

УДК 535.23.08:621.014.481

## О применении микродозиметрического подхода для определения коэффициентов качества излучения

Филюшкин И. В.

Существующие предельно допустимые уровни сильноионизирующих излучений основаны на использовании коэффициентов качества  $Q_j$ , показывающих, во сколько раз выход неблагоприятных последствий в результате воздействия малой дозы  $D_j$  сильноионизирующего  $j$ -го вида излучения выше, чем от такой же дозы  $D_\gamma$  слабоионизирующего рентгеновского или  $\gamma$ -излучения. В соответствии с международными рекомендациями [1] и отечественными нормами [2] коэффициент качества зависит только от величины линейной передачи энергии (ЛПЭ) излучения и возрастает от 1 до 20 с ростом ЛПЭ от 3,5 до 200 кэВ/мкм. Регламентированные коэффициенты качества имеют слабое радиобиологическое обоснование и, по-видимому, нуждаются в пересмотре. Так, при радиационном blastomogeneze для малых доз излучения недавно экспериментально получены величины относительной биологической эффективности (ОБЭ)  $\sim 100$  [3].

Основная трудность получения обоснованных коэффициентов качества заключается в необходимости далекой экстраполяции дозовой зависимости выхода неблагоприятных эффектов под действием различных видов излучений (или непосредственно величин ОБЭ) от больших доз, используемых в радиобиологическом эксперименте, к малым дозам [4]. Непосредственное же экспериментальное получение выхода эффектов при предельно допустимых дозах невозможно без использования огромного числа подопытных животных — порядка миллионов [5]. Возможный путь преодоления указанной трудности заключается в создании биофизической концепции качества излучения, связывающей, например, дозовую зависимость ОБЭ или выхода эффектов на единицу дозы, с физическими параметрами излучения и структурными и метаболическими особенностями клеток млекопитающих, поражение которых определяет появление в дальнейшем неблагоприятных последствий облучения. В настоящее время наиболее перспективна дуальная концепция действия излучений, сформулированная Росси и Келлерером [6, 7]. Однако подход Росси и Келлерера содержит ряд

недостаточно обоснованных положений, поэтому полученные ими уравнения могут принципиально описывать выход клеточных эффектов только при малых дозах излучений с не слишком большими значениями ЛПЭ [4]. В настоящей работе рассмотрен более общий подход к описанию выхода эффектов облучения в клетках млекопитающих, который можно использовать для оценки ОБЭ сильноионизирующих излучений при малых дозах. Эта оценка при определенных допущениях может быть положена в основу получения коэффициентов качества.

### Модель генерирования радиационных эффектов в клетках млекопитающих

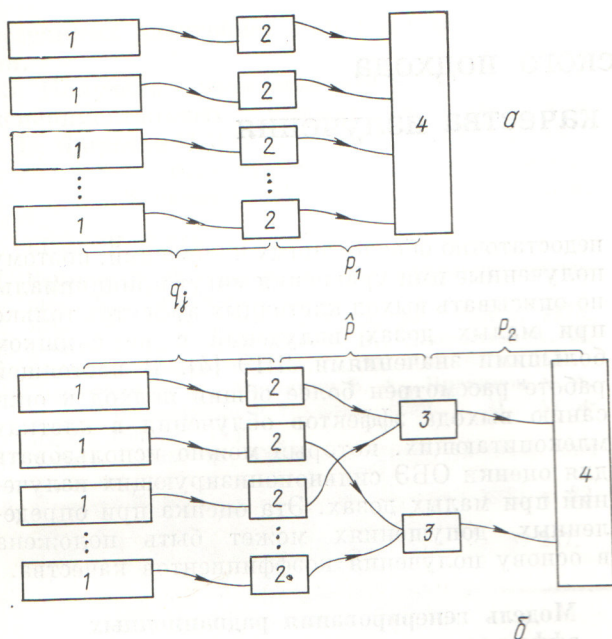
Дуальная концепция действия излучений [6, 7] на клетки млекопитающих и высших растений основана на результатах анализа дозовых зависимостей ОБЭ нейтронов, измеренных для ряда клеточных эффектов. Результаты анализа показывают, что генерацию широкого круга радиационных эффектов в этих клетках можно формально связать с поражением и последующим взаимодействием пар клеточных субъединиц — локусов, полное число которых на клетку составляет  $10^6$ — $10^7$ , а «размер» —  $10$ — $100$  Å. Для появления эффекта необходимо, чтобы были поражены два биологически связанных локуса, а затем эти первичные повреждения провзаимодействовали на биологическом этапе поражения клетки.

