

Авторы считают своим долгом выразить признательность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку работы в рамках проекта 96-02-18146.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Больцман Л. Лекции по теории газов. Пер. с нем. Под ред. Б.И. Давыдова. М.: Гостехиздат, 1956.
2. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. Под ред. Р.Л. Добрушина и О.Б. Лупанова. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
3. Колмогоров А.Н. Сессия по научным проблемам автоматизации производства. М.: Изв. АН СССР, 1957, с. 66.
4. Bayes T. An essay towards solving a problem in the doctrine of changes. — *Biometrika*, 1958, v. 45, p. 293.
5. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. Пер. с англ. А.А. Харкевича. М.: Физматгиз, 1960.
6. Поплавский Р.П. Термодинамические модели информационных процессов. — *ДАН СССР*, 1975, т. 115, № 3, с. 465.
7. Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes. 1. — *Phys. Rev.*, 1931, v. 37, p. 405.
8. Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes. 2. — *Ibid.*, v. 38, p. 2265.
9. Кубо Р. Статистическая механика. Пер. с англ. А.Г. Башкирова и Е.Е. Тареевой. Под ред. Д.Н. Зубарева и Н.М. Плакиды. М.: Мир, 1967.
10. Taschdjian E. The entropy of complex dynamic systems. — *Behavioral Sci.*, 1974, v. 19, № 2, p. 97.
11. Ковалев Е.Е. Радиационный риск на Земле и в космосе. М.: Атомиздат, 1976.

Поступила в Редакцию 18.06.97

УДК 546.799:4.631.41

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПЛУТОНИЯ В ПОЧВЕ И ВОЗМОЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

*Беляев Б.Н., Гаврилов В.М., Домкин В.Д., Иванова Л.М., Тишков В.П.,
Тишкова Н.А., Цветков О.С. (Радиовый ин-т им. В.Г. Хлопина)*

В связи с высокой радиотоксичностью, большим временем жизни основных изотопов плутония и длительным пребыванием в биологических системах изучение содержания и характера распределения плутония в окружающей среде имеет важное значение для радиоэкологии. Наряду с данными о концентрации плутония в природных объектах [1—6] большое значение имеет информация об изотопном составе [7—12], который является важной характеристикой при установлении вероятного источника загрязнения и датировании загрязнения природных объектов. Действительно, плутоний отработавшего топлива АЭС [7] и оружейный [13—15] имеет специфический изотопный состав, который в обоих случаях существенно отличается от подобного в глобальных радиоактивных осадках, выпавших на землю в результате испытаний ядерных устройств [6, 13, 14]. В результате анализа содержания и изотопного состава плутония в пробах почвы и донных отложений из водоемов, взятых вблизи заводов, где перерабатывалось отработавшее топливо АЭС или нарабатывался оружейный плутоний, было обнаружено заметное количество промышленного плутония и установлено, как изменялось во времени его соотношение с концентрацией глобального плутония в исследованной местности. В некоторых работах на основе послойного исследования концентрации и изотопного состава в почве [11], донных отложениях различных водоемов [8, 9] и арктических льдах [10] сделаны важные заключения о миграции плутония в почве, речных и морских системах, геохронологии радиоактивных осадков.

Целью настоящей работы являлось определение изотопного состава и концентрации плутония в почве нескольких регионов, выяснение возможности выделения доли промышленного плутония на фоне плутония глобальных радиоактивных выпадений и идентификации на этой основе региональных источников загрязнения.

Методика анализа, отбор и подготовка проб. Наиболее эффективной методикой анализа загрязнения природных объектов плутонием является совместное использование α - и масс-спектрометрии. С помощью α -спектрометров, как правило, находится активность ^{238}Pu и суммарная активность $^{239}+^{240}\text{Pu}$, на высокочувствительном масс-спектрометре определяются изотопные отношения $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ и $^{242}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$. Эти данные дают полную картину содержания всех основных изотопов плутония в исследуемых образцах. Для определения концентрации и изотопного состава плутония в почве, донных отложениях и других объектах окружающей среды на глобальном уровне загрязнений и ниже разработана комплексная методика, основанная на использовании радиохимического и масс-спектрометрического методов с применением усовершенствованного серийного масс-спектрометра МИ-1201.

