

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОСКОЛОЧНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГАММА-ДОЗИМЕТРОВ

И. Ф. Моисеев, Г. А. Федоров

Полевая гамма-дозиметрия — простой и доступный способ радиологического контроля почвы и земли, в процессе которого получают первичные данные о радиоактивном загрязнении местности. Измеренное значение мощности дозы есть сумма трех компонент

$$P_{\text{изм}} = \sum_j f_{1j} \beta_j^{\text{оск}} + \sum_j f_{2j} \beta_j^{\text{ест}} + P_{\text{косм}}, \quad (1)$$

где первые два компонента обусловлены наличием в почве осколочных и естественных радионуклидов с концентрацией $\beta^{\text{оск}}$ и $\beta^{\text{ест}}$ соответственно, последний дает вклад в дозу космического излучения. Причем

$$\beta_j = \int_0^{\infty} q_j(z) dz, \quad (2)$$

где $q_j(z)$ — профиль концентрации j -го нуклида по глубине (z) почвы; коэффициент пропорциональности между показателем детектора и концентрацией j -го нуклида в почве. β_j — коэффициент пропорциональности между показателем детектора и концентрацией j -го нуклида в почве.

Для оценки мощности дозы от естественных радионуклидов ($P_{\text{ест}}$) используется модель равномерного распределения концентрации естественных радионуклидов по глубине почвы $q(z) = q_0 [1]$. Справедливо следующее соотношение:

$$P_{\text{ест}} = 2\pi \sum_{j=1}^{\infty} q_{0j} \sum_{n=1}^{\infty} E_{jn} \delta_{jn} \pi_{jn} C_{jn}^{\text{ест}}, \quad (3)$$

где q_{0j} — концентрации калия-40, урана-235 и тория-232; E_{jn} , δ_{jn} и π_{jn} — значения энергии, коэффициента истинного поглощения энергии и выхода отдельной гамма-линии; $C_{jn}^{\text{ест}}$ — функция, выражающая зависимость мощности дозы от E_{jn} и геометрических условий измерений

(высоты расположения датчика над поверхностью почвы - h , толщины верхнего слоя почвы, в котором распределены естественные нуклиды - l , угла коллимации датчика, численно равного проекции телесного угла конического коллиматора на плоскость, нормальную к границе раздела почва-воздух - ψ ; $K_{\gamma j} = \sum_n E_{jn} \delta_{jn} \rho_{jn}$ - ионизационная гамма-постоянная j -го компонента; $C_j^{ест} = \frac{\sum_n E_{jn} \delta_{jn} \rho_{jn} C_{jn}^{ест}}{K_{\gamma j}} \approx \sum_n N_{jn} C_{jn}^{ест} N_{jn}$ - эффективный дозовый спектр j -го компонента.

При $P_{ест}$, мкР/ч и φ_{oj} Ки/кг почвы формула (3) примет вид

$$P_{ест} = 6,28 \cdot 10^6 \sum_{j=1}^3 K_{\gamma j} \bar{C}_j^{ест} \varphi_{oj}. \quad (4)$$

Значения средних концентраций естественных радионуклидов для европейских почв [1], ионизационных гамма-постоянных, дозового спектра и геометрической функции при различных l и ψ приведены в табл. 1. При составлении этой таблицы использовались данные по схеме распада естественных радионуклидов [1]. Данные табл. 1 позволяют сделать вывод, что мощность дозы при $h = 1$ м практически полностью определяется гамма-излучением радионуклидов, распределенных в верхнем слое почвы толщиной 50-60 см. Известно, что при $l \geq 60$ см распределение калия, а также урана и тория [1] не имеет существенных отклонений от равномерного. Поэтому при проведении численных оценок $P_{ест}$ можно использовать данные табл. 1, соответствующие полупространству, заполненному активностью ($l = \infty$). Отсюда полученные по формуле (4) средние оценки истинного значения мощности дозы при $h = 1$ и $\psi = 90$ и 80° соответственно составляют для европейских почв 5,4 и 4,5 мкР/ч. Известно [2], что в районах высоких широт ($60 \div 90^\circ$) плотность ионизации, обусловленная космическим излучением, почти постоянна. Научный комитет ООН по действию атомной радиации рекомендует [2] для оценочных расчетов использовать значение средней ионизации на уровне моря, равное 2,14 пар ионов/см³·с при нормальных температуре и давлении, что соответствует мощности экспозиционной зоны - 3,7 мкР/ч.