Математическая формализация дуальной концепции привела к «линейно-квадратичному» уравнению, описывающему выход первичных поражений  $E(D_j)$  при малых дозах излучений с не слишком большой величиной ЛПЭ [6, 7]:

$$E(D_j) = k(\zeta_j D_j + D_j^2), \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент, не зависящий от вида излучения;  $D_j$  — доза  $j$ -го вида излучения;  $\zeta_j$  — среднее дозовое значение удельного энерговыделения при пересечении треком заряженной частицы чувствительной области, где локализованы биологически связанные локусы.

Авторы работ [6, 7] принимали при этом, что выход повреждений локусов на первичном этапе поражения пропорционален удельному



Р и с. 1. Модели действия излучений:

1 — независимое поражение — реституция локусов на химической и предшествующей стадиях; 2 — восстановление локусов на биологической стадии; 3 — взаимодействие пораженных локусов; 4 — появление эффекта облучения

жение любого из  $K_0$  локусов клетки может взаимодействовать с поражением одного из  $K \leq K_0$  локусов из числа биологически с ним связанных. Локусы, биологически связанные с данным, локализованы в микрообъеме, содержащем данный локус. Первичные поражения локусов и их реституция (рис. 1) протекают на химической и предшествующих стадиях, характеризуемых малым временем протекания ( $\leq 10^{-3}$  с) и малой длиной возможного взаимодействия продуктов ( $\leq 100$  Å) [8]. Микродозиметрические оценки показывают, что вероятность поражения и нереституции локуса можно считать пропорциональной удельной энергии, переданной микрообъему, однако коэффициент пропорциональности  $q_j$  может зависеть от вида излучения. На биологическом этапе пораженный локус с вероятностью  $\hat{P}$  не восстанавливается — и взаимодействует с каким-то связанным с ним пораженным локусом (см. рис. 1, б), образуя «двойное повреждение». С вероятностью  $P_2$  каждое из двойных повреждений независимо одно от другого ведет к появлению эффекта. На рис. 1, а представлен вспомогательный вариант модели, где каждое первичное поражение с вероятностью  $P_1$  не восстанавливается и ведет к появлению эффекта без взаимодействия с другими.

энерговыведению в области, где локализованы локусы, с коэффициентом, не зависящим от вида излучения.

Микродозиметрический параметр  $\xi_j$  можно рассчитать для любого вида излучения, если известен диаметр области, где локализованы биологически связанные локусы. Диаметр этой области определяет, следовательно, искомую величину ОБЭ при малых дозах. В то же время способ определения диаметра в рамках существующей концепции явно неудовлетворителен: для этого необходимо знать величины ОБЭ при малых дозах, что в принципе и является целью расчетов. Более разумным представляется получение диаметра на основе сведений о действии больших доз. Поэтому ниже будут получены уравнения для кривых выживаемости клеток на основе модели, отличающейся рядом уточнений от использованной в работах [6, 7].

Первое уточнение заключается в учете биологической связи между локусами. Более общим, чем в модели работ [6, 7], и не противоречащим дуальной гипотезе предположением является снятие запрета на перекрытие областей, где локализованы взаимодействующие локусы. Мы предполагаем, что первичное пора-

### Получение уравнений

Неоднократно было показано [9], что модели, основанные подобно модели рис. 1, а на гипотезе независимого поражения, восстановления и влияния невосстановленных поражений на выход эффекта, ведут к экспоненциальной зависимости выживаемости  $N/N_0$  от дозы любого вида излучения:

$$N/N_0 = \exp(-D_j/D_{0j}). \quad (2)$$

В соответствии с моделью рис. 1, а

$$D_{0j} = (K_0 \bar{q}_j P_1)^{-1}.$$

Для появления эффекта в объекте, реагирующем на излучение согласно дуальной гипотезе (см. рис. 1, б), необходимо, чтобы было образовано двойное повреждение. Для образования двойного повреждения (обозначим это событие  $AB$ ) за счет сообщения элемента дозы  $dD_j$  после дозы  $D_j$  необходимо, чтобы реализовались два события.

**Событие А:** поражение за счет сообщения элемента дозы и невосстановление на всех этапах какого-то из локусов, например локуса  $\alpha$  [вероятность этого события  $P(A)$ ].

**Событие В:** поражение за счет сообщения дозы  $D_j + dD_j$  какого-то из локусов, связанных с локусом  $\alpha$ , и взаимодействие его с локусом  $\alpha$ . Условную вероятность реализации этого события (при условии реализации события А) обозначим  $P(B/A)$ .