Радиохимическое определение плутония в пробах почвы основано на изотопном разбавлении с применением в качестве метки ^{242}Pu известной удельной активности и радиохимической чистоты. Схема радиохимического анализа включает растворение навески пробы почвы ($\geq 99,5\%$) фтористо-водородной кислотой с последующей обработкой соляной и азотной кислотами, извлечение плутония из полученного раствора на анионите АВ-17, его очистку от естественных радиоактивных примесей, электроосаждение на металлическом диске с последующим α - и масс-спектрометрическим определением.

Для масс-спектрометрического анализа разработан и изготовлен одномерный позиционно-чувствительный детектор ионов на основе сборки из двух микроканальных пластин с резистивно-емкостным анодом. Детектор был установлен в фокальной плоскости МИ-1201. Применение такого детектора позволило без существенной переделки аналитической части прибора преобразовать простой одноканальный масс-спектрометр в многоканальный прибор со счетной системой детектирования ионов, регистрирующей одновременно (без сканирования магнитным полем) участок масс-спектрометра с семью соседними массовыми линиями. Многоканальная регистрация повышает точность и чувствительность (приблизительно в 100—1000 раз) измерений для проб с содержанием вещества менее $1 \cdot 10^{-9}$ г, так как позволяет исключить погрешность измерений вследствие выгорания образца, нестабильности ионного тока и колебаний температурного режима ионного источника. В целом это дает возможность определять изотопный состав при ионном токе 10^{-19} — 10^{-20} А с пробами, содержащими 10^{-9} — 10^{-13} г, даже на масс-спектрометре с малым коэффициентом использования проб ($3 \cdot 10^{-5}$) [16]. Среднеквадратичное отклонение для изотопных отношений плутония не превышало 2—5%. Оптимальное количество плутония, загружаемого на испарители ионного источника, составляло 10^{-10} — 10^{-11} г, т.е. оптимальная α -активность проб по плутонию 0,2—0,02 Бк, что соответствует средней активности проб почвы 1—10 Бк/кг. При уменьшении активности плутония до 0,002 Бк в пробе массой 10 г среднеквадратичное отклонение увеличивалось до 5—10%. Пороговая чувствительность комплексной методики с масс-спектрометром с позиционно-чувствительным детектором составляет 10^{-14} г, что соответствует α -активности плутония 0,02 мБк в пробе почвы массой 10 г.

Достоверность и высокая точность получаемых результатов по комплексной методике были подтверждены в межлабораторных сличениях с участием зарубежных лабораторий (интеркалибрация) при определении плутония в стандартах МАГАТЭ и эталонных (образцовых) мерах России [17—20].

В России образцы почв были отобраны в 1992 г. на четырех участках Южного Урала в зоне воздействия на окружающую среду ПО «Маяк»:

пункт 1 (почва 1.1) — зона наблюдения, в 10 км от потенциального источника загрязнения (северо-восточное направление);

пункт 2 (три пробы: почва 2.1, 2.2 и 2.3) — зона наблюдения, в 12 км от потенциального источника загрязнения (северное направление);

пункт 3 (две пробы: почва 3.1 и 3.2) — вблизи границы восточно-уральского радиационного следа на расстоянии около 80 км от потенциального источника загрязнения (совхоз Багарякский);

пункт 4 (три пробы: почва 4.1, 4.2 и 4.3) — пойма р. Течи (в 43 км от источника загрязнения, Надырово).

Образцы почвы отбирали специальным пробоотборником (диаметр 80 мм, глубина отбираемого слоя 0—6 см) на ровных целинных участках на площади 100 м² в пяти точках по схеме конверта с шагом 10 м по периметру. Образцы объединяли в одну пробу суммарной массой около 2,5 кг для получения представительной пробы. Тип почвы: в пунктах 1 и 2 — чернозем оподзоленный, в пункте 3 — чернозем выщелоченный, в пункте 4 — лугово-черноземная. На Украине образец почвы был отобран в 1986 г. в 10-км зоне Чернобыльской АЭС (пункт 5), в Беларуси (Гомельская область) — вблизи границы 30-км зоны (пункты 6.1 — д. Крюки и 6.2 — с. Радин).