При оценке мощности дозы от смеси продуктов деления учтено, что вертикальное распределение продуктов деления в почвах с удовлетворительной точностью описывается экспоненциальной формулой [3,4]

Таблица 1

Некоторые сведения о естественных радионуклидах почв, необходимые для оценки значения $P_{ест}$

j	Материнские радионуклиды	$q_j,$ Ки кг почвы	$K_{п}^*,$ Ки кг почвы, %	$K_{д/2}^2$ р.см ч.мкКи	n	$E_{jn},$ МэВ квант	$N_{jn},\%$	$C_{ест}^{***}, г/см^2$		
								$\psi = 90^\circ$		$\psi = 80^\circ$
								$z, см$	C_j	$z = \infty$
1	Калий-40	$1,07 \cdot 10^{-8}$	$7,64 \cdot 10^{-9}$ ^{ЖК}	80	1	1,46	100	5	17,5	33,4
								10	25,6	
								20	33,7	
								40	38,6	
								80	39,8	
								∞	39,9	
2	Уран-238 (в равновесии с продуктами распада)	$5,19 \cdot 10^{-10}$	$3,24 \cdot 10^{-6}$	9,52	1	0,28	8,71	5	18,9	36,4
						0,332	12,27	10	28,0	
						0,609	26,97	20	36,6	
						1,12	17,94	40	41,5	
						1,76	22,32	80	42,4	
						2,2	11,79	∞	42,6	

3	Торий-232 (в равновесии с продуктами распада)	$6,49 \cdot 10^{-10}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	9,88	1	0,24	8,55	5	19,3	40,6
					2	0,58	13,82	10	28,6	
					3	0,96	24,40	20	38,6	
					4	2,62	53,23	40	46,1	
								80	48,0	
								∞	48,5	

- Примечания:
- х) Пересчетный коэффициент от содержания радиоактивных элементов (%) к концентрации радионуклидов в Ки/кг.
 - xx) Указанное значение соответствует значению K_{II} для перехода от содержания природного калия к концентрации активности калия-40 (Ки/кг).
 - xxx) Плотность почвы принята равной $1,5 \text{ г/см}^3$.

$$q(z) = q(0)e^{-mz} = bme^{-mz}, \quad (5)$$

где m — параметр заглупления нуклидов. Для свежих выпадений $m = 15 \pm 30$ см²/г, для долгоживущего продукта деления цезия-137 в настоящее время $0,5 < m < 3$ см²/г [1,4].

Для решения практических задач весь диапазон спектра гамма-излучения продуктов деления принято разделять на несколько энергетических интервалов [5,6]. Спектр разбили на пять интервалов ($1 \leq i \leq 5$) (табл. 2), тогда

$$P_{оск} = 2\pi \sum_{i=1}^5 \sum_j b_j \sum_n E_{ijn} \delta_{ijn} n_{ijn} C_{ijn}^{оск}, \quad (6)$$