Пусть рассматриваемое излучение создает в среде пространственно некоррелированное («диффузное») распределение ионизаций. Отсутствие пространственной корреляции означает, что акты ионизации (возбуждения) распределены в облучаемом объеме однородно (с точностью до флуктуаций). Вероятность  $P(B)$  можно получить на основе следующих рассуждений. С точки зрения дальнейшего протекания процесса поражения локуса  $\alpha$ , поврежденного элементом дозы  $dD$ , взаимодействие с ним какого-то из локусов, пораженных дозой  $D^*$ , в соответствии с моделью рис. 1, б включает строго те же самые этапы, что и поражение некоторого «одноударного» объекта, реагирующего на излучение в соответствии с моделью рис. 1, а. Следовательно, в случае «диффузного» излучения вероятность  $P(B)$  совпадает с дозовой зависимостью поражения «одноударного» объекта по модели рис. 1, а с точностью до замены величины  $K_0$  на  $K$  и вероятности  $P_1$  на  $\hat{P}$ :

$$P_1^*(AB) = [1 - \exp(-DK\bar{q}\hat{P})]. \quad (3)$$

Тогда вероятность появления эффекта в клетке  $p_i$  за счет возможного поражения  $i$ -го локуса элементом дозы  $dD$  есть

$$p_i = \bar{q}_i [1 - \exp(-DK\bar{q}\hat{P})] \hat{P} P_2 dD. \quad (4)$$

Вероятность поражения одной из клеток или среднее относительное число пораженных клеток за счет сообщения элемента дозы  $dD$  после дозы  $D$ :

$$\frac{dN}{N} = \sum_{i=1}^{K_0} p_i \approx K_0 \bar{q} P_2 P [1 - \exp(-DK\bar{q}\hat{P})] dD, \quad (5)$$

тогда

$$\frac{N}{N_0} = \exp \left\{ -\frac{D}{D_0} + \frac{1}{b} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{bD}{D_0} \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

где  $\frac{1}{b} = \frac{K_0 P_2}{K}$ ;

$$D_0 = (K_0 P_2 \hat{P} \bar{q})^{-1}. \quad (7)$$

Получение выражения для кривой выживаемости под действием произвольного излучения

\* Буквами без индексов обозначены величины, относящиеся к «диффузному» излучению.

сводится к учету взаимодействия на биологическом этапе поражений, вызванных одним прохождением трека через чувствительную область. Реализация события А, т. е. поражение локуса за счет сообщения элемента дозы  $dD_j$ , означает, что через локус и, следовательно, через микрообъем, где локализованы связанные с ним локусы, прошел трек ионизирующей частицы. Вызванные этим треком акты ионизации могут вызвать поражение связанных с ним локусов. Аргументом дозовой зависимости поражения «одноударных» объектов является доза излучения  $D_j$ , равная средней по всем микрообъемам удельной энергии. Аналогично аргументом зависимости  $P(B|A)$  должна быть средняя по всем локусам, пораженным элементом дозы  $dD_j$ , удельная энергия, переданная связанным с ними микрообъемами. Одна часть этой величины — сообщенная ранее доза  $D_j$  (ее можно назвать некоррелированной дозой). Вторая часть, коррелированная доза  $\bar{D}_j^{in}$ , есть средняя удельная энергия, передаваемая микрообъему тем же самым треком, который вызывает поражение связанного с этим микрообъемом локуса. Пусть спектр удельных энерговыделений  $f_j(z)$ , создаваемый однократными пересечениями микрообъема треками заряженных частиц  $j$ -го вида излучения, известен. Требуется найти спектр  $\varphi_j(z)$  энерговыделений в микрообъемах, связанных с пораженными локусами. В соответствии с теоремой обратных вероятностей Байеса [10]  $\varphi_j(z) dz$  есть апостериорная вероятность реализации события  $C_i$ , заключающегося в передаче треком заряженной частицы микрообъему удельной энергии в диапазоне от  $z$  до  $z + dz$  при условии, что тем же треком поражен локус, связанный с этим микрообъемом. Обозначим ее  $P(C_i|A)$ . Априорная вероятность  $P(C_i) = f_j(z) dz$ . Вероятность поражения локуса при условии передачи удельной энергии в диапазоне от  $z$  до  $z + dz$  есть  $P(A|C_i) = \bar{q}_j z$ . Тогда

$$\begin{aligned} \varphi_j(z) dz &= P(C_i|A) = \frac{P(C_i) P(A|C_i)}{\sum_{i=1}^{\infty} P(C_i)} = \\ &= \frac{q_j z f_j(z) dz}{\bar{q}_j \int_0^{\infty} z f_i(z) dz} = z f_j(z) dz / \bar{z}. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что средняя коррелирован-

ная доза  $\bar{D}_j^{in}$

$$\bar{D}_j^{in} = \int_0^\infty z \varphi_j(z) dz = \frac{\int_0^\infty z^2 f_j(z) dz}{\bar{z}} = \frac{\bar{z}^2}{\bar{z}} \equiv \zeta_j. \quad (8)$$

