное загрязнение почв ближней зоны ЧАЭС продуктами деления и трансурановыми элементами (ТУЭ) обусловлено их выпадениями в составе диспергированного ядерного топлива 4-го блока ЧАЭС. Согласно [1] выброс формировался в течение 9 сут в процессе горения графита, окисления поврежденного топлива и выноса радиоактивных продуктов за пределы реактора. По существующим на сегодняшний день представлениям с крупными частицами связано лишь 25 % активности выброса. Остальная его часть характеризуется более мелкими (несколько микрон) частицами, эта форма выброса существенно более многообразна как по радионуклидному составу, так и составу носителя.

Изучению радионуклидного, элементного и дисперсного состава чернобыльских «горячих» частиц посвящен ряд работ [2 - 4]. «Горячие» частицы чернобыльского происхождения обычно делят на две основные группы: 1) моно- или биеlementные частицы, содержащие один или несколько гамма-излучающих легколетучих радионуклидов и практически не содержащие уран, 2) фрагменты облученного топлива (диоксид урана), содержащие продукты деления и ТУЭ [3]. В [4] показано, что в пробах почвы, отобранных в 1986 - 1990 гг. в 30-километровой зоне ЧАЭС вклад «горячих» частиц в активность верхних слоев почвенных образцов составлял 86 – 93 % и в общую активность 70 – 73 %. Нейтронно-активационным анализом определено содержание в «горячих» частицах циркония, железа, кремния, марганца, алюминия, магния, молибдена и других элементов, содержание урана находилось в пределах 0,006 – 8,6 %.

Под влиянием внешних факторов (атмосферные осадки, почвенный раствор, воздействие микромицет и др.) в почве происходит выщелачивание радионуклидов из топливных частиц и растворение урановой матрицы.

Выщелачиванием проб почвы 30-километровой зоны ЧАЭС растворами различного состава с целью определения доли радионуклидов, связанных и не связанных с топливными частицами, установлено, что в песчаной почве произошло весьма существенное разложение топливных частиц [5]. За время, прошедшее после аварии (1989 г.), не менее 60 % топливных частиц в песчаной почве (западный след выпадений, удаление от ЧАЭС 13,5 км) разложилось и ^{144}Ce оказался связанным с аморфными соединениями, а также сорбированным на компонентах почвы. Для проб с высоким содержанием органического вещества (расстояние от ЧАЭС 5 км) показано, что только 4 % ^{144}Ce переходит в выщелачивающие растворы. Обнаружение в исследуемых пробах подвижных форм радионуклидов свидетельствует о процессе разложения топливных частиц.

В работе [6] показано, что по данным выщелачивания ^{144}Ce и ^{154}Eu растворами различного состава можно полагать, что разрушилось не менее 20 % топливных частиц в

пробе вертикального разреза с глубины 1,0 – 2,0 см, отобранной в районе «Рыжего леса» в 1991 г.

Сделано предположение, что такому разрушению в первую очередь должны подвергаться мелкодисперсные частицы облученных оксидов урана, имеющие рыхлую структуру и пониженную прочность.

Оценка скорости растворения топливных частиц в почвах ближней зоны ЧАЭС по скорости образования обменных форм ^{90}Sr (определяемых экстракцией 1М ацетатом аммония) сделана в [7]. Для западного и юго-западного секторов загрязнения константа скорости выщелачивания ^{90}Sr находится в пределах $3 \cdot 10^{-5} - 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$ и для северо-западного - $1,1 \cdot 10^{-4} - 7,9 \cdot 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$. Было показано, что скорость выщелачивания из топливных частиц в основном зависит от свойств частиц и почти не зависит от типа почвы, кислотности почвы (рН), содержания гумуса и емкости катионного обмена.

В пробах почвы, отобранных в зоне отчуждения ЧАЭС на различных следах выпадений, была проведена оценка степени трансформации топливных частиц по количеству обменного ^{90}Sr [8]. Показано, что на западном следе радиоактивных выпадений от 27 до 70 % ^{90}Sr находилось в матрице топливных частиц. Частицы, выброшенные в других направлениях, растворились в большей степени при аналогичных почвенных условиях.

Мобильность ^{137}Cs и ^{90}Sr черновобельских выпадений в почвах Украины, Беларуси и России была определена методом последовательных экстракций в работе [9], найдено, что 40 – 98 % ^{90}Sr легко переходило в первые фракции выщелачивающих растворов (дистиллированная вода, 1 моль/л $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ рН 7, 1 моль/л CH_3COONa рН 5). Ассоциация радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr с компонентами почв, загрязненными в результате аварии на ЧАЭС, отобранных в центральной Норвегии на значительном расстоянии от эпицентра аварии, определена по модифицированной схеме последовательных экстракций. На основании полученных данных в [10] сделан вывод, что радиоактивные изотопы цезия прочно фиксированы на минеральной матрице почвы и менее 10 % могут быть мобильными.