где $C_{ijn}^{оск} \equiv C_{ijn}^{оск}(E_{ijn}, h, \psi, m)$ — функция, выражающая зависимость мощности дозы от E_{ijn} , геометрических параметров h, ψ и коэффициента m . Формулу (6) можно упростить, если принять во внимание, что функция $C^{оск}$ слабо зависит от E и в пределах одного энергетического интервала ее можно считать постоянной, тогда

$$P_{оск} = 2\pi b K_{\gamma}(\tau) \bar{C}^{оск}(\tau, \psi, m), \quad (7)$$

где $K_{\gamma}(\tau) = \frac{1}{b} \sum_i \sum_j b_j \sum_n E_{ijn} \delta_{ijn} n_{ijn}$ — полная ионизационная гамма-постоянная смеси продуктов деления данного возраста; $b = \sum_j b_j$ — концентрация полной активности;

$$\bar{C}^{оск}(\tau, \psi, m) = \frac{1}{b K_{\gamma}(\tau)} \sum_i C_i^{оск} \left(\sum_j b_j \sum_n E_{ijn} \delta_{ijn} n_{ijn} \right) = \sum_i C_i^{оск} n_i'(\tau);$$

$n_i'(\tau)$ — эффективный дозовый спектр продуктов деления возраста τ [5,6]. Аналитический вид функций $\bar{C}^{оск}(E, h, \psi, m)$ приведен в табл. 4. Значение $K_{\gamma}(\tau)$ для продуктов деления урана-238 дано в работе [5], а для продуктов деления урана-235 и плутония-239 значения $K_{\gamma}(\tau)$ легко получить, используя приведенные в работе [6] значения полных активностей $Q(\tau)$ и гамма-эквивалентов $M(\tau)$ [7].

При $P_{оск}$ [мкР/ч] и b [Ки/м²] формула (7) примет вид

$$P_{оск} = 0,628 \cdot 10^6 K_{\gamma}(\tau) \bar{C}^{оск}(\tau, \psi, m) b. \quad (8)$$

При расчетах $\bar{C}^{оск}(\tau)$ был использован дозовый спектр продуктов деления урана-238 [5], но, поскольку эффективный дозовый спектр слабо зависит от типа делящегося материала-

Таблица 2

Значения функции $C^{оск}(h, E_i, \psi, m)$ для различных $E_i, m, h=1M, \psi=80^\circ$ и 90°
($1 \leq i \leq 5$)

ψ	$E_i, \text{МэВ}$ \ / $m, \text{см}^2/\text{г}$		0,3	0,5	1,0	2,0	4,0	∞
	80°	2,25		1,63	1,71	1,76	1,76	1,77
1,56			1,73	1,82	1,87	1,89	1,90	1,91
0,76			1,54	1,68	1,69	1,71	1,72	1,74
0,50			1,76	1,79	1,80	1,80	1,80	1,91
0,17 ^x			5,56	4,92	3,63	2,67	2,14	1,83
90°	2,25		2,84	3,27	3,83	4,33	4,72	5,61
	1,56		2,84	3,29	3,84	4,31	4,75	5,67
	0,76		2,54	2,98	3,56	4,04	4,43	5,34
	0,50		2,90	3,32	3,87	4,36	4,75	5,63
	0,17 ^x		10,9	11,7	12,6	13,2	13,7	14,6

^x Значения $C^{оск}$ при $E_5 = 0,17 \text{ МэВ}$ следует рассматривать как ориентировочные, так как представление фактора накопления по дозе в соответствии с формулой (12) в этом диапазоне энергии, строго говоря, не является корректным.

ла [6], приведенные в табл. 3 значения с погрешностью не хуже нескольких процентов, можно считать характерными для любых продуктов деления, там же приведены усредненные по возрасту значения $C^{оск}(\psi, m)$. Поскольку параметр заглубления радионуклидов m в определенной мере коррелирует с возрастом продуктов деления τ , в табл. 3 выделены значения $\bar{C}^{оск}(\tau, m)$, соответствующие наиболее вероятным сочетаниям этих параметров. Значения $C^{оск}$ и среднеквадратические отклонения для них получены в рамках наиболее вероятных значений $C^{оск}$.