Как оказалось, средняя коррелированная доза тождественно совпадает с введенным авторами работ [6, 7] параметром качества излучения. Таким образом, учет влияния пространственной корреляции ионизаций на биологическом этапе поражения приводит к соотношению

$$\bar{P}(B|A) = 1 - \exp\{- (D_j + \zeta_j) \hat{P} \bar{q}_j K\}. \quad (9)$$

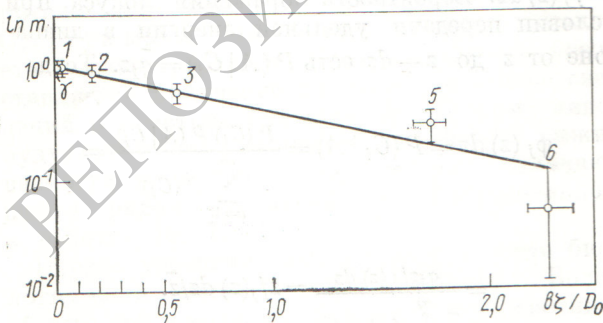
Подстановка соотношения (9) в (5) приводит к следующему выражению для кривой выживаемости от произвольного вида излучения:

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left\{-\frac{D_j}{D_{0j}} + \frac{1}{b} \exp\left(-\frac{b \zeta_j}{D_{0j}}\right) \times \left[1 - \exp\left(-\frac{b D_j}{D_{0j}}\right)\right]\right\}, \quad (10)$$

которое отличается от выражения (6) для «диффузного» излучения множителем  $\exp\left(-\frac{b \zeta_j}{D_{0j}}\right)$ , уменьшающимся с ростом  $\zeta_j$ . Расчетная кривая выживаемости изменяется поэтому от сигмовидной для слабоионизирующего, например,  $\gamma$ -излучения до экспоненциальной при больших значениях ЛПЭ (соответственно больших  $\zeta_j$ ).

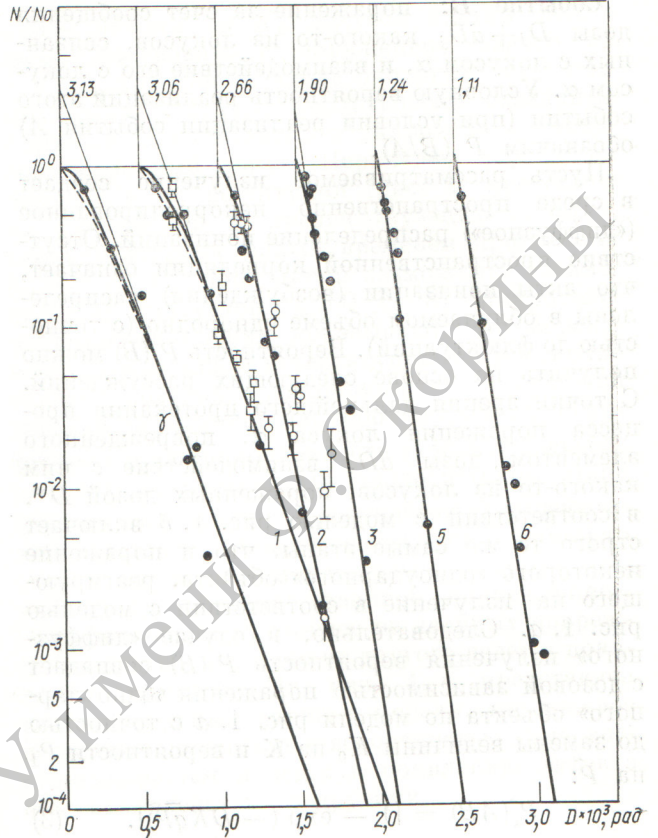
Величина  $\zeta_j$  зависит от вида излучения и диаметра микрообъема, где локализованы биологически связанные докусы. Диаметр микрообъема определяется структурными и метаболическими особенностями клеток, как и параметр  $b = K/K_0 P_2$ .

Для определенного вида клеток эти параметры, определяемые биологическими факто-



Р и с. 2. Значения логарифма экстраполяционного числа по данным Тодда:

—  $1/e = 1,15$ ;  $d = 5,7$  мкм. Цифры — заряды тяжелых ионов;  $\gamma$  — рентгеновское излучение 50 кэВ



Р и с. 3. Кривые выживаемости (●), измеренные Тоддом, и расчетные зависимости по соотношению (16): —  $P_0 = 0$  и 0,3; ○, □ — данные Барендсена [14] (остальные обозначения, как на рис. 2)

рами, можно найти, как оказалось, по набору кривых выживаемости клеток под действием различных видов излучения. Из уравнения (10) следует, что экстраполяционное число кривой выживаемости  $m_j$  (ордината точки пересечения продолжения экспоненциального участка кривой с осью ординат)

$$m_j = \exp\left[\frac{1}{b} \exp\left(-\frac{b \zeta_j}{D_{0j}}\right)\right]. \quad (11)$$