В настоящее время практически нет данных о формах нахождения и ассоциации с различными компонентами поглощающего почвенного комплекса плутония, америция и кюрия черновобельских выпадений, первоначально ассоциированных с топливными частицами.

Цель данной работы заключается в определении степени растворения топливосо-державших радиоактивных выпадений и ассоциации радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{244}Cm с различными компонентами почвы в ближней зоне ЧАЭС на западном и северо-западном следах выпадений.

Материалы и методы

В настоящей работе при проведении последовательных обработок почвы выщелачивающими растворами за основу была принята модифицированная схема Tessier A. [11], различные варианты которой широко использовались при определении мобильных форм ^{137}Cs и ^{90}Sr черновобельских выпадений и ассоциации их с различными компонентами почвы [9, 10, 12 - 14].

Пробы почвы были отобраны летом 1995 г. на паспортизированном полигоне, расположенном в северо-западном направлении (340 °) на расстоянии 6 км от ЧАЭС (шифр СЗС 34-02), и на участке реперной сети 30 километровой зоны отчуждения, азимут 260 °, радиус 6 км (шифр ЗС 26-02). Карта-схема расположения участков пробоотбора и плотности загрязнения территории радионуклидами плутония представлена на рис. 1. Участки для определения степени трансформации топливных частиц подбирались таким образом, чтобы были примерно одинаковые следующие параметры: плотность загрязнения по плутонию, удаление от источника выброса, тип и основные свойства почв. Плотность загрязнения почвы изотопами плутония (кБк/м²) на исследуемых участках ЗС 26-02: ^{238}Pu – 92, $^{239+240}\text{Pu}$ – 200, ^{241}Pu – $1,4 \cdot 10^4$; СЗС 34-02: ^{238}Pu – 130, $^{239+240}\text{Pu}$ – 280, ^{241}Pu – $1,8 \cdot 10^4$ [15].