Приведенные данные отражают сильную зависимость истинного значения мощности дозы $P_{оск}(\psi = 90^\circ)$ от параметра m при постоянном суммарном запасе радионуклидов. Однако применение даже незначительной коллимации датчика дозиметра ($\psi = 80^\circ$) позволяет практически исключить зависимость регистрируемого значения $P_{оск}$ от параметра m . Зависимость $P_{оск}$ от возраста продуктов деления определяется, главным образом, через $K_\gamma(\tau)$, функция же $C^{оск}(\tau)$ меняется с возрастом довольно слабо. Поэтому при практических вычислениях можно пользоваться значениями $C^{оск}$, усредненными по m и τ .

Очевидно, что эффективность регистрации тем выше, чем в меньшей степени коллимирован измерительный преобразователь. Поэтому максимальная чувствительность соответствует неколлимированному измерительному преобразователю. Однако погрешность определения запаса продуктов деления, который рассчитывается по формуле

$$b = \frac{P_{изм} - P_{косм} - P_{ест}}{2L K_\gamma(\tau) C^{оск}(\psi, m)}, \quad (9)$$

снижается по мере увеличения коллимации.

В качестве критерия оптимума коллимации (по аналогии с работой [8]) следует рассмотреть условия минимума функции $U = \frac{\alpha_1}{C^{оск}}$, где функция α характеризует погрешность в определении b (в рамках заданных значений $K_\gamma(\tau)$, $P_{ест}$, $P_{косм}$ при заданной погрешности $b_{\beta'}$, с которой известно значение m , т.е. в условиях приближенного знания этого коэффициента). Функция α_1 определена следующим образом:

$$\alpha_1 = \frac{1}{C^{оск}(E, \psi, m)} \frac{\partial}{\partial \beta'} (C^{оск}(E, \psi, m)) \Delta \beta', \quad (10)$$

Таблица 3

Значения функции $\bar{C}^{оск}(\tau)$ и $C^{оск}$ для различных $m, \tau, \psi = 80^\circ, \psi = 90^\circ$ и $h = 1м$

ψ	$m, \frac{см^2}{г}$ \ / τ	1g	10g	30g	70g	180g	1г	3г	5л	Среднее по возрасту $C^{оск}$
80°	0,3	2,03	2,02	1,96	2,03	1,81	1,69	1,80	1,74	1,74±0,05
	0,5	2,06	2,05	2,00	2,07	1,89	1,79	1,87	1,83	1,84±0,04
	1,0	1,94	1,95	1,93	1,94	1,82	1,76	1,83	1,79	1,83±0,06
	2,0	1,86	1,87	1,87	1,85	1,78	1,73	1,80	1,77	1,80±0,04
	4,0	1,81	1,83	1,84	1,80	1,76	1,74	1,78	1,76	1,79±0,04
	∞	1,79	1,81	1,83	1,78	1,76	1,71	1,78	1,76	1,78±0,04
90°	0,3	3,52	3,49	3,37	3,54	3,08	2,84	3,05	2,93	2,94±0,09
	0,5	4,00	3,97	3,84	4,02	3,54	3,29	3,50	3,38	3,43±0,10
	1,0	4,60	4,56	4,42	4,63	4,13	3,87	4,08	3,97	4,14±0,26
	2,0	5,09	5,05	4,91	5,12	4,62	4,35	4,57	4,45	4,67±0,27
	4,0	5,50	5,47	5,33	5,53	5,02	4,74	4,97	4,85	5,13±0,29
	∞	6,41	6,37	6,23	6,44	5,92	5,64	5,87	5,75	6,17±0,29

где $\beta' = \frac{m}{k}$; $\Delta\beta' = \delta\beta'\beta'$; κ - коэффициент ослабления гамма-излучения с энергией E в почве. Аналитический вид функции $\frac{C}{\Delta\beta'} (C^{оск}(E, \psi, m))$ приведен в табл. 4.