Образцы почв прошли цикл пробоподготовки — высушивание, прокаливание при 400 °С, измельчение до среднего размера зерен 9 мкм и тщательную гомогенизацию в виброшаровой мельнице. На радиохимический анализ брали навеску почвы, как правило, массой 40 г. Навеску делили на две части и растворяли. Растворы также делили на две части и анализировали, получая на выходе по два результата. Особенности и достоинство указанной схемы анализа заключаются в том, что после растворения навески пробы ($\geq 99,5\%$) априори можно полагать, что плутоний в растворе распределен равномерно. По результатам анализа параллельных навесок n -го числа проб можно определить, применив метод дисперсионного анализа, степень гомогенности плутония в почве, по данным анализа аликвот — случайную составляющую погрешности метода.

Результаты измерения и обсуждение (табл. 1—3). Массовую долю ^{238}Pu определяли исходя из отношения активности ^{238}Pu (A_{38}) к активности $^{239+240}\text{Pu}$ (A_{39+40}), используя выражение

$$^{238}\text{Pu} = (A_{38}/A_{39+40}) T_{38} [1/T_{39} + \text{Pu}(40/39)/T_{40} + \\ + \text{Pu}(41/39)/T_{41} + \text{Pu}(42/39)/T_{42}], \quad (1)$$

где $\text{Pu}(40/39)$, $\text{Pu}(41/39)$, $\text{Pu}(42/39)$ — изотопное массовое отношение $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ и $^{242}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$; T_{38-42} — период α -полураспада изотопов плутония.

Полученное радиохимическим методом отношение активности A_{38}/A_{39+40} в пробах почвы изменяется от 0,027 до 0,44. Вычисленное по формуле (1) изотопное массовое отношение $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ изменяется от $1,1 \cdot 10^{-4}$ до $3,7 \cdot 10^{-3}$ (табл. 1). Анализ показывает, что изотопный состав плутония в почве из различных регионов существенно различается. Так, $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ в проанализированных почвах изменяется от 0,049 до 0,35 (в 7 раз), отношение $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ — от 0,003 до 0,09 (в 30 раз) и $^{242}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ по сравнению с $^{242}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ глобальных атмосферных выпадений ($4,4 \cdot 10^{-3}$) — в 9 раз. Если загрязнение почвы плутонием вызвано двумя источниками, например, промышленным плутонием и плутонием глобальных выпадений (почва Южного Урала), то для выявления основного источника загрязнения целесообразно использовать $\text{Pu}(40/39)_{\text{из}}$ и $\text{Pu}(40/39)_{\text{из}}/\text{Pu}(40/39)_{\text{гл}}$ (табл. 2). Измеренное $\text{Pu}(40/39)$ в пунктах наблюдения восточно-уральского радиоактивного следа изменяется от 0,049 до 0,15, для плутония глобальных выпадений оно равно $0,176 \pm 0,014$ [11, 12].

Т а б л и ц а 1. Активность и относительный изотопный состав плутония в почве*

Пункт отбора	A_{Pu} , Бк/кг	$A_{Pu-238}/A_{Pu-239+240}$	^{238}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	$22,0 \pm 0,6$	$0,027 \pm 0,004$	$(1,1 \pm 0,4)10^{-4}$	$(4,9 \pm 0,3)10^{-2}$	$(4 \pm 1)10^{-3}$
2.1	$10,3 \pm 0,2$	$0,035 \pm 0,004$	$(1,3 \pm 0,3)10^{-4}$	$(5,4 \pm 0,3)10^{-2}$	$\leq 0,004$
2.2	$10,6 \pm 0,1$	$0,035 \pm 0,004$	$(1,4 \pm 0,3)10^{-4}$	$(5,8 \pm 0,3)10^{-2}$	$< 0,005$
2.3	$11,2 \pm 0,2$	$0,027 \pm 0,004$	$(1,1 \pm 0,4)10^{-4}$	$(6,0 \pm 0,9)10^{-2}$	$(3 \pm 1)10^{-3}$
3.1	$1,7 \pm 0,06$	—	—	$(14,0 \pm 0,4)10^{-2}$	$(3 \pm 1)10^{-3}$
3.2	$1,8 \pm 0,07$	—	—	$(16,0 \pm 0,3)10^{-2}$	$\leq 0,004$
4.1	$2,6 \pm 0,2$	—	—	$(6,0 \pm 1,0)10^{-2}$	$(4 \pm 1)10^{-3}$
4.2	$2,8 \pm 0,1$	—	—	$(5,6 \pm 0,8)10^{-2}$	$(4 \pm 1)10^{-3}$
4.3	$2,7 \pm 0,1$	—	—	$(5,6 \pm 0,5)10^{-2}$	$(3 \pm 1)10^{-3}$
5.1	700	0,44	0,0037	0,35	0,09
6.1	3,0	0,40	0,003	0,30	0,07
6.2	3,1	0,40	0,003	0,30	0,08