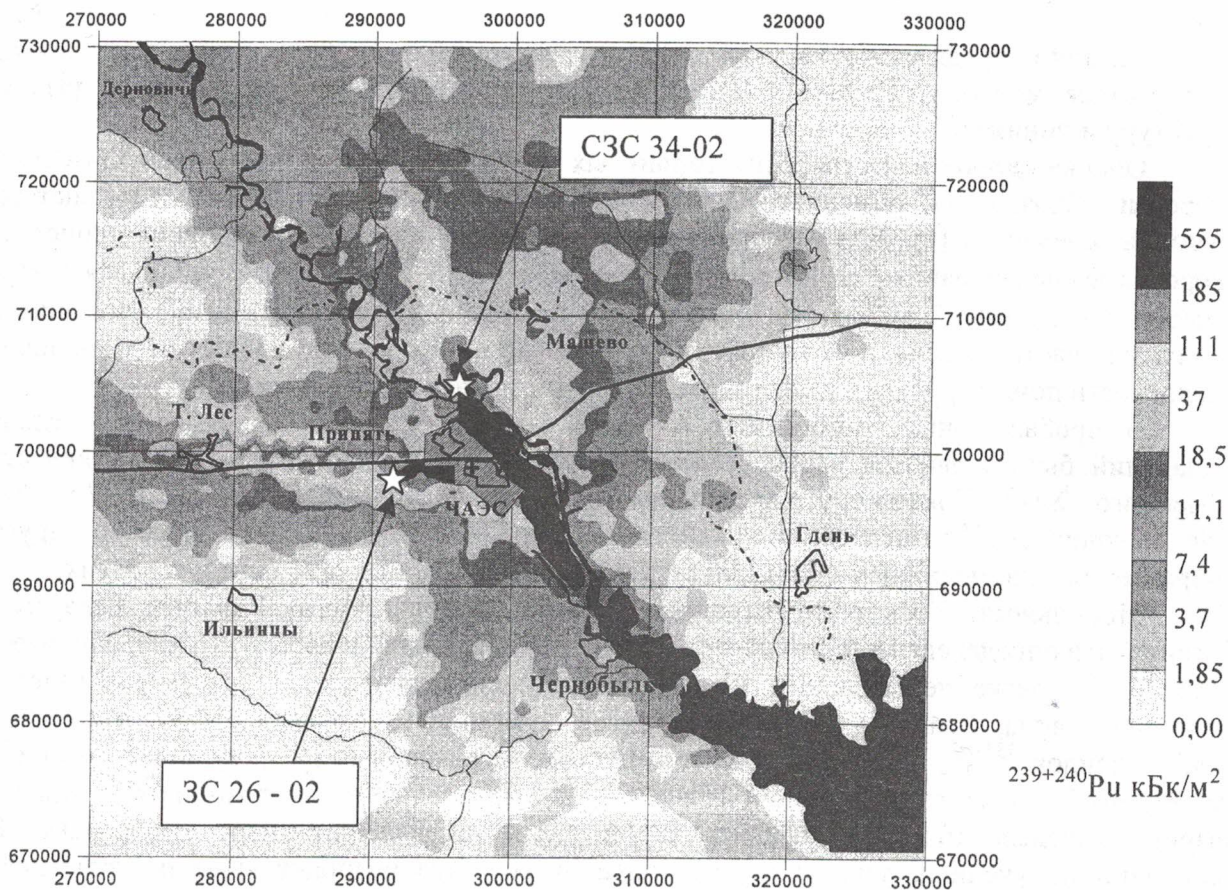


Рис. 1. Карта-схема плотности загрязнения $^{239+240}\text{Pu}$ 30-километровой зоны ЧАЭС и расположения участков пробоотбора.

Навески почвы 2,5 – 3,0 г из верхнего слоя 0 – 2 см (с каждого участка в трех повторностях) последовательно обрабатывались следующими реагентами при соотношении твердой и жидкой фаз $t : ж = 1 : 10$:

1) дистиллированной водой pH 5,6 24 ч при комнатной температуре и периодическом перемешивании (фракция I);

2) 1 моль/л $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (NH_4Ac) pH 7 2 ч при комнатной температуре (фракция II);

3) 0,04 моль/л $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ в 25 % об. CH_3COOH (HAc) в течение 6 ч при 80 °C (фракция III);

4) 0,2 моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ + 0,1 моль/л $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ pH 3,2 (раствор Тамма) 1 ч при комнатной температуре (фракция IV);

5) 30 % H_2O_2 при pH 2 (HNO_3) в течение 6 ч при 80 °C, затем 3,2 моль/л NH_4Ac в 20 % HNO_3 0,5 ч при комнатной температуре (фракция V);

6) 7 моль/л HNO_3 в течение 6 ч при 80 °C (фракция VI);

7) остаток почвы после всех экстракций озоляли при 550 °C и обрабатывался смесью 8 моль/л HNO_3 + 0,2 моль/л HF 2 ч при 95 °C с последующей обработкой HNO_3 насыщенной H_3BO_3 (фракция VII).

После 2 - 6 обработок остаток почвы промывался дистиллированной водой для удаления остатков предыдущего реагента. Супернатант отделялся от остатка почвы центрифугированием при 6000 об./мин с последующим фильтрованием через плотный бумажный фильтр.

Последовательные экстракции и радиохимическое определение радионуклидов производились в 1998 г.

Обработка почвы данными выщелачивающими растворами позволяет определить: количество водорастворимых (1) и обменных (2) форм радионуклидов, а также количество радионуклидов, связанных с оксидными формами железа и марганца (3), с полуторными оксидами железа и алюминия (R_2O_3) (4), переходящих в раствор при окислении органического вещества почвы (5), прочно фиксированных на минеральных компонентах почвы и находящихся в составе "горячих" топливных частиц (6) и (7).

Содержание ^{137}Cs в навесках почвы, выщелачивающих растворах и твердом остатке почв измеряли на гамма-спектрометрической установке на базе полупроводникового детектора серии GMX-30190 (эффективность 32,5 %, разрешение 1,89 кэВ на линии 1,33 МэВ), многоканального буфера 919 SPECTRUM MASTER фирмы ORTEC и персонального компьютера.

Радиохимическое определение содержания ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{244}Cm во всех растворах и навесках почвы производили по методике [16], позволяющей определять все радионуклиды из одной навески почвы или одной аликвоты раствора. Активность альфа-излучающих радионуклидов плутония, америция и кюрия измеряли на восьмиканальном альфа-спектрометре OSTEPC фирмы ORTEC с полупроводниковым кремниевым детектором серии ULTRA с эффективностью регистрации >25 %. Собственный фон для области энергий выше 3 МэВ не более 1 имп/ч, энергетическое разрешение 19 кэВ на линии 5486 кэВ (^{241}Am). Радиометрическое определение ^{90}Sr , после радиохимического выделения, производили с помощью бета-радиометра ROBOTRON 20046.

Агрохимические свойства почв определяли по общеизвестным методикам [17], результаты определений представлены в табл. 1. Как видно из таблицы почвы на обоих участках кислые с pH 4,8 – 5,0, содержание органического углерода находится в пределах 1 – 4 %, почва дерново-подзолистая песчаная.

