

С 549а
Л-33

3/IV-65
✓

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна 1965

P - 2069



В.Н. Лебедев

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЛПЭ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ФАКТОРА КАЧЕСТВА
ПРОНИКАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

P-2089

В.Н. Лебедев

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЛПЭ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ФАКТОРА КАЧЕСТВА
ПРОНИКАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

3060/2 48

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

Биологическая доза излучения и обусловленная ею степень радиационной опасности однозначно определяются, если известна поглощенная доза и коэффициент относительной биологической эффективности данного излучения (ОБЭ).

Величина поглощенной дозы, являясь чисто физической величиной, в настоящее время может быть определена самыми разнообразными физическими методами с достаточной точностью.

Коэффициент, характеризующий относительную биологическую эффективность излучения, по своему смыслу связан с деталями биохимического и физиологического действия излучения и находится тем самым вне физики. Этот коэффициент сложным образом зависит от вида излучения, его энергии, мощности дозы, фракционирования облучения, типа исследуемой биологической реакции, индивидуальных особенностей организма и от других факторов, многие из которых недостаточно хорошо изучены.

Однако при исследовании сложного многокомпонентного излучения для сравнения различных компонентов по вызываемому ими биологическому эффекту желательно иметь такой критерий, который основывался бы исключительно на физических свойствах излучения, но давал бы *a priori* теоретические величины ОБЭ, не противоречащие данным экспериментальной радиобиологии и радиационной медицины. В качестве такого критерия могут быть выбраны локальные потери энергии частиц в ткани. Экспериментально доказано, что энергия, локально поглощенная на единице длины пробега частиц (ЛПЭ), имеет первостепенное значение для биологического повреждения. С плотностью линейных потерь энергии связано понятие качества излучения, мерой которого является фактор качества. По величине фактора качества судят об ожидаемой биологической эффективности данного излучения. Непосредственное измерение фактора качества излучения является одной из наиболее актуальных, но одновременно и одной из самых трудных задач радиационной защиты и дозиметрии.

I. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРА
КАЧЕСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ

I.1. Рекомбинационный метод

Рекомендованную МКРЗ [1] зависимость фактора качества излучения от ЛПЭ можно приблизительно аппроксимировать уравнением:

$$\eta = \frac{(1+a)\theta^*}{1+a\theta^*}; \quad \theta^* > 1; \quad (1)$$

где $\theta^* = \frac{\theta}{\theta_0}$ - относительная ЛПЭ,
 $\theta_0 = 3,5$ кэв/микрон,
 $a = 0,038$ - постоянная.

Эта кривая представлена на рис.1.

В работах [2-3] показана возможность непосредственного определения фактора качества, не прибегая к измерениям спектра и состава смешанного излучения. Для этой цели используется явление колонной рекомбинации в газе тканеэквивалентной ионизационной камеры.

Эффективность сбора ионов, т.е. отношение тока ионизационной камеры при данной величине электрического поля к току насыщения, в случае колонной рекомбинации

$$f = \frac{1}{1+m\theta^*} \quad (2)$$

где m - коэффициент, зависящий от параметров газа и от напряженности электрического поля,

не зависит от мощности поглощенной дозы, но зависит от ЛПЭ частиц. Эта особенность и используется для экспериментального определения ЛПЭ и фактора качества QF .

Определим условия, при которых измеренная эффективность сбора ионов однозначно соответствует фактору качества смешанного излучения. Пусть дано некоторое распределение поглощенной дозы по ЛПЭ ионизирующих частиц - $\delta(\theta)$. Будем считать, что энергия, идущая на образование одной пары ионов, постоянна. Тогда распределение заряда $q(\theta)$, образованного частицами с различной удельной ионизацией, будет пропорционально распределению поглощенной дозы $q(\theta) = k \cdot \delta(\theta)$. (3)

Полный заряд в камере Q пропорционален полной поглощенной дозе

$$Q = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} q(\theta) d\theta = k \cdot D_n, \quad (4)$$

где D_n - поглощенная доза,

k - коэффициент пропорциональности,

θ_{\min} θ_{\max} - соответственно минимальная и максимальная удельные ионизации в спектре ионизирующих частиц.

Если рекомбинации ионов в камере колонная, то заряд, собранный на электродах камеры,

$$Q' = \int f(\theta) q(\theta) d\theta, \quad (5)$$

где $f(\theta)$ - эффективность сбора ионов из колонов с удельной ионизацией θ .