Были проведены расчеты функции $U(E, \psi, m)$ для ряда значений параметров ψ и m в условиях приближенного знания $m (m = m_0 \pm 0,5 m_0)$ для энергии 0,66 МэВ - значения, близком к средней энергии на гамма-квант для продуктов деления любого возраста старше 1 суток [5, 6]. Оказалось, что в области $\psi = 70-80^\circ$ при всех значениях $m (\infty, m_0, 0,3 \frac{cm^2}{g})$ обнаруживается резко выраженный справа минимум функции $U(\psi)$. Можно констатировать, что в условиях постоянного запаса продуктов деления в почве, но при изменяющемся параметре заглубления m , регистрируемая часть мощности дозы $P_{оск} (\psi = 80^\circ)$ практически будет изменяться лишь в зависимости от возраста продуктов деления, но не от m .

Коротко рассмотрим влияние погрешности в определении высоты датчика дозиметра над уровнем почвы h на точность определения β . Эта погрешность связана как с инструментальными погрешностями в определении h , так и с неровностями почвы. Введем функцию $\alpha_2(E, \psi, m, h)$ (по аналогии с приведенной работе [8] для первичного излучения)

$$\alpha_2 = \frac{1}{C^{оск}(E, \psi, m, h)} \frac{C}{\Delta\mu h} (C^{оск}(E, \psi, m, h)) \delta(\mu h) \mu h. \quad (11)$$

Аналитический вид функции $\frac{C}{\Delta\mu h} C^{оск}$ приведен в табл. 4. Соответствующие расчеты показывают, что погрешность в определении β из-за неточного знания h (значения α_2) при заданных $K_f(\tau)$ и радиационном фоне не превышает 2%, если погрешность в определении h составляет 10%. Указанное значение справедливо при любых m для $E = 0,66$ МэВ и $\psi = 90^\circ$. При использовании коллимированного датчика эта погрешность резко убывает с уменьшением ψ .

В табл. 4 приведены аналитические выражения для функций $C^{оск}$ и $C^{ест}$, связывающих запас радионуклидов в почве с их мощностью дозы. Часть приведенных соотношений (П, Ш, 1У и УШ) известна из литературы [9, 11]. При выводе соотношений рассматривали почву и воздух как среды различной плотности, но одинакового химического состава [10]. Многократное рассеяние гамма-квантов учитывали с помощью аналитического представления дозового фактора накопления точечного изотопного источника в виде

$$B_D(E, \mu x) = 1 + \mu(x)x + \frac{[\mu(x)x]^2}{7E^{2,4}}, \quad (12)$$

где x - расстояние между источником и детектором; $\mu(x)$ - коэффициент ослабления гамма-излучения с энергией E (МэВ) в рассматриваемой среде.

В табл. 4 μ - коэффициент ослабления гамма-излучения в воздухе; κ - в почве; $\beta = \frac{\mu}{\kappa} + 1$, $\beta_1 = \frac{\mu}{\kappa} \cos \psi + 1$, $E_1(x)$ и $E_2(x)$ - интегрально-показательные функции 1 и 2 порядка соответственно.

В работе [7] получены оценки погрешности в определении концентрации продуктов деления при характерном для настоящего времени уровне $\sigma \approx 1 \cdot 10^{-6}$ Ки/м², показано, что эта погрешность при неизвестном значении параметра m для "свежих" продуктов деления ($\tau < 1$ месяца, $\kappa_{\text{св}} \approx 3 \text{ р. см}^2/\text{ч} \cdot \text{МКи}$) составляет 45-55% (меньшее значение соответствует измерениям с неколлимированным датчиком). При таких уровнях загрязнения применение коллимирующих устройств не дает какого-либо выигрыша, поскольку компенсация неопределенности в геометрической функции $\text{Cock}(m)$ снижает чувствительность измерений. Для продуктов деления большого возраста ($\tau > 0,5$ года) погрешность в определении σ возрастает с применением коллиматоров до порядка 150% (около 80% без их использования). При уровнях $\sigma > 10^{-5}$ Ки/м² применение коллимированных датчиков позволяет снизить погрешность с 40-45% приблизительно до 25%. Аналогичные выводы можно сделать, если оценить значения минимальных обнаруживаемых концентраций продуктов деления. Для поискового радиометра СРП-2 ("Кристалл"), наиболее чувствительного серийного прибора пригодного для полевых дозиметрических измерений [7], можно оценить относительную флуктуацию среднего значения тока (I) через микроамперметр: $\delta(I) = (2nT)^{-1/2}$, где n - скорость счета (имп/с); $T = RC$ - постоянная времени интегрирующей цепочки.