Таблица 1. Агрохимические свойства почв

Почва	pH (H_2O)	$\text{C}_{\text{орг}}$, %	Ca^{2+} -обм., мг-экв./ 100 г почвы	Fe^{3+} , мг/100 г почвы	Потеря при прокаливании, %
Дерново- слабоподзолистая, песчаная (ЗС 34-02)	5,0	1,1	0,46	210	3,4
Дерново-подзолистая, песчаная (ЗС 26-02)	4,8	3,8	0,77	150	7,2

Результаты и обсуждения

Удельное содержание радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{241}Am и ^{244}Cm в пробах почв (верхний слой 0 – 2 см) определенное по 5 – 8 навескам массой 2,5 – 3 г приведено в табл. 2. Как видно из таблицы для навесок почвы, отобранной на западном следе выпадений (ЗС 26-02), наблюдается значительное до 40 – 50 % отклонение значений содержания радионуклидов в параллельных навесках почвы, обусловленное нахождением их в составе различных по размеру топливных частицах. В почве, отобранной на северо-западном следе выпадений (ЗС 34-02), разброс значений содержания радионуклидов в навесках почвы не превышает 10 – 15 % и определяется в основном погрешностью определения.

Для описания характеристик различных радиоактивных продуктов аварии на ЧАЭС чаще всего используется коэффициент фракционирования ^{95}Zr , ^{106}Ru и ^{137}Cs по отношению к тугоплавкому ^{144}Ce [1]. Также достаточно информативным в отношении происхождения продуктов аварии и режиме их образования является определение отношений активностей изотопов плутония к ^{137}Cs и ^{144}Ce . В данной работе в качестве реперных радионуклидов взяты $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$, так как они нарабатывались во время штатной работы реактора по

реакциям $^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta} ^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta} ^{239}\text{Pu}(n, \gamma)^{240}\text{Pu}$ и наиболее прочно связаны с урановой матрицей «горячих» частиц.

Таблица 2. Содержание радионуклидов в почве, Бк/г воздушно сухой почвы (слой 0 - 2см)

Шифр пробы	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$	^{238}Pu	^{241}Am	^{244}Cm
СЗС 34-02 (n = 8)	750 ± 90	220 ± 40	$10,2 \pm 1,1$	$4,9 \pm 0,5$	$11,0 \pm 1,6$	$0,63 \pm 0,07$
ЗС 26-02 (n = 5)	1570 ± 220	870 ± 360	$16,7 \pm 4,8$	$7,4 \pm 2,2$	$18,5 \pm 5,7$	$0,83 \pm 0,28$

В табл. 3 приведено отношение активностей ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{241}Am и ^{244}Cm к активности $^{239+240}\text{Pu}$. Отношения активностей радионуклидов ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm к активности $^{239+240}\text{Pu}$, за исключением ^{90}Sr , в пробах почвы хорошо согласуются с расчетными значениями по их наработке в доаварийном топливе 4-го блока ЧАЭС [18].

Таблица 3. Отношение активности радионуклидов к активности $^{239+240}\text{Pu}$ в пробах почвы, отн. ед.

Шифр пробы	^{137}Cs	^{90}Sr	^{238}Pu	^{241}Am	^{244}Cm
СЗС 34-02	74	22	0,48	1,08	0,062
ЗС 26-02	92	52	0,44	1,11	0,050
Расчет [18]	83	68	0,53	1,2	0,09

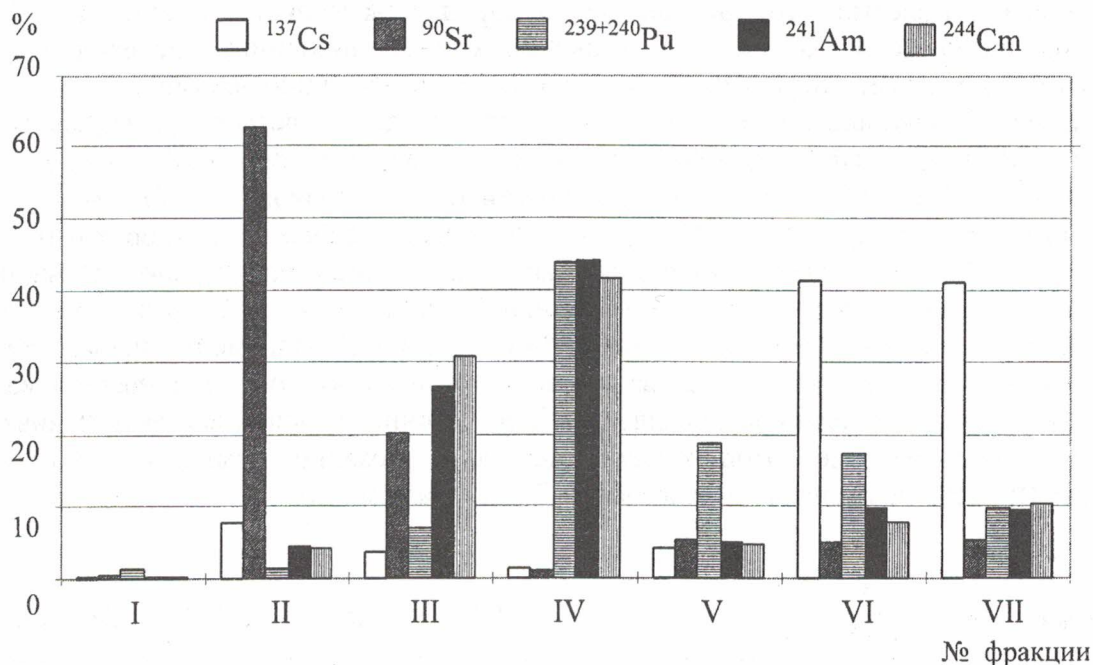
Значительный дефицит ^{90}Sr (на участке СЗС 34-02 отношение $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$ в три раза меньше расчетного) легко объясняется вертикальной миграцией ^{90}Sr в нижние слои почвенных горизонтов. Так, по данным изучения вертикального распределения радионуклидов на полигоне СЗС 34-02 в 1992 г. в верхнем слое 0 – 2 см содержалось менее 40 % ^{90}Sr , в то время как содержание ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ составляло более 85 % [19].

