

Рис. 2. Распределение (n, γ) -захватов в мишени работы [2] вдоль направления пучка протонов Z на различных расстояниях от оси пучка R (в расчете на один первичный протон и на один грамм материала мишени): — — расчет настоящей работы; \circ — экспериментальные данные [2]

Таблица 2

Среднее число (n, γ) -захватов в очень большой (практически бесконечной) мишени из природного урана, облучаемой протонами с энергией T

T , ГэВ	Данные Алемиллера и др.	Расчет настоящей работы *	
		А	Б
0,66	45	54	37 ± 4
1,0	70	96	63 ± 6
1,5	115	151	100 ± 10

* Расчет выполнен с учетом (А) и без учета (Б) деления «последскакадного» ядра.

страшения частиц в мишени выполнен методом Монте-Карло с использованием 26-групповой системы констант [11]; при этом рассматривалась реальная прямоугольная

геометрия мишени без каких-либо упрощений (в работе [4] прямоугольная мишень заменялась цилиндрической).

Расчитанное нами суммарное число (n, γ) -захватов в мишени в пределах статистических погрешностей хорошо согласуется с экспериментом [2], как видно из рис. 1, даже несколько лучше, чем результаты расчетов [4]. В то же время вычисленные и измеренные дифференциальные распределения захватов различаются примерно в 1,5 раза. Более того, если теоретические значения суммарного числа захватов во всех случаях меньше экспериментальных, то расчетные дифференциальные распределения, наоборот, превосходят экспериментальные.

Поскольку при теоретическом расчете суммарного числа (n, γ) -захватов никаких дополнительных предположений не делается (просто суммируются все случаи захватов при любых R и Z), то обнаруженное расхождение с экспериментом, по нашему мнению, указывает на противоречие между интегральными и дифференциальными данными работы [2] и на необходимость более тщательной нормировки этих данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Накахара И., Такахани Х. Атомная энергия, 1979, т. 47, вып. 2, с. 83.
2. Васильков Р. Р. и др. Там же, 1978, т. 44, вып. 4, с. 329.
3. Барашенков В. С. и др. Там же, 1974, т. 37, вып. 6, с. 475.
4. Барашенков В. С. ЭЧАЯ, 1978, т. 9, с. 871.
5. Барашенков В. С., Тонеев В. Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. М., Атомиздат, 1972.
6. Ильинов А. С., Черепанов Е. А. Препринт ИЯИ Р-0064. М., 1977.
7. Pijon A. e.a. Z. Phys., 1978, Bd A287, S. 37.
8. Hahn R., Bertini H. Phys. Rev., 1972, v. C6, p. 660.
9. Alsmiller R. In: Proc. of the Inform. Meeting on Accelerator-Breeding. BNL, 18-19 Jan. 1977, BNL CONF-770107.
10. Barashenkov V., Shmakov S. JINR communication E2-12902, Dubna, 1979.
11. Абегян Л. П. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.

Поступило в Редакцию 12.08.80

УДК 621.039.553.5

Коэффициенты качества электронного излучения при внутреннем облучении человека

ПОПОВ В. И., САВИНСКИЙ А. К., КУЛЯМИН В. А., АНДРЕЕВА Л. С.

Поглощенная доза за счет инкорпорированных радионуклидов в основном обусловлена β -излучением, конверсионными электронами и электронами Оже (в некоторых случаях до 80—90%). При оценке эквивалентной дозы внутреннего облучения коэффициенты качества электронов всех энергий Q принимают равным единице за исключением β -излучения трития, для которого рекомендовано $Q = 1,7$ [1]. Однако поскольку для заметной доли дозы электронов с энергией порядка единиц или десятков кэВ линейная передача энергии (ЛПЭ) более 3,5 кэВ/мкм ($Q = 1$), значение среднего коэффициента качества этих электронов оказывается больше единицы. Таким образом, для корректного определения эквивалентной дозы внутреннего облучения необходимо знать коэффициенты качества электронов разных энергий. Согласно рекомендациям