*Изотопный состав нормирован к ^{239}Pu ($^{239}Pu = 1$); указана суммарная (случайная и систематическая) погрешность для доверительной вероятности 0,95; пробы почвы из зоны Чернобыльской АЭС (пункт 5, 6) измерены на масс-спектрометре ТН-5, уступающем по чувствительности спектрометру МИ-1201.

Т а б л и ц а 2. Изотопное массовое отношение плутония и отношение активности промышленного плутония к активности глобальных выпадений

Пункт наблюдения, расстояние от источника, км	$Pu(40/39)_{из}$	$Pu(40/39)_{из}/Pu(40/39)_{гл}$	$A_{пр}/A_{гл}$	Вклад $A_{гл}$, %
Пункт 1; 10	$0,049 \pm 0,003$	$0,29 \pm 0,03$	175	0,6
Пункт 2; 12	$0,056 \pm 0,002$	$0,32 \pm 0,03$	35	3
Пункт 4; 43	$0,057 \pm 0,003$	$0,32 \pm 0,03$	21	5
Пункт 3; 80	$0,150 \pm 0,020$	$0,85 \pm 0,13$	0,19	84
Плутоний глобальных выпадений [11, 12]	$0,176 \pm 0,014$	1	—	100
Чернобыльская АЭС, зона:				
10-км	0,350	1,9	1000	0,1
30-км (д. Крюки)	0,303	1,7	6,1	14
30-км (с. Радин)	0,300	1,7	6,1	14
Оружейный плутоний [13—15]	0,05—0,06	0,29—0,34	1	—

Типичное изотопное массовое отношение $^{240}Pu/^{239}Pu$ для оружейного плутония согласно данным работ [13—15] находится в пределах 0,05—0,06. Измеренное изотопное массовое отношение $Pu(40/39)$ к аналогичному изотопному отношению глобальных выпадений показывает, что при $Pu(40/39)_{из}/Pu(40/39)_{гл} < 1$ загрязнение почвы вызвано в той или иной степени промышленным (стандартным) плутонием и плутонием глобальных выпадений (почва восточно-уральского радиоактивного следа). При $Pu(40/39)_{из}/Pu(40/39)_{гл} > 1$ загрязнение почвы обусловлено плутонием облученного топлива, в данном случае РБМК-1000 Чернобыльской АЭС.

Количественно отношение активности промышленного плутония к активности глобального ($A_{\text{пр}}/A_{\text{гл}}$), а следовательно, и вклад каждого из них в пунктах наблюдения восточно-уральского радиоактивного следа определяли по выражению $A_{\text{пр}}/A_{\text{гл}} = (R_{\text{гл}} - R_{\text{из}})/(R_{\text{из}} - R_{\text{пр}}) (1 + 3,675R_{\text{пр}})/(1 + 3,675R_{\text{гл}})$, где $R_{\text{гл}}$ — изотопное массовое отношение плутония глобальных выпадений $R_{\text{гл}} = \text{Pu}(40/39)_{\text{гл}} = 0,176 \pm 0,014$; $R_{\text{из}} = \text{Pu}(40/39)_{\text{из}}$ — измеренное отношение $\text{Pu}(40/39)$; $R_{\text{пр}} = R_{\text{ор}} = \text{Pu}(40/39)_{\text{ор}} = 0,05 - 0,06$ — изотопное массовое отношение оружейного плутония [13—15]; $3,675 = (T_{39}/T_{40})$ — отношение периода полураспада ^{239}Pu и ^{240}Pu .