Если клетка облучается пучком тяжелых ионов, пересекающих ее без торможения, то [7]

$$\zeta_{рад} = \frac{23 L_j \text{ (кэВ/мкм)}}{d^2 \text{ (мкм)}}, \quad (12)$$

где  $L_j$  — ЛПЭ иона;  $d$  — диаметр микрообъема. Подстановка (12) в (11) и двойное логарифмирование приводят к следующему соотношению:

$$\ln(\ln m) = \ln\left(\frac{1}{b}\right) - \frac{b \cdot 23 L_j}{d^2 D_{0j}}. \quad (13)$$

Характеристики пучков тяжелых ионов и параметры кривых выживаемости

Вид иона	$L_j$ , кэВ/мкм	$D_{0j}$ , рад	$\xi$ для $d = 5,7$ мкм, рад	$b\xi_j/D_{0j}$	$m_j$	
					экспериментальные	расчетные
$^1\text{H}$	6,4	140	4,5	0,027	$3,1 \pm 0,4$	3,06
$^2\text{He}$	25,1	93	17,8	0,46	$2,7 \pm 0,3$	2,66
$^7\text{Li}$	58	61	410	0,60	$1,9 \pm 0,3$	1,90
$^{10}\text{B}$	160	61	110	1,79	$1,2 \pm 0,1$	1,24
$^{12}\text{C}$	230	60	160	2,4	$1,1 \pm 0,05$	1,11

Таким образом, в полулогарифмическом масштабе зависимость  $\ln m_j$  от ЛПЭ, деленного на  $D_{0j}$ , должна представлять прямую, отсекающую на оси ординат величину, равную  $1/b$ . На рис. 2 представлена такая зависимость, полученная по кривым выживаемости клеток почки человека, измеренным Тоддом [11] (рис. 3). Эта зависимость отвечает значениям  $1/b = 1,15 \pm 0,1$ ;  $d = 5,7 \pm 0,7$  мкм. На рис. 2 масштаб оси абсцисс показан с учетом этих величин. Тяжелые ионы, использованные Тоддом, значения их ЛПЭ, а также значения экстраполяционных чисел, расчетные и полученные путем обработки измеренных кривых выживаемости, представлены в таблице.

Эти данные (таблица и рис. 2) показывают, что предсказываемая соотношением (13) зависимость экстраполяционного числа от ЛПЭ излучения выполняется в пределах точности экспериментальных данных. Как следствие, кривые выживаемости, рассчитанные по уравнению (10) с использованием полученных выше параметров, хорошо согласуются с экспериментальными (см. рис. 3). Таким образом, уравнение (10), полученное на основе дуальной гипотезы, справедливой по своему построению для малых доз излучения, хорошо описывает выживаемость клеток и при больших дозах.

### Выход клеточных эффектов и ОБЭ при малых дозах

Микродозиметрические оценки показывают, что при мощности дозы  $\gamma$ -излучения 5 рад/год клетка диаметром 10 мкм пересекается треком электрона отдачи примерно один раз за несколько суток [9]. Для сильноионизирующего излучения, например, нейтронов пересечения клетки треками вторичных заряженных частиц про-

исходят еще реже. Наличие эффектов репарации приводит к тому, что к моменту следующего пересечения клетка полностью освобождается от сублетальных повреждений, вызванных предыдущим треком. Таким образом, взаимодействие между первичными повреждениями, образованными в клетке различными треками, при малых дозах или мощностях дозы отсутствует, так что число пораженных клеток становится пропорциональным дозе излучения. Можно показать [9], что при этом коэффициент пропорциональности равен начальному наклону кривой выживаемости, т. е. угловому коэффициенту касательной к ней при нулевой дозе. Эту величину ( $1/D_{1j}$ ) невозможно с приемлемой точностью получить в эксперименте, но можно рассчитать с помощью уравнения (10), используя полученные ранее параметры. Дифференцирование уравнения при  $D_j = 0$  приводит к соотношению

$$\frac{1}{D_{1j}} = \frac{1}{D_{0j}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{b\xi_j}{D_{0j}}\right) \right]. \quad (14)$$

В соответствии с уравнением (14) при стремлении дозы  $j$ -го излучения к нулю величина ОБЭ стремится к своему максимальному значению:

$$\text{ОБЭ}_{\text{макс}} = \frac{D_{0\gamma} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{b\xi_j}{D_{0j}}\right) \right]}{D_{0j} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{b\xi_\gamma}{D_{0\gamma}}\right) \right]}, \quad (15)$$

где величины с индексом  $\gamma$  относятся к стандартному  $\gamma$ -излучению.