МКРЕ [2] и НКРЗ [3], усредненное значение коэффициента качества для излучения произвольного состава и спектра определяется соотношением

$$\bar{Q} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} D(L_{\infty}) Q(L_{\infty}) dL_{\infty}, \quad (1)$$

где D — поглощенная доза излучения; $D(L_{\infty})$ — распределение поглощенной дозы по ЛПЭ (L_{∞}); $Q(L_{\infty})$ — регламентированная зависимость коэффициента качества Q от ЛПЭ [2]. Были выполнены расчеты дозовых спектров ЛПЭ и \bar{Q} для моноэнергетических электронов в диапазоне энергии 100 эВ $\leq E \leq 1$ МэВ для воды, мягкой и костной тканей. Вычислены также спектры ЛПЭ и \bar{Q} для разрешенных β -спектров радионуклидов в диапазоне 18 кэВ \leq

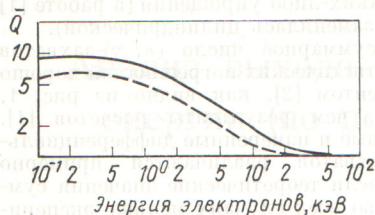


Рис. 1. Зависимость среднего коэффициента качества моноэнергетических электронов от энергии для костной (—) и мягкой (---) тканей

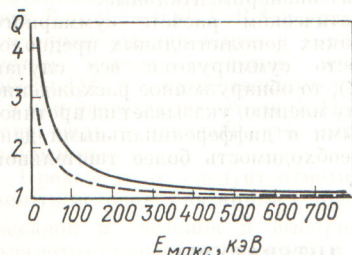


Рис. 2. Зависимость среднего коэффициента качества от максимальной энергии β -спектров разрешенных переходов радионуклидов для костной (—) и мягкой (---) тканей

$\leq E_{\text{макс}} \leq 2$ МэВ. Расчеты проведены для бесконечной однородной среды с равномерно распределенными в ней источниками электронов. Энергетический спектр флюенса электронов рассчитан в приближении непрерывного замедления. Таким образом, полученные дозовые спектры ЛПЭ относятся к спектрам типа D (L_{∞}) и соответствуют равновесным условиям облучения, которые, как правило, выполняются для β -излучателей, биологически распределенных внутри организма. В расчетах использована зависимость $L_{\infty} = f(E)$ для воды согласно рекомендациям МКРЕ [4] и соответствующие зависимости для мягкой и костной тканей, полученные посредством анализа опубликованных экспериментальных и теоретических данных [5].

Зависимость $Q(L_{\infty})$ регламентирована для водной среды, эта же зависимость принята и для расчетов коэффициентов качества для мягкой и костной тканей. Поскольку $Q(L_{\infty})$ задана всего пятью значениями, при численном интегрировании по формуле (1) использовали интерполяцию между этими значениями, линейную в логарифмическом масштабе [6].

Результаты расчетов \bar{Q} для моноэнергетических электронов по соотношению (1) приведены на рис. 1. Отметим, что хотя значения ЛПЭ электронов в мягкой ткани и воде несколько различаются, полученные коэффициенты качества для этих сред совпадают в пределах 1—2%. По приведенным данным были получены коэффициенты качества для разрешенных β -переходов ряда радионуклидов (см. таблицу) по соотношению

$$\bar{Q} = \int_E N(E) \bar{Q}(E) dE. \quad (2)$$

Здесь $N(E)$ — спектр разрешенных β -переходов для данного радионуклида согласно представлению Кюри [8]:

$$N(E) \sim pEF(Z, E)(E_{\text{макс}} - E)^2, \quad (3)$$

где p — импульс электрона энергией E ; Z — заряд дочернего ядра; $F(Z, E)$ — кулоновская поправка; $\bar{Q}(E)$ — средний коэффициент качества моноэнергетических электронов в мягкой (или костной) ткани (см. рис. 1).