Это соотношение справедливо и в том случае, если угол отклонения измерительного прибора пропорционален падению напряжения. При измерениях с коллимированным и неколлимированным датчиком средние значения уровня фона $P_{\text{ф}} = P_{\text{ест}} + P_{\text{косм}}$ соответственно равны 8,2 и 9,1 мкР/ч. Зная эти значения, объем кристалла $V = 6,28 \text{ см}^3$ и постоянную времени $T = 2$ с помощью соотношения $\Delta P_{\text{ф}} = \delta(I) P_{\text{ф}}$ можно получить утроенные среднеквадратические отклонения сред-

Сводная таблица геометрических функций

Номер	Распределение	Параметры	Аналитический вид функции
<u>I</u>	Экспоненциальное	h, E, ψ, m	$C_{оск} = E_1(\mu h) - E_1\left(\frac{\mu h}{\cos \psi}\right) - e^{(\beta-1)\mu h} \left[E_2(\beta \mu h) - E_1\left(\frac{\beta \mu h}{\cos \psi}\right) \right] + \frac{e^{-\mu h} (\beta-1)}{\beta} \left[1 + \frac{1 + \mu h + \frac{1}{\beta}}{-\gamma E_{2,4}} \right]$
<u>II</u>		$h, E, m, \psi = \frac{\pi}{2}$	$C_{оск} = E_1(\mu h) - e^{(\beta-1)\mu h} E_1(\beta \mu h) + \frac{\beta-1}{\beta} e^{-\mu h} \left[1 + \frac{1 + \mu h + \frac{1}{\beta}}{\gamma E_{2,4}} \right]$
<u>III</u>	Пленочное	$h, E, \psi, m = \infty$	$C_{пл}^{оск} = E_2(\mu h) - \cos \psi E_2\left(\frac{\mu h}{\cos \psi}\right) + e^{-\mu h} \left[1 + \frac{2 + \mu h}{\gamma E_{2,4}} \right] + e^{\frac{-\mu h}{\cos \psi}} \left[\cos \psi + \frac{2 \cos \psi + \mu h}{\gamma E_{2,4}} \right]$
<u>IV</u>		$h, E, m = \infty, \psi = \frac{\pi}{2}$	$C_{пл}^{оск} = E_2(\mu h) + e^{-\mu h} \left[1 + \frac{2 + \mu h}{\gamma E_{2,4}} \right]$
<u>V</u>	Равномерное в конечном слое	h, E, ψ, l	$C_{см}^{оск} = \frac{1}{\kappa} \left\{ E_2(\mu h) - E_2(\mu h + \kappa l) - \cos \psi \left[E_2\left(\frac{\mu h}{\cos \psi}\right) - E_2\left(\frac{\mu h + \kappa l}{\cos \psi}\right) \right] + e^{-\mu h} \left[1 + \frac{(2 + \mu h)}{\gamma E_{2,4}} \right] - e^{-(\mu h + \kappa l)} \left[1 + \frac{2 + \mu h + \kappa l}{\gamma E_{2,4}} \right] - e^{\frac{-\mu h}{\cos \psi}} \left[\cos \psi + \frac{(2 \cos \psi + \mu h)}{\gamma E_{2,4}} \right] + e^{\frac{-(\mu h + \kappa l)}{\cos \psi}} \left[\cos \psi + \frac{(2 \cos \psi + \mu h + \kappa l)}{\gamma E_{2,4}} \right] \right\}$
<u>VI</u>		$h, E, l, \psi = \frac{\pi}{2}$	$C_{см}^{оск} = \frac{1}{\kappa} \left\{ E_2(\mu h) - E_2(\mu h + \kappa l) + e^{-\mu h} \left[1 + \frac{(2 + \mu h)}{\gamma E_{2,4}} \right] + e^{-(\mu h + \kappa l)} \left[1 + \frac{(2 + \mu h + \kappa l)}{\gamma E_{2,4}} \right] \right\}$