На рис. 2 представлены усредненные результаты последовательных обработок трех навесок почвы с каждого участка по описанной выше схеме. Содержание радионуклидов в выщелачивающих растворах приведено в процентах к суммарному содержанию во всех растворах и твердом остатке. Погрешность определения радионуклидов в выщелачивающих растворах и твердом остатке не превышала 5 – 10 %. На рисунке не показано распределение ^{238}Pu по различным фракциям (во всех пробах и растворах содержание ^{238}Pu определялось), так как оно совпадает с $^{239+240}\text{Pu}$.

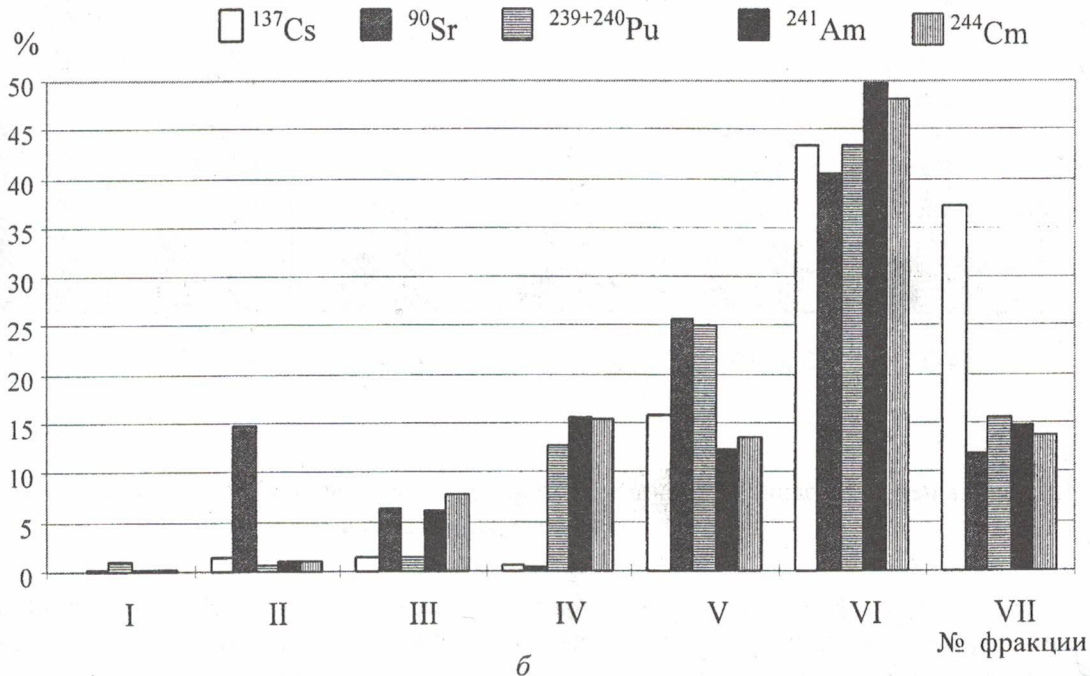
Как видно на рис. 2, а распределение различных радионуклидов по фракциям выщелачивающих растворов для проб почвы, отобранных на участке СЗС 34-02, носит специфический характер. ^{137}Cs прочно фиксирован на минеральном остатке почвы и переходит в растворимое состояние только при обработке почвы 7 моль/л HNO_3 и 8 моль/л $\text{HNO}_3 + 0,2$ моль/л HF . Количество обменных форм ^{137}Cs не превышает 10 %. Доля обменных форм ^{90}Sr составляет 60 – 65 % и порядка 20 % ^{90}Sr выщелачивается при обработке почвы 0,04 моль/л $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ в 25 % об. HAc . До 5 – 7 % ^{90}Sr переходит в фракции V, VI и VII.