Как видно из таблицы, значения средних коэффициентов качества для разрешенных β -переходов для 18 радионуклидов хорошо коррелируют с максимальной энергией спектра, что позволяет построить плавную зависимость $\bar{Q}(E_{\text{макс}})$ и использовать ее для оценки \bar{Q} спектров любых радионуклидов (рис. 2). С помощью полученных зависимостей можно легко рассчитать среднее значение коэффициента качества для суммарного электронного излучения радионуклида, зная энергию и выход конверсионных

Значения максимальной и средней энергии, среднего коэффициента качества для разрешенных β -переходов радионуклидов

Радионуклиды	\bar{E} , МэВ *	$E_{\text{макс}}$, МэВ *	\bar{Q}	
			Мягкая ткань	Костная ткань
^{132}I	0,8360	2,12	1,00	1,01
^{68}Ga	0,8348	1,898	1,00	1,01
^{32}P	0,6948	1,710	1,01	1,01
^{15}O	0,7206	1,70	1,01	1,01
^{13}N	0,4880	1,19	1,01	1,03
^{85m}Kr	0,2821	0,820	1,03	1,06
^{59}Fe	0,3404	0,804	1,03	1,06
^{18}F	0,2496	0,633	1,04	1,09
^{131}I	0,1917	0,606	1,05	1,10
^{22}Na	0,2158	0,546	1,06	1,12
^{59}Fe	0,1527	0,4750	1,07	1,15
^{131}I	0,1428	0,47	1,07	1,15
^{133}Xe	0,1006	0,346	1,11	1,23
^{131}I	0,0955	0,33	1,12	1,25
^{65}Zn	0,1414	0,325	1,12	1,25
^{59}Fe	0,0808	0,2730	1,15	1,31
^{133}Xe	0,0753	0,267	1,16	1,32
^{45}Ca	0,0756	0,252	1,17	1,34
^{131}I	0,0701	0,25	1,17	1,35
^{203}Hg	0,0580	0,213	1,21	1,42
^{35}S	0,0488	0,1674	1,27	1,54
^{85m}Kr	0,0437	0,160	1,28	1,57
^{14}C	0,0493	0,1561	1,29	1,58
^{59}Fe	0,0355	0,1300	1,35	1,71
^{63}Ni	0,0176	0,067	1,68	2,32
^3H	0,0057	0,0186	2,68	4,09

* Сведения о $E_{\text{макс}}$ и \bar{E} взяты из работы [7].

электронов и электронов Оже, а также максимальную энергию β -спектров.

В заключение отметим, что среднее значение коэффициента качества для β -спектров некоторых радионуклидов существенно больше единицы, в частности для трития \bar{Q} , полученное на основании зависимости $Q(L_{\infty})$, превышает значение, рекомендованное МКРЗ [1] с учетом радиобиологических данных. В связи с этим, по-видимому, целесообразно вернуться к вопросу о необходимости изменения существующей зависимости $Q(L_{\infty})$; возможный вариант новой зависимости был представлен в работе [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ICRP, Publication 9, London, Pergamon Press, 1966.
2. Радиационная безопасность. Величины, единицы, методы и приборы. Доклады 19 и 20 МКРЕ. М., Атомиздат, 1978.
3. Нормы радиационной безопасности (НРБ — 76). М., Атомиздат, 1978.
4. ICRU Report 16, Linear Energy Transfer, ICRU. Washington, 1970.
5. Калугина И. К., Савинский А. К., Чернова О. Н. — Радиобиология, 1979, т. XIX, вып. 1, с. 96.
6. Радиационная защита. Рекомендации МКРЗ. Публикация № 26. М., Атомиздат, 1978.
7. Dillman L. — J. Nucl. Med., Suppl. 2, 1969; Ibid., Suppl. 4, 1970.
8. Бета- и гамма-спектроскопия. Под ред. К. Зигбана. М., Физматгиз, 1959.
9. Keirim-Markus I. V., Popov V. I. — Health Phys., 1976, v. 30, p. 299.

Поступило в Редакцию 06.11.80