Прежде чем переходить к расчетам этих величин, необходимо сделать одну существенную оговорку. Помимо пространственной корреляции ионизаций, приводящей к отличию  $\xi_j$  от нуля, на величину начального наклона кривой выживаемости могут влиять биологические факторы. Главные из них — фоновые сублетальные повреждения и несинхронность клеточных популяций. Известно, например, что в фазе митоза кривая выживаемости клеток млекопитающих экспоненциальна даже для слабоионизирующего излучения [13]. Факторы биологического происхождения наиболее значительно могут сказываться на величине радиочувствительности при малой дозе слабоионизирующего рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, когда роль первого фактора мала.

Учет факторов биологического происхождения сводится к введению определенной вероятности поражения клетки  $P_0$  при поражении единственного локуса без его взаимодействия,

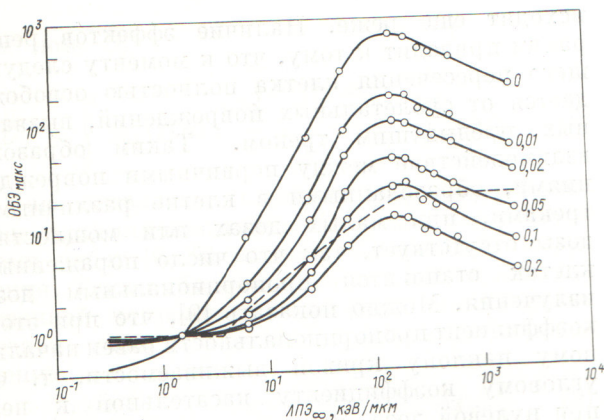


Рис. 4. Расчетные зависимости ОБЭ тяжелых ионов от ЛПЭ по отношению к рентгеновскому излучению 250 кэВ при малых дозах. Начальные участки кривых соответствуют  $\gamma$ -излучению  $^{60}\text{Co}$ .

Цифры у кривых — принятые значения вероятности появления эффекта за счет поражения одного локуса; — — — регламентированная [1, 2] зависимость коэффициента качества от ЛПЭ

т. е. без образования двойного повреждения. С учетом этой вероятности уравнение (10) принимает вид

$$\frac{N^*}{N_0} = \exp \left\{ -\frac{D_j}{D_{0j}} + \frac{1-P_0}{b} \exp \left( \frac{b \zeta_j}{D_{0j}} \right) \times \right. \\ \left. \times \left[ 1 - \exp \left( -b \frac{D_j}{D_{0j}} \right) \right] \right\} \quad (16)$$

Величина начального наклона при нулевой дозе

$$\frac{1}{D_{1j}^*} = \frac{1}{D_{0j}^*} \left[ 1 - (1 - P_0) \exp \left( -b \frac{\zeta_j^*}{D_{0j}^*} \right) \right] \quad (17)$$

Здесь индекс \* означает величины, полученные с учетом влияния биологических факторов на величину начального наклона. Расчетные кривые выживаемости, обозначенные на рис. 3 штриховыми линиями, получены в предположении, что  $P_0 = 0,3$ . Видно, что невысокая точность экспериментальных данных по выживаемости клеток пока не позволяет только на их основе сделать выбор даже между весьма далекими оценками ( $P_0 = 0$  и  $P_0 = 0,3$ ).

На рис. 4 представлены расчетные максимальные значения ОБЭ тяжелых ионов (17) по отношению к рентгеновскому излучению 250 кэВ в различных предположениях о величине  $P_0$ . Видно, что при отсутствии начального наклона биологического происхождения ( $P_0 = 0$ ) расчетные величины ОБЭ достигают весьма больших значений (до 800) при ЛПЭ  $\approx 100$  кэВ/мкм. Кроме того, в этом случае

ОБЭ  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$  оказывается равным 0,5. При  $P_0 = 0,2$  максимальная величина ОБЭ, напротив, уже не превышает 12, а ОБЭ  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$  становится равной единице при  $P_0 = 0,01$ . В качестве верхней оценки  $P_0$  для интенсивно делящихся клеток можно выбрать митотический индекс, т. е. относительную долю клеток, находящихся в фазе митоза ( $\sim 0,05$ ). В этом случае зависимость ОБЭ от ЛПЭ при малых дозах оказывается довольно близкой к регламентированной зависимости коэффициента качества, который, следовательно, с приемлемой точностью описывает различия в поражении малыми дозами различных видов излучений клеточных систем, характеризующихся интенсивным обновлением (критические органы первой группы). Максимальная расчетная величина ОБЭ в этом случае, однако, достигает 45 при ЛПЭ = 100 кэВ/мкм. Для клеточных систем, имеющих низкий митотический индекс, эта величина может быть значительно больше, если не окажутся существенными другие биологические факторы, влияющие на начальный наклон. Наконец, еще большие величины ОБЭ следует ожидать при облучении малыми дозами тканей, находящихся в условиях аноксии благодаря более сильному увеличению с ростом ЛПЭ величины конечного наклона кривой выживаемости. Так, в работе [14] экспериментально получены значения ОБЭ, превышающие 100 для помутнения хрусталика. Следует иметь в виду, что большие расчетные величины ОБЭ при малых дозах связаны исключительно с падением выхода эффекта на единицу дозы  $\gamma$ -излучения, которое используется в качестве стандартного. Снижение ОБЭ с ростом митотического индекса обусловлено соответственно увеличением радиочувствительности клеток при малых дозах  $\gamma$ -излучения.