Доля загрязнения почвы плутонием глобальных выпадений изменяется от 0,4 до 84% в зависимости от расстояния от источника загрязнения (см. табл. 2), вклад промышленного плутония в пунктах наблюдения восточно-уральского радиоактивного следа составляет от 16 до 99,6%.

Для определения вклада в загрязнение почвы плутонием (по активности) отработавшего топлива РБМК-1000 Чернобыльской АЭС была использована более сложная зависимость, основанная на данных его удельной активности и изотопного состава в почве и определении разности парциальной активности ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu в проанализированных почвах и почве, загрязненной только плутонием глобальных выпадений. Результаты вычислений показали, что вблизи границы 30-км зоны загрязнения (Гомельская обл., пункты 6.1 и 6.2) вклад глобального плутония составляет в среднем около 14% общей активности. В 10-км зоне Чернобыльской АЭС (пункт 5) активность плутония обусловлена выброшенным топливом РБМК-1000.

Для выявления зоны загрязнения и вклада плутония отработавшего реакторного топлива, особенно на значительном расстоянии от источника, целесообразно также использовать изотопные массовые отношения $\text{Pu}(41/39)_{\text{из}}$ и $\text{Pu}(42/39)_{\text{из}}$ (табл. 3). Изотопное массовое отношение $\text{Pu}(41/39)_{\text{гл}} = 0,0086 \pm 0,0017$, полученное в работе [12] по состоянию на 1976 г., скорректировано вследствие распада ^{241}Pu по состоянию на 1986 г. — $\text{Pu}(41/39)_{\text{гл}} = 0,0042 \pm 0,0009$ [11].

Т а б л и ц а 3. Изотопное массовое отношение плутония в почве и отработавшем топливе РБМК-1000

Пункт наблюдения	$\text{Pu}(41/39)_{\text{из}}$	$\text{Pu}(41/39)_{\text{из}}/\text{Pu}(41/39)_{\text{гл}}$	$\text{Pu}(42/39)_{\text{из}}$	$\text{Pu}(42/39)_{\text{из}}/\text{Pu}(42/39)_{\text{гл}}$
Чернобыльская АЭС, зона:				
10-км	0,09	21,4	0,025	6
30-км (д. Крюки)	0,07	16,7	0,04	9
30-км (с. Радин)	0,08	17,8	0,04	9
Плутоний глобальных выпадений [11, 12]	0,0042	1	0,0044	1
Оружейный плутоний [15]	0,0054	1,3	0,00043	10
РБМК-1000, выгорание топлива по урану, кг/т [7]:				
8,8	0,069	16,4	0,009	2
12,5	0,137	30,9	0,0376	8,6
15	0,157	37,3	0,0539	12,2
19,1	0,187	44,5	0,0789	17,9

Используя данные об изотопном составе плутония в почве 30-км аварийной зоны Чернобыльской АЭС, оценили степень выгорания выброшенного топлива реактора. Для этой цели в качестве опорных использовали данные изменения изотопного состава плутония от степени выгорания топлива РБМК-1000 Ленинградской АЭС (см. табл. 3). Измеренное изотопное массовое отношение $\text{Pu}(41/39)$ в почве было скорректировано на примесь ^{239}Pu и ^{241}Pu глобальных выпадений. С учетом этих поправок отношение $\text{Pu}(41/39)$ в почве Гомельской области совпало с $\text{Pu}(41/39)_{\text{из}} = 0,09$, полученным в почве ближней зоны Чернобыльской АЭС, где влияние глобального плутония пренебрежимо мало. Аналогичные оценки степени выгорания топлива Чернобыльской АЭС были сделаны по изотопному отношению $\text{Pu}(42/39)_{\text{из}}$. Средняя степень выгорания выброшенного топлива составила по урану 11 кг/т при диапазоне 10—15 кг/т, что удовлетворительно согласуется с данными работ [7, 21].