Измеренная средняя эффективность сбора ионов, созданных рассматриваемым излучением

$$\bar{f} = \frac{Q'}{Q} = \frac{\int q(\theta) f(\theta) d\theta}{\int q(\theta) d\theta}. \quad (6)$$

Соответствующая этой эффективности сбора ионов средняя удельная ионизация может быть

определена из уравнения (2), а усредненный фактор качества - из уравнения (1):

$$\bar{\eta} = \frac{(1+a)(1-\bar{f})}{m\bar{f}+a(1-\bar{f})} = \frac{\int \frac{m\theta}{1+m\theta} \delta(\theta) d\theta}{\int \frac{m(1+a\theta)}{1+m\theta} \delta(\theta) d\theta} \cdot (1+a). \quad (7)$$

Степень радиационной опасности определяется величиной биологической дозы. Биодоза смешанного излучения в свою очередь определяется суммой произведений поглощенных доз на соответствующий фактор качества: $D_B = \int \delta(\theta) \eta(\theta) d\theta$, (8)

тогда фактор качества смешанного излучения, имеющего спектр ионизационных потерь $\delta(\theta)$, будет:

$$\eta = (1+a) \frac{\int \delta(\theta) \frac{\theta}{1+a\theta} d\theta}{\int \delta(\theta) d\theta}. \quad (9)$$

Для того, чтобы измеряемая величина $\bar{\eta}$ (7) была равна истинной величине фактора качества

η (9) для любого спектра $\delta(\theta)$, должно выполняться равенство:

$$\frac{\int \theta(1+a\theta)^{-1} \delta(\theta) d\theta}{\int \delta(\theta) d\theta} = \frac{\int \theta(1+m\theta)^{-1} \delta(\theta) d\theta}{\int (1+a\theta)(1+m\theta)^{-1} \delta(\theta) d\theta}. \quad (10)$$

Как можно видеть эти уравнения тождественны при $m = a$.

При этом $\bar{\eta} = \frac{a+1}{a} (1-\bar{f})$. (II)

Выполнение требования $m = a$ не представляет трудностей, т.к. m изменяется от 0 до

∞ при изменении напряженности электрического поля. Существует такая напряженность поля,

при которой относительное количество ионов, рекомбинирующих в колонках в газе тканезквивалентной камеры, пропорционально фактору качества смешанного проникающего излучения независимо от состава и спектра ионизирующих частиц. Такой режим работы камеры можно назвать линейным режимом рекомбинации. Величина этой напряженности может быть найдена экспериментально при облучении камеры потоками частиц с известным спектром ЛПЭ. На рис.2 приведены кривые зависимости эффективности собирания ионов от величины фактора качества при различных m . В работе [4] описывается прибор, построенный на рекомбинационном принципе. Сдвоенная тканезквивалентная ионизационная камера (рис.3) помещается в поле исследуемого излучения. Электроды камеры включены попеременно таким образом, что образуют две перекрывающиеся друг друга системы. На одну систему подается достаточно высокое напряжение E_1 , обеспечивающее режим насыщения. Напряженность поля между электродами другой системы E_2 недостаточна для полного собирания ионов. Часть ионов, возникающих за счет излучения, успевает рекомбинировать. Камера наполнена смесью пропан-бутан-воздух. Давление газа в камере подбирается так, что рекомбинация ионов происходит в основном внутри колонок и сгустков ионов, образованных одной ионизирующей частицей. Пропорция смеси, чистота газа и давление не являются критичными для создания условий колонной рекомбинации. На рис.4 приведены характеристики эффективности собирания ионов в этой камере для качественно различных излучений. Независимость от мощности доз в большом диапазоне и различие эффективности собирания в соответствии с ЛПЭ свидетельствует о преобладании колонной рекомбинации. Наличие двух перекрывающихся ионизационных камер позволяет получить одновременно информацию о полной поглощенной дозе и факторе качества излучения, относящимся практически к одной и той же точке в пространстве.

На рис.5 приведена скелетная схема рекомбинационного дозиметра. Для усиления тока использовали трехкаскадный электрометрический усилитель со стопроцентной обратной связью. Для определения отношения токов разных камер применена логическая схема деления. Стрелочные приборы непосредственно показывают величину поглощенной дозы и величину фактора качества излучения. Ошибка при определении фактора качества около 30%. Прибор успешно работает как в полях обычного неимпульсного излучения, так и на пучках излучения высокой энергии, имеющих импульсный характер. К недостаткам прибора можно отнести: 1) недостаточно высокую точность, 2) невозможность определения поверхностной дозы, 3) невозможность применения для слабопроникающей радиации.

2. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗОВЫХ

РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПО ЛПЭ

При проведении радиобиологических и некоторых других исследований требуется знать не только среднее значение ЛПЭ, но и распределение поглощенной дозы по ЛПЭ, т.е. получать существенно больший объем информации.

В настоящее время известно несколько экспериментальных методов определения спектров поглощенной дозы по ЛПЭ.

2.1. Метод визуального анализа треков частиц

Распределение вторичных частиц по ЛПЭ может быть получено путем анализа их треков в ядерных фотозумльсиях, облученных в тканезквивалентном фантоме, или на фотоснимках с трековых камер, наполненных тканезквивалентной смесью [5]. В качестве критерия для отбора треков может служить их оптическая плотность или толщина трека или число просветов между зернами фотозумльсии и другие параметры трека. Этот метод весьма приближенный и дает возможность определить ЛПЭ в основном в области слабоионизирующих частиц.

2.2. Метод Росси-Розенцвейга

Суть этого метода заключается в следующем. Тканезквивалентный пропорциональный счетчик шарообразной формы с диаметром внутренней полости 100 мм наполняется тканезквивалентным газом до такого давления, что потеря энергии ионизирующей частицей в газе счетчика приблизительно соответствует потере энергии на длине в 1 микрон ткани. Энергетический спектр частиц, выбитых из стенок, будет таким же, как и в ткани. Энергия, затраченная отдельной заряженной частицей, пересекающей полость счетчика, зависит от ЛПЭ и от длины пройденного в газовой полости пути. Геометрический фактор исключается на основании статистических соображений путем последующей математической обработки кривой амплитудного распределения импульсов (при помощи соответствующей электронной схемы). Импульсы с выхода пропорционального счетчика поступают на 10 или 100-канальный амплитудный анализатор. Математический анализ амплитудного распределения базируется на предположениях, что изменение ЛПЭ на длине треков в полости счет-

чика отсутствует и что траектории частиц являются прямыми линиями. Первое условие выполняется при малом давлении в полости, второе - ограничивает применимость метода для электронов малой энергии.

Не вдаваясь в детали конструктивного устройства пропорционального счетчика и методики работы с прибором в целом, достаточно подробно освещенных в периодической литературе [6-10], укажем только на основные недостатки метода:

- 1) сложность устройства, его нетранспортабельность,
- 2) сложность обработки результатов,
- 3) ограниченность диапазона измерения для слабоионизирующих частиц,
- 4) ограниченная мощность дозы, при которой прибор работоспособен ($< 0,5$ рад/час),
- 5) большое мертвое время, ограничивающее его применение при импульсных режимах,
- 6) некоторая зависимость показаний от давления газа внутри полости.

Эти недостатки метода безусловно ограничивают его широкое распространение, но они ни в коей мере не снижают ценности и объема получаемой информации.

2.3. Рекомбинационный метод

Рекомбинационный метод, принцип которого был изложен в разделе I.I, может быть применен и для анализа дозового распределения по ЛПЭ. Характер распределения проникающего излучения по ЛПЭ сказывается на форме вольтамперной характеристики рекомбинационной камеры [3]. На рис.6 представлены определенные экспериментально вольтамперные характеристики камеры. Одна характеристика снята при облучении камеры нейтронами от $Po+Be$ источника (расчетный фактор качества 7,3). Вторая характеристика снята, когда ионизация в камере создавалась одновременно α - и γ -излучением, причем соотношение доз было так подобрано, что фактор качества этого смешанного излучения также был равен 7,3.

Обе характеристики пересекаются в точке, соответствующей линейному режиму рекомбинации. Однако при других напряженностях электрического поля эффективность собирания ионов для обоих случаев различна. Это различие вполне объяснимо физически и не выходит из рамок наших представлений о процессах, происходящих в камере. Другими словами, вид вольтамперной характеристики в области, отличной от линейного режима рекомбинации, зависит от распределения дозы излучения по удельной ионизации частиц.

Допустим, нам известны градуировочные характеристики рекомбинационной камеры, снятые для частиц, имеющих очень узкий спектр ЛПЭ в области $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$. Тогда для каждого фиксированного значения напряженности поля в камере можно определить эффективности собирания ионов, соответствующие различным ЛПЭ. Для больших эффективностей эти коэффициенты могут быть найдены по формуле Яффе, однако в общем случае необходимо определить характеристики $f(E, \theta)$ экспериментально.