<u>VI</u>	Равномерное в полупространстве	$h, E, \psi,$ $l = \infty$	$C^{ecm} = \frac{1}{\kappa} \left\{ E_2(\mu h) - \cos \psi E_2\left(\frac{\mu h}{\cos \psi}\right) + e^{-\mu h} \left[1 + \frac{(2 + \mu h)}{7E_{2,4}} \right] + e^{\frac{-\mu h}{\cos \psi}} \left[\cos \psi + \frac{(2 \cos \psi + \mu h)}{7E_{2,4}} \right] \right\}$
<u>VII</u>		$h, E, l = \infty,$ $\psi = \frac{\pi}{2}$	$C^{ecm} = \frac{1}{\kappa} \left\{ E_2(\mu h) + e^{-\mu h} \left[1 + \frac{(2 + \mu h)}{7E_{2,4}} \right] \right\}$
<u>IX</u>	$\frac{\partial C^{ock}}{\partial \beta'}$	h, E, ψ, m	$\frac{\partial C^{ock}}{\partial \beta'} = \mu h e^{(\beta-1)\mu h} \left[E_2(\beta \mu h) - \frac{E_2\left(\frac{\beta \mu h}{\cos \psi}\right) \cos \psi}{\beta_1 \mu h} \right] + \frac{e^{-\mu h}}{\beta_1^2} \left[1 + \frac{(\mu h + \frac{2}{\beta})}{7E_{2,4}} \right] -$ $- \frac{e^{\frac{-\mu h}{\cos \psi}}}{\beta_1^2} \left[1 + \frac{\left(\frac{\mu h}{\cos \psi} + \frac{2}{\beta_1}\right)}{7E_{2,4}} \right]$
<u>X</u>	$\frac{\partial C^{ock}}{\partial (\mu h)}$	h, E, ψ, m	$\frac{\partial C^{ock}}{\partial (\mu h)} = -(\beta-1) e^{(\beta-1)\mu h} \left[E_1(\beta \mu h) - E_1\left(\frac{\beta \mu h}{\cos \psi}\right) \right] - e^{\frac{-\mu h (\beta-1)}{\beta}} \left[1 + \frac{(\mu h + \frac{1}{\beta})}{7E_{2,4}} \right] +$ $+ e^{\frac{-\mu h}{\cos \psi} (\beta-1)} \left[1 + \frac{\left(\frac{\mu h}{\cos \psi} + \frac{1}{\beta_1}\right)}{7E_{2,4}} \right]$

него фона при измерениях с коллимированным и неколлимированным датчиками ($3 \Delta P_{\phi}$), которые будут соответственно равны 2,24 и 2,38 мкР/ч. Значения чувствительности легко получить с помощью соответствующих формул и данных табл. 3.

В результате получим значения b мин для "свежих" и "старых" продуктов деления соответственно: а) при измерениях с коллимированным датчиком $6,5 \cdot 10^{-7}$ и $2 \cdot 10^{-6}$ Ки/м²; б) при измерениях с неколлимированным датчиком - $2 \cdot 10^{-7}$ и $1 \cdot 10^{-6}$ Ки/м² (в последнем случае для оценок использовалось значение $C^{оск} (m) = 4,14$ - см. табл. 3).