В настоящей работе показана принципиальная возможность использования микродозиметрического подхода для оценки выхода клеточных эффектов под действием малых доз различных видов излучений, причем такая оценка делается на основе наблюдаемых закономерностей поражений клеток большими дозами. Сформулированный микродозиметрический подход к количественному описанию поражения клеток может явиться основой для получения в дальнейшем более обоснованных коэффициентов качества.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность И. Б. Кеирим-Маркусу за поставленную задачу, полезные обсуждения и песто-

янный интерес к работе и Л. С. Андреевой за помощь в проведении расчетов и подготовке статьи.

Поступила в Редакцию 4/V 1975 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная безопасность. Величины, единицы, методы и приборы. Перев. с англ. 19 и 20 рекомендаций МКРЕ. М., Атомиздат, 1974.
2. Нормы радиационной безопасности НРБ—69. М., Атомиздат, 1972.
3. Shellabarger C. e. a. In: Biological Effects of Neutron Irradiation. Vienna, IAEA, 1974, p. 391.
4. Филюшкин И. В. «Атомная техника за рубежом», 1974, № 5, с. 29.

5. Barendsen G. In: Proc. of Third Symp. Microdosimetry. V. 2. Luxemburg, 1972, p. 905.
6. Kellerer A., Rossi H. «Radiation Res.», 1974, v. 47, p. 15.
7. Kellerer A., Rossi H. «Current Top. Rad. Res. Quat.», 1972, v. 8, p. 85.
8. Дертингер Г., Юнг Х. Молекулярная радиобиология. М., Атомиздат, 1974.
9. Хур О., Келлерер А. Стохастическая радиобиология. М., Атомиздат, 1969.
10. Лозв М. Теория вероятностей. М., «Мир», 1972.
11. Todd P. «Radiation Res., Suppl.», 1967, v. 7, p. 196.
12. Barendsen G. «Intern. J. Radiation Biology», 1966, v. 10, N 4, p. 317.
13. Sinklar W., Morton R. «Radiation Res.», 1966, v. 29, p. 450.
14. Kellerer A. «Radiation Res.», 1973, v. 56, p. 28.

## Рефераты статей, опубликованных в настоящем выпуске

УДК 621.039

Агеевков А. Т., Буравцов А. А., Валуев Е. М., Голубев Л. И., Ершова З. В., Кравцев В. В., Швоев А. Ф. Исследование состава газовой фазы в твзлах Нововоронежской АЭС. — «Атомная энергия», 1976, т. 40, с. 203.

В работе изучен состав газовой фазы в отработанных твзлах Нововоронежской АЭС. Исследованы твзлы с выгоранием 7500 и 19 100 МВт·сут/т У. Собранный при проколке оболочки газ анализировался на радиохроматографе. Количество газа составляет 14,7—21,1 н.см<sup>3</sup>, основными компонентами его являются гелий и водород. Из радиоактивных изотопов в газе обнаружены тритий и <sup>85</sup>Kr. Выход трития в газовую фазу без нагревания твзлов (40—50°C) составляет 0,004%, при нагреве (200°C) 0,12—0,27% (2 рис., 3 табл., 3 библиогр. ссылки).

УДК 621.039.516.22

Голубев Л. И., Горобцов Л. И., Кулаков Г. А., Симонов В. Д., Сунчугашев М. А. Исследование пространственной неравномерности выгорания топлива в кассетах ВВЭР. — «Атомная энергия», 1976, т. 40, с. 207.

В статье представлены результаты изучения неравномерности выгорания топлива в кассетах и твзлах реакторов первого и второго блоков НВАЭС методом измерения активности осколков деления <sup>137</sup>Cs, <sup>106</sup>Ru, <sup>134</sup>Cs.

Обнаружены заметные неравномерности выгорания топлива в кассетах первого блока, уменьшенные введением борного регулирования на втором блоке. Поглощающие элементы в кассетах второго блока вносят существенные неравномерности выгорания топлива по сечению кассет, что приводит к отказу от применения поглощающих элементов.