Предположим, что мы измерили эффективность собирания ионов: $f_1, f_2, f_3, \dots, f_i$ для неизвестного излучения при напряженностях в камере соответственно: $E_1, E_2, E_3, \dots, E_i$. Искомое распределение излучения по ЛПЭ $\delta(\theta)$ разобьем на n диапазонов, средняя удельная ионизация в которых составляет $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$.
 Полная поглощенная доза этого излучения

$$D_n = \delta_1 \Delta \theta_1 + \delta_2 \Delta \theta_2 + \dots + \delta_n \Delta \theta_n = \int \delta(\theta) d\theta. \quad (I2)$$

Соответственно полный заряд, образованный проникающим излучением в камере,

$$Q = k \cdot D_n = q_1 + q_2 + \dots + q_n, \quad (I3)$$

где: k - постоянный коэффициент, зависящий от рода и количества газа в камере и от энергии, идущей на образование одной пары ионов.

$$q_i = k \cdot \delta_i \Delta \theta_i - \text{заряд в колонках с удельной ионизацией } \theta_i.$$

При напряженности поля E_i заряд, образованный различными частицами, будет собираться с различной эффективностью. Полный заряд $Q_i = f_{i1} q_1 + f_{i2} q_2 + \dots + f_{in} q_n$.
 Отношение собранного заряда к полному заряду, образованному излучением, т.е. измеренная эффективность собирания ионов,

$$\bar{f}_i = \frac{Q_i}{Q} = \frac{1}{D} (f_{i1} \delta_1 \Delta \theta_1 + f_{i2} \delta_2 \Delta \theta_2 + \dots + f_{in} \delta_n \Delta \theta_n); \quad (I5)$$

таким образом получены n уравнений, в которых фигурирует n неизвестных величин $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$. Решение этих уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\delta_1}{D_n} &= a_{11} f_1 + a_{12} f_2 + \dots + a_{1n} f_n, \\ \frac{\delta_2}{D_n} &= a_{21} f_1 + a_{22} f_2 + \dots + a_{2n} f_n, \\ &\dots \dots \dots \\ \frac{\delta_n}{D_n} &= a_{n1} f_1 + a_{n2} f_2 + \dots + a_{nn} f_n, \end{aligned}$$

где a_{ij} - постоянные коэффициенты, зависящие от градуировочных значений f_{ij} , от выбранных диапазонов $\Delta\theta$ и от количества диапазонов n .

Таким способом можно с помощью n измерений определить согласно этим уравнениям величину дозы, создаваемой излучением раздельно в n областях ЛПЭ, т.е. построить гистограмму $D = D(\text{ЛПЭ})$. Точность найденного таким образом распределения лимитируется точностью градуировки (разбросом градуировочных коэффициентов), точностью измерения эффективности собирания ионов f_i , а также количеством диапазонов n . По сравнению с методом Росси-Розенцвейга этот метод существенно менее точен, но охватывает область слабоионизирующих частиц и не требует применения сложной и нетранспортабельной аппаратуры.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Круг вопросов, связанных с проблемой экспериментального определения ЛПЭ-распределений, можно, по-видимому, разделить на две группы. Первая группа - это вопросы, связанные с практическим определением степени радиационной опасности в поле неизвестного смешанного излучения. В этих случаях, как правило, требуется сравнительно быстрое определение среднего по всему спектру ЛПЭ фактора качества излучения. Для решения этой группы вопросов анализ излучения по методу Росси-Розенцвейга излишне сложен. Представляется разумным рекомендовать для решения этой группы вопросов рекомбинационный метод.

Вторая группа - вопросы, связанные с проблемой биологического действия излучения с разными ЛПЭ, ревизией рекомендованных соотношений ЛПЭ-QF и т.д. Для решения этих вопросов требуется знать именно распределение поглощенной энергии по всем значениям ЛПЭ. При решении вопросов такого характера рекомбинационный метод пока, по-видимому, не сможет обеспечить требуемую точность, и предпочтение должно быть отдано методу Росси-Розенцвейга.

ЛИТЕРАТУРА

1. NBS Handbook 59 (1954).
2. Зельчинский М. Nucleonika, 7, n. 3, 175 (1962).
3. Зельчинский М. Автореферат диссертации. Публикация ОИЯИ № 1374, 1963 г.