Из нестандартных дозиметров для полевой гамма-дозиметрии могут быть рекомендованы ионизационные камеры под давлением, ионизационные камеры большого объема*, счетчики Гейгера-Мюллера с фильтром* для выравнивания хода с жесткостью. Исследованная ионизационная камера объемом 50 л имела рабочее напряжение 50 В, темновой ток $0,12 \cdot 10^{-13}$ А, ток $4,7 \cdot 10^{-15}$ А при мощности дозы 1 мкР/ч. Высокостабильный счетчик Гейгера типа В12, имеющий рабочую длину 120 мм при диаметре 17 мм, рабочее напряжение 675 В, при испытаниях дал следующие результаты: собственный фон - 184 импульса за 30 мин, чувствительность - 16 импульсов за 30 мин, при мощности дозы 1 мкР/ч изменение хода с жесткостью в пределах $0,084-2$ МэВ+(9-5)%. Погрешность, обусловленная статистическими флуктуациями собственного фона, составляет $\pm 0,5$ мкР/ч при времени измерений 30 мин.

В заключение авторы приносят благодарность заведующему кафедрой Прикладной атомной физики и радиохимии ТСХА профессору В.В. Рачинскому и доценту той же кафедры А.О. Фурману за предложенную тему исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Основы γ -спектрометрии природных сред. М., Атомиздат, 1969.
2. Иванов В.И., Моисеев А.А. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М., Атомиздат, 1974.

* Дозиметры с использованием ионизационной камеры и счетчика Гейгера-Мюллера разработаны и исследованы с участием одного из авторов статьи в Атомном институте австрийских высших школ, Вена.

3. Beck H.L. Environmental gamma radiation from deposited fission products, 1960-1964. - Health Physics, 1966, v. 12, N 3, p. 313-322.

4. Павлов В.В., Константинов И.Е., Федоров Г.А. Экспоненциальный источник как модель радиоактивных загрязнений почвы. М., Атомиздат, 1968.

5. Гусев Н.Г. Защита от гамма-излучения продуктов деления. Справочник. М., Атомиздат, 1968, с. 49-86.

6. Гусев Н.Г., Рубцов М.П., Коваленко В.В. Радиационные характеристики продуктов деления. М., Атомиздат, 1974, с.3-45.

7. Моисеев И.Ф. Определение содержания продуктов деления в почвах методами полевой гамма-дозиметрии. Методические разработки по сельскохозяйственной радиологии. Ч.Х. Изд-во ТСХА. 1975, с. 3-18.

8. Наземная γ -спектрометрия радиоактивного загрязнения местности. - "Атомная энергия", 1971, т. 31, вып. 1, с. 35-40. Авт.: Е.М. Артемов, Н.Д. Балясный, Р.М. Коган, А.Н. Пегоев, И.Н. Назаров, Ш.Д. Фридман.

9. Израэль Ю.А., Стукин Е.Д. Гамма-излучение радиоактивных выпадений. М., Атомиздат, 1967, с. 76-136.

10. Павлов В.В., Константинов И.Е. К методике расчета мощности дозы при радиоактивных загрязнениях почвы от глобальных выпадений. - В кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 8, М., Атомиздат, 1968, с. 93-101.

КОМПЛЕКТ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР ДЛЯ ВНУТРИРЕАКТОРНОЙ ДОЗИМЕТРИИ

Е. Г. Тихонов

При исследованиях радиационной стойкости полупроводников и материалов, проводимых в экспериментальных каналах ядерного реактора, необходимо знать поглощенную дозу и эффективную энергию гамма-излучения как на работающем, так и на остановленном аппарате.

В МИФИ был разработан комплект ионизационных стеночных прецизионных камер, включающий камеры со стенкой из материала с различным атомным номером Z (от 6 до 92) Для повышения точности и создания изотропной чувствитель-