Обнаружены радиальные и азимутальные неравномерности выгорания топлива по сечению топливных элементов, более существенные в распределении <sup>106</sup>Ru, что отражает неравномерности выгорания <sup>239</sup>Pu (8 рис., 5 библиогр. ссылок).

УДК 621.039.53

Флеров Г. Н., Барашенков В. С., Лебедев С. Я., Акапьев Г. Н., Дубинский В. Е., Родионова В. Г., Руднев С. И., Сурков С. Я., Наблюдение вакансионной пористости в металлах при облучении их ускоренными ионами железа. — «Атомная энергия», 1976, т. 40, с. 211.

Изучалось образование вакансионной пористости в образцах никеля и нержавеющей стали под действием ионов железа на внутреннем пучке циклотрона У-300. Плотность числа пор и дисперсия их по размерам такие же, как в материалах, облученных в реакторах на быстрых нейтронах при соответственно равном числе смещений на атом. Это открывает возможность моделирования радиационных повреждений реакторных материалов в опытах с ускоренными ионами. Сравняется радиационная стойкость некоторых пространственных конструктивных материалов (4 рис., 2 табл., 13 библиогр. ссылок).

УДК 621.384.654

Будкер Г. И., Гапонов В. А., Корабельников Б. М., Крайнов Г. С., Кузнецов С. А., Куксанов Н. К., Кондратьев В. И., Салимов Р. А. Ускоритель электронов ЭЛВ-1 для промышленного использования. — «Атомная энергия», 1976, т. 40, с. 216.

Описан ускоритель электронов на энергию 1 МэВ мощностью 20 кВт. Генератором ускоряющего напряжения служит повы-

шающий трансформатор (рабочая частота ~400 Гц), напряжение секций вторичной обмотки которого выпрямляется по схеме с удвоенным напряжением. Ускорительная трубка встроена в генератор. Выпуск электронов осуществляется через титановую фольгу. Ускоритель успешно прошел 1000-часовые испытания в номинальном режиме (6 рис.).

УДК 539.124:539.171

Бойко В. И., Евстигнеев В. В., Кононов Б. А., Плотников А. Л., Горбачев Е. А. Скользящее рассеяние быстрых электронов поверхностью твердого тела. — «Атомная энергия», 1976, т. 40, с. 224.

Посредством специально разработанной методики и экспериментальной аппаратуры проведено исследование угловых распределений электронов с энергией 3,3—8,2 МэВ, рассеянных от поверхности графитовых, алюминиевых, медных и свинцовых отражателей для углов падения 3—30° относительно поверхности отражателя. Показано, что зависимость дифференциального альbedo от атомного номера образца и энергии электронов исчезает при скользящем падении и интегральный коэффициент стремится к единице. Вероятный угол отражения становится меньше угла падения. Экспериментальные результаты иллюстрированы графически. Сравнение с теорией Фирсова и расчетами методом Монте-Карло дает удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных данных при скользящих углах рассеяния (4 рис., 16 библиогр. ссылок).

УДК 535.23.08:621.014.481

Филюшкин И. В. О применении микродозиметрического подхода для определения коэффициентов качества излучения. — «Атомная энергия», 1976, т. 40, с. 227.

Допустимые уровни сильноионизирующих излучений основаны на регламентированных коэффициентах качества, которые имеют недостаточное радиобиологическое обоснование. Обоснованные коэффициенты качества должны определяться коэффициентами ОБЭ сильноионизирующих излучений при предельно допустимых дозах. Такие сведения невозможно получить в рамках радиобиологического эксперимента.

В настоящей работе для получения коэффициентов ОБЭ использована микродозиметрическая концепция дуального действия излучения, модифицированная автором.

Необходимые параметры уравнений получили, основываясь на опубликованных данных по выживаемости клеток почки человека при средних и больших дозах. При низком митотическом индексе максимальные ожидаемые значения ОБЭ достигают 800 для ЛПЭ = 100 кэВ/мкм. Если, напротив, клетки интенсивно делятся, эта величина не превышает 40 (4 рис., 1 табл., 14 библиогр. ссылок).

УДК 539.184.2

Суздаев И. П. Развитие прикладной гамма-резонансной (мессбауэровской) спектроскопии в Советском Союзе. — «Атомная энергия», 1976, т. 40, с. 234.

В обзоре отмечены основные направления прикладных исследований, ведущихся с помощью  $\gamma$ -резонансной спектроскопии (ГРС) в Советском Союзе в области материаловедения (сплавов, ферритов, стекол), фазово-минералогического анализа, геохимии и космохимии, химических последствий ядерных превращений, катализа, а также для исследования лент видео- и звукозаписи (5 рис., 24 библиогр. ссылка).