4. Зельчинский М., Лебедев В.Н., Салацкая М.И. ПТЭ № 6, 73-76 (1964 г)
5. Handloser I. Health Physics, 2, 165 (1959).
6. Rossi H., Rosenzweig W. Radiology, 64, 404 (1955).
7. Rossi H., Rosenzweig W. Radiation Res., 2, 417 (1955).
8. Росси Х., Розенцвейг В. Материалы Международной конференции в Женеве в 1955 г., т. I4, стр. 204. ГИОМЛ, М., 1958.
9. Rossi H., Rosenzweig W. Radiology, 66, 105 (1956).
10. Rossi H. et al. Health Physics, 8, 331 (1962).

Рукопись поступила в издательский отдел
22 марта 1965 г.

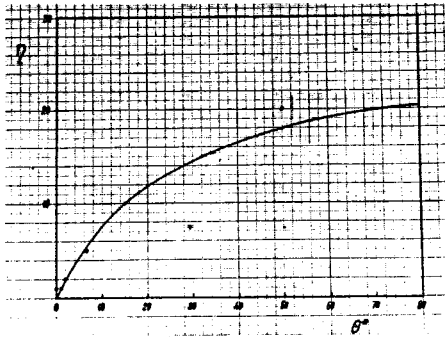


Рис.1. Зависимость аппроксимирующей функции (η) от ЛПЭ.
Точками нанесены значения, рекомендуемые МКРЭ.

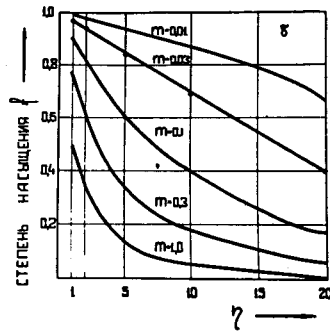


Рис.2. Зависимость эффективности собирания ионов от величины фактора качества при различной величине параметра m .

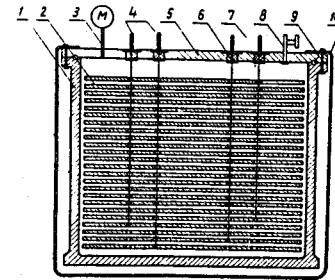


Рис.3. Схематическое изображение двойной рекомбинационной камеры.
1- стенка камеры, оргстекло; 2- электроды, оргстекло; 3- манометр;
4- выводы питающих электродов; 5- крышка; 6- изолятор, фторопласт;
7- выводы измерительных электродов; 8- впускной кран; 9- уплотнение;
10 - защитный кожух, полистилен.

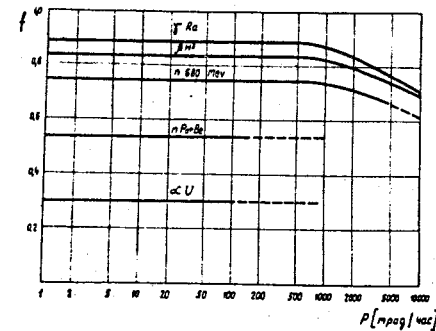


Рис.4. Эффективность собирания ионов в рекомбинационной камере при напряженности поля в 10 в/см как функция мощности дозы излучения.

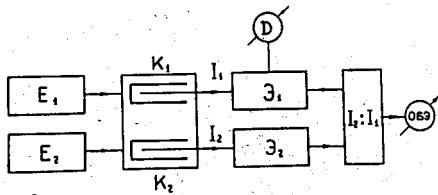


Рис.5.Скелетная схема рекомбинационного дозиметра.

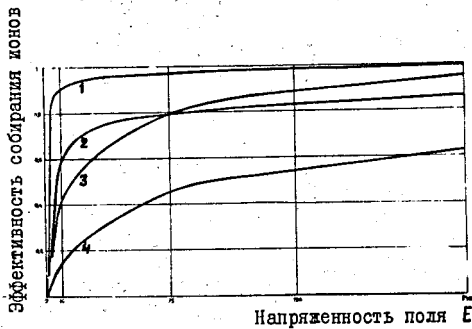


Рис.6. Вольтамперные характеристики камеры

- 1 - гамма -излучение ($\eta = 1$) ; 2 - $\alpha + \gamma$ излучения ($\eta = 7,3$) ;
 3 - нейтронное излучение ($\eta = 7,3$) ; 4 -альфа-излучение ($\eta = 19$).