В заключение следует отметить, что комплексная методика определения изотопного состава и концентрации плутония в почве на глобальном уровне и ниже дает возможность выделить долю промышленного (стандартного) плутония и плутония отработавшего реакторного топлива Чернобыльской АЭС на фоне плутония глобальных выпадений, что позволяет определить зону регионального загрязнения окружающей среды и идентифицировать источник загрязнения. Нижний предел чувствительности методики составляет 10^{-14} г плутония в пробе, что соответствует α -активности плутония 0,02 МБк в пробе почвы массой 10 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никипелов Б.В., Романов Г.Н., Булдаков Л.А. и др. Радиационная авария на Южном Урале в 1957 г. — Атомная энергия, 1989, т. 67, вып. 2, с. 74—80.
2. Павлоцкая Ф.И., Горяченкова Т.А., Емельянов В.В. и др. Поведение $^{239,240}\text{Pu}$ в почвах на следе после аварии на Южном Урале в 1957 г. — Там же, 1992, т. 73, вып. 1, с. 32—36.
3. Aarkrog A. Inventory of Nuclear Release in the World. Advanced Course on Radioactivity, 19—28 July, 1995, Zarechny, Rusland. NATO Advanced Study Institute. RISO National Lab. Denmark.
4. La Rosa J., Ghods-Esphahani A., Veselsky J.C. e.a. Analyses of Pu Some Natural Matrix Materials. — In: Vienna: 1991, IAEA-SM/90, v. 1, p. 457—465.
5. Поспелов Ю.Н., Кузнецов Ю.В., Легин В.К. Определение плутония в почвах в районе расположения НИИАР. — Атомная энергия, 1993, т. 75, вып. 4, с. 319—324.
6. Бобовникова Ц.И., Волокитин А.А., Малахов С.Г. и др. О глобальных уровнях продуктов деления ^{239}Pu , ^{238}Pu и ^7Be в приземном слое воздуха на территории СССР. — Труды Института эксп. метеорол. Загрязнение природных сред, 1976, вып. 4(56), с. 3—21.
7. Беляев Б.Н., Бибишев Б.А., Громова Е.А. и др. Экспериментальное исследование отработавшего топлива РБМК-1000 и использование изотопных корреляций при анализе проб, отобранных в районе Чернобыльской АЭС. — Радиохимия, 1991, № 4, с. 149—160.
8. Beasley T., Ball L., Andrews J. e.a. Hanford-Derived Pu in Columbia river sediments. — Science, 1981, v. 214, № 4523, p. 913—915.
9. Scott M., Salter P., Halverson J. Transport and deposition of Pu in the ocean: evidence from gulf of Mexico sediments. — Earth and Planetary Sci. Lett., 1983, v. 63, № 2, p. 202—222.
10. Koide M., Bertinek K., Chow T. e.a. The $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ ratio, a potential geochronometer. — Ibid., 1985, v. 72, № 1, p. 1—8.
11. McCarthy W., Nicholls T. Mass-spectrometric analysis of Pu in soils Sellafield. — J. Environmental Radioactivity, 1990, v. 12, № 1, p. 1—12.
12. Krey P. Remote Pu contamination and total inventories from Rocky flats. — Health Physics, 1976, v. 30, № 2, p. 209—214.
13. Beasley T., Cooper L., Grebmeier O. e.a. Fuel reprocessing Pu in the Arctic ocean basin: evidence from mass-spectrometry measurement. — Environmental Radioactivity in the Arctic, p. 108. Ed. Strand P., Cooke A., Norwegian Protection Authority, 1995; Osteras.
14. Mitchel P., Vinto L., Dahlgaard H. e.a. Perturbation in the $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ global fallout ratio in local sediments following the nuclear accidents at Thule (Greenland) and Palomares (Spain). — Ibid., p. 339—344.
15. Gunnik R., Niday I., Simens R. A System for Plutonium Analyses by Gamma-Ray Spectrometry. Report UCRL-15577, 1974, pt. 1.