Основное содержание плутония (%) приурочено к фракциям: IV – 45, V – 19, VI – 18 и VII – 10 %. Следует отметить, что доля водорастворимых форм плутония превышает все остальные радионуклиды и составляет 1,3 %. Распределение ^{241}Am и ^{244}Cm по фракциям выщелачивающих растворов в пределах ошибки определения одинаковое. С точки зрения химических свойств америция и кюрия здесь ничего неожиданного нет, так как эти элементы являются химическими аналогами. Можно было ожидать некоторых различий ввиду различной истории образования этих радионуклидов: ^{244}Cm нарабатывался во время штатной

работы реактора, а ^{241}Am на 95 % являлся продуктом бета-распада ^{241}Pu и накапливался в последующие годы. В исследуемой почве 25 – 30 % ^{241}Am и ^{244}Cm связано с оксидными формами железа и марганца (фракция III) и 40 – 45 % с полуторными окислами железа и алюминия (фракция IV).



a



б

Рис. 2. Содержание радионуклидов в выщелачивающих растворах, % от содержания в исходной пробе. I – H_2O , II – NH_4Ac pH 7.0, III – 0,04 моль/л $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ в 25 % Ac , IV – 0,2 моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ + 0,1 моль/л $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ pH 3,2, V – 30 % H_2O_2 pH 2, VI – 7 моль/л HNO_3 , VII – 8 моль/л HNO_3 + 0,2 моль/л HF (а – СЗС 34–02; б – ЗС 26–02).

Распределение радионуклидов по фракциям выщелачивающих растворов для почвы, отобранной на западном следе выпадений, показано на рис. 2, б. Наблюдается принципиальное отличие распределения радионуклидов от распределения, полученного для проб почвы, отобранных на северо-западном следе выпадений. Основное количество практически всех радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{244}Cm переходит в растворимое состояние только при обработке почвы сильным окислителем (30 % H_2O_2 pH 2 (HNO_3) при 80 °C) и 7 моль/л HNO_3 . Известно, что диоксид урана хорошо растворяется в азотной кислоте с концентрацией выше 4 моль/л, т. е. в данном случае синхронный переход в раствор радионуклидов означает растворение топливной матрицы «горячих» частиц.

На рис. 3 показана степень перехода радионуклидов в раствор при обработке проб почвы 30 % H_2O_2 pH 2 (HNO_3) при 80 °C для всех параллельных проб. Как видно на рисунке, все три пробы СЗС 34-02 растворяются практически одинаково, пробы же ЗС 26-02 растворяются отлично как от проб СЗС 34-02, так и между собой. Это говорит о том, что в пробах ЗС 26-02 присутствуют топливные частицы, которые значительно отличаются по размерам и степени окисления во время активной фазы аварии. Переход в растворимое состояние плутония при обработке почвы 30 % H_2O_2 pH 2 (HNO_3) может происходить как при разложении органического вещества почвы, так и при растворении топливной матрицы «горячих» частиц. Проведенное параллельно определение в аликвотах выщелачивающих растворов стабильных элементов кальция, железа и алюминия показало, что в раствор переходит 10 – 18 % кальция, 4 – 9 % железа и 7 – 12 % алюминия.

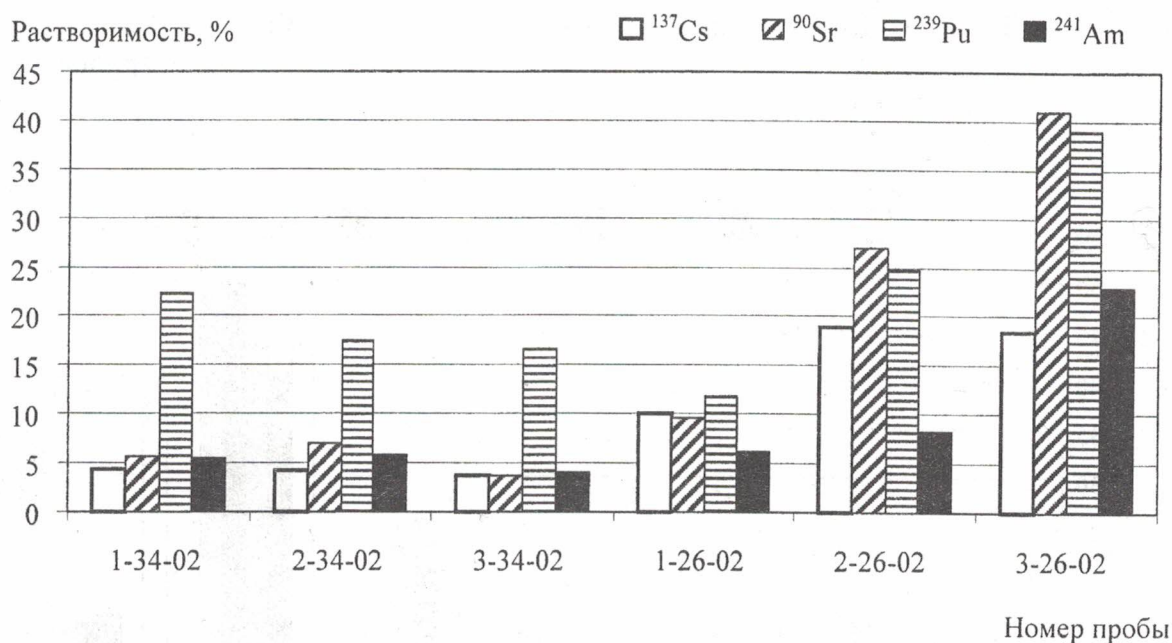


Рис. 3. Степень перехода радионуклидов в раствор при обработке проб почвы 30 % H_2O_2 (pH 2), % от исходного содержания в почве.

Степень трансформации (растворения) топливной компоненты чернобыльских выпадений можно оценить как количество радионуклидов, не связанных с топливными частицами. В данном случае предполагается, что радионуклиды, которые переходят во фракции I + II + III + IV ассоциированы с различными компонентами поглощающего почвенного комплекса и представляют растворившуюся часть топливных частиц, фракция V не учитывалась по изложенным выше причинам.

В табл. 4 представлено суммарное содержание ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в фракциях I + II + III + IV. Для северо-западного следа содержание радионуклидов изменяется от 55

($^{239+240}\text{Pu}$) до 85 % (^{90}Sr), на западном следе содержание всех радионуклидов примерно одинаковое и составляет 15 – 20 %. Следует отметить, что полученные результаты для пробы СЗС 34-02 могут давать заниженные результаты по ^{90}Sr , так как в данной работе не учитывалась миграция мобильных форм ^{90}Sr в нижние горизонты почвы (см. табл. 3).

Таблица 4. Относительное содержание радионуклидов в фракциях I + II + III + IV, % от суммарного содержания в пробе

Шифр пробы	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$	^{241}Am
СЗС 34-02	83 ± 6	54 ± 3	74 ± 5
ЗС 26-02	18 ± 4	15 ± 2	18 ± 2

Ранее сделанные [7, 8] оценки степени трансформации топливной компоненты по определению обменных форм ^{90}Sr в почвах могут давать на 20 – 30 % завышенные значения. Наиболее точную и объективную оценку степени растворения топливной компоненты радиоактивных выпадений можно сделать при определении мобильных форм всех радионуклидов различными реагентами по 3 – 4 схемам обработки проб почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатов С.А., Боровой А.А., Дубасов Ю.В., Ломоносов В.В. Форма и характеристика частиц топливного выброса на ЧАЭС // Атомная энергия. - 1990. - Т. 69, № 1. - С. 36 - 40.
2. Perkins R.W., Robertson D.E., Thomas C.W., Young J.A. Comparison of nuclear accident and nuclear test debris // Environmental contamination following a major nuclear accident. Vienna: IAEA, 1990. - Vol. 1. - P. 111 - 139.
3. Sandalls F.J., Segal M.G., Victorova N. Hot particles from Chernobyl: a review // J. Environ. Radioactivity. - 1993. - Vol. 18, No. 1. - P. 5 - 22.
4. Tcherkezian V., Shkinev V., Khitrov L., Kolesov G. Experimental approach to Chernobyl Hot particles // J. Environ. Radioactivity. - 1994. - Vol. 22, No. 2. - P. 127 - 139.
5. Кривохатский А.С., Смирнова Е.А., Rogozin Ю.М. и др. Радионуклиды в почве 30-км зоны Чернобыльской АЭС // Радиохимия. - 1991. - Т. 33, № 1. - С. 101 - 107.
6. Кривохатский А.С., Смирнова Е.А., Авдеев В.А., Трифонов В.А. Формы нахождения радионуклидов в пробах, отобранных в 30-км зоне Чернобыльской АЭС // Там же. - 1994. - Т. 36, № 1. - С. 71 - 75.
7. Konoplev A., Bulgakov A. Kinetics of radionuclide leaching from fuel particles in the soil around the Chernobyl NPP // Proceedings of the Int. Symp. in Radioecology. (Vienna, 22 - 24 Apr. 1996). - Vienna: IAEA, 1996. - P. 61 - 67.
8. Каунаров В.А., Иванов Ю.А., Зварич С.И. и др. Определение скорости растворения чернобыльских топливных частиц в естественных условиях // Радиохимия. - 1997. - Т. 39, вып. 1. - С. 71 - 76.
9. Salbu B., Oughton D. H., Ratnikov A. V. et. al. The mobility of ^{137}Cs and ^{90}Sr in agricultural soils in the Ukraine, Belarus and Russia 1991 // Health Phys. - 1994. - Vol. 67, No. 5. - P. 518 - 528.
10. Riise G., Bjornstad H.E., Lien H.N. et. al. A study on radionuclide association with soil components using a sequential extraction procedure // J. Radioanal. Nucl. Chem. Art. - 1990. - Vol. 142, No. 2. - P. 531 - 538.
11. Tessieer A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // Anal. Chem. - 1979. - Vol. 51, No 7. - P. 844 - 851.
12. Andersson K.G., Roed J. The behaviour of Chernobyl ^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{106}Ru in undisturbed soil: implications for external radiation // J. Environ. Radioactivity. - 1994. - Vol. 22, No. 3. - P. 183 - 196.
13. Strand P., Ratnikov A., Firsakova S. Time dependent changes in mobility of radionuclides in soil-water-plant systems // Environmental Impact of Radioactive Releases: Proceedings of a symposium. (Vienna, 8 - 12 May 1995). - Vienna: IAEA, 1995. - P. 689 - 691.
14. Salbu B., Bjornstad H. E., Krekling T. Determination of physicochemical forms of radionuclides deposited after the Chernobyl accident // Environmental contamination following a major nuclear accident. - Vienna: IAEA, 1990. - P. 171 - 172.