16. Беляев Б.Н., Туз В.Т., Фирсанов Г.А. Изотопный анализ трансплутониевых элементов на масс-спектрометре с одномерным позиционно-чувствительным детектором. — Приборы и техника эксперимента, 1988, № 5, с. 121—123.
17. Эталонные (образцовые) меры Российской Федерации. Сертификаты № 212/93, № 246/93, № 547/94 о метрологической аттестации эталонных (образцовых) Российской Федерации мер удельной активности радионуклидов Sr-90, Cs-137, Pu-239,240; «Почва-10/МИ1», «Почва-24/МТ-24м»; «Почва-3/МБ-3м», 1993—1994, ГНЦ «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», С.-Петербург, Россия.
18. Zvetkov O.S., Pantelev Y.A., Tischkov V.P. e.a. Analysis and assessment of the results of intercomparison runs on determination of Sr-90, Cs-137 and Pu-239,240 specific activity in soils, sampled in the vicinity of «Mayak». — In: Proc. IAEA Congress on Radiation Protection, IRPA-9, 1996, v. 2, p. 715—717.
19. Intercomparison runs of reference materials. Vienna: IAEA, 1992.
20. Broadway J., Cambless D., Khotuleva M. e.a. Final Repot Prototipe International Quality Assurance Program for Environmental Measurement. Auubuv University at Montgomery, Alabama, USA, 1996.
21. Фролов В.В. Аномальный инцидент 27—30 июня 1990 г. в объекте «Укрытие ЧАЭС». — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 3, с. 216—218.

Поступила в Редакцию 4.08.97

Р е ф е р а т ы с т а т е й

Продолжение. Начало см. на 2-й с. обложки

УДК 621.384.64

П а в л о в А.В. Метод юстировки основных параметров атомарного пучка и коррекции его пространственного положения на основе спектрального анализа излучения атомов. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 4, с. 259—266.

Рассмотрен пассивный метод юстировки атомарного пучка на основе спектрального анализа излучения атомов, позволяющий проводить прецизионную пространственную коррекцию при наведении на цель, а также осуществлять мониторинг основных энергетических и токовых параметров. Обоснован выбор спектральной линии серии Лаймана L_{α} излучения атомов пучка, возбуждаемых в процессе нейтронизации отрицательных ионов в канале ускорителя.

Проведены расчеты разрешающей способности метода, которая составляет 10—15 мкрад, и оценки параметров регистрирующей спектральной аппаратуры.

Показано преимущество использования данного метода по сравнению с активным методом теневого изображения, широко применяемым в многоконтурной сервосистеме управления и контроля пучка в ускорительных комплексах. Рис. 2, табл. 1, список лит. 7 назв.

УДК 539.173

Р ы к о в В.А., Д ь я ч е н к о П.П. Коэффициент вторичной электронной эмиссии для осколков деления с фиксированной массой и кинетической энергией. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 4, с. 266—273.

В работе приведены результаты обработки спектров электронов при прохождении осколков деления ^{252}Cf с фиксированными массой и кинетической энергией через мишень из тонкой пленки оксида алюминия. Данные получены в трехмерном эксперименте. Показано, что коэффициенты вторичной эмиссии могут быть описаны в рамках моделей эф-

фективного заряда и потерь энергии осколков деления. Тем самым подтверждено, что вторичная эмиссия связана с электронными потерями энергии, а не с ионным зарядом осколков. Полученное при этом полуэмпирическое выражение позволяет вычислять потери энергии тяжелых ионов в легкоатомных средах. Рис. 6, список лит. 13 назв.

УДК 539.173

Д ь я ч е н к о П.П., Р ы к о в В.А. Дифференциальные сечения ионизации молекул азота и диоксида углерода при бомбардировке осколками деления. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 4, с. 273—276.

В работе представлены результаты обработки экспериментальных данных о сечениях ионизации молекул азота и диоксида углерода осколками деления. Проведенное сравнение результатов измерений с расчетом по классической теории [2—4] указывает на значительное расхождение между теорией и экспериментом, гораздо большее, чем для атомов благородных газов. Рис. 2, список лит. 8 назв.

УДК 551.46:539.16

В ы с о ц к и й В.Л., С и в и н ц е в Ю.В. Анализ точности определения концентрации долгоживущих радионуклидов в морской среде. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 4, с. 276—290.

Выполнен анализ большого числа параллельных измерений радиоактивности морской воды и донных отложений. Применением дисперсионного анализа с использованием F - и t -критериев показано, что грубые ошибки присутствуют в измерениях всех лабораторий, включая MEL МАГАТЭ. Выявлено непостоянство отношения концентрации $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ в морской воде мирового океана. Рис. 4, табл. 12, список лит. 9 назв.

Окончание см. на 3-й с. обложки