15. Агеев В.А., Выричек С.Л., Одинцов А.А. Определение плотности загрязнения почв 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС плутонием-241 // Ядерная и радиационная безопасность. - 1999. - Т. 2, № 2. - С. 28 - 41.
16. Агеев В.А., Ключников А.А., Одинцов А.А. и др. Способ определения содержания плутония, продуктов деления урана и трансурановых элементов в объектах окружающей среды. - А. с. № 1701047 SU, 1991.
17. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. - М.: Изд-во МГУ, 1970. - 479 с.
18. Герасько В.Н., Ключников А.А., Корнеев А.А. и др. Объект "Укрытие". История, состояние и перспективы. - Киев: Интерграфик, 1997. - 224 с.
19. Агеев В.А., Выричек С.Л., Левшин Е.Б. и др. Распределение трансурановых элементов в 30-км зоне ЧАЭС // Докл. АН Украины. - 1994. - № 1. - С. 60 - 66.

ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ РОЗЧИННОСТІ ПАЛИВНОЇ КОМПОНЕНТИ ВИПАДАННЯ В ҐРУНТАХ БЛИЖНЬОЇ ЗОНИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС

О. О. Одинцов

Методом послідовних екстракцій було вивчено асоціацію основних довгоіснуючих радіонуклідів ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am і ^{244}Cm з компонентами ґрунтів та «гарячими» частинками, відібраних у 30-кілометровій зоні ЧАЕС на західному та північно-західному слідах радіоактивного випадання. Показано, що в піщано-підзолистому ґрунті пойми р. Прип'ять на північно-західному сліді випадання більш ніж 85 % ^{90}Sr , 55 % $^{239+240}\text{Pu}$, 75 % ^{241}Am і ^{244}Cm пов'язано з різними компонентами поглинаючого ґрунтового комплексу й знаходиться в потенційно рухомих формах. На вузькому західному сліді випадання трансформація (розчинність) паливних частинок знаходиться в межах 15 – 20 %. Ступінь трансформації паливних часток переважно залежить від їх фізико-хімічних властивостей.

DETERMINATION OF THE DISSOLUTION DEGREE OF THE FUEL MULTIPLIER FALLING OUT IN THE CHERNOBYL NPP EXCLUSION ZONE SOILS

A. A. Odintsov

Sequential extraction techniques have been utilized in order to investigate the degree of binding or association between long-term radionuclides ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am and ^{244}Cm and different components in soil and fuel particles on the west and northwest trace of fall out in the exclusion zone of ChNPP. The results indicate that in sandy-podzolic soil of flood-lands r. Pripiyt on northwest trace a major fraction 85 % ^{90}Sr , 55 % $^{239+240}\text{Pu}$, 75 % ^{241}Am and ^{244}Cm are associated with different soil components and are easily reachable. On the narrow west trace fall out transformation (dissolution) of fuel particles is in within the bounds 15 – 20%. Degree of transformation fuel hot particles mainly depends on their physicochemical properties.

Поступила в редакцію 25.10.02,
после доработки – 24.12.02.