

УДК 502.55:621.039.7

И.Ю. Чернявский, В.В. Марущенко, В.Е. Гайдабука,
С.А. Писарев, С.Н. Меньшов, В.Б. Матыкин

Национальный технический университет «ХПИ», ФВП, Харьков

**БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
РАДИАЦИОННОГО ФАКТОРА ВОЕННОГО ХАРАКТЕРА**

В рамках НИР по модернизации радиологических принципов войсковой системы радиационной безопасности в работе анализируются медико-радиологические особенности биологического действия импульсного гамма-нейтронного излучения проникающей радиации на различных расстояниях от центра взрыва. Предлагается учитывать пространственно-временное распределение поглощённой дозы путём оценки обобщённого дозиметрического функционала.

Ключевые слова: гамма-нейтронный поток проникающей радиации, неравномерность облучения.

Вступительная часть

Постановка проблемы. Несмотря на то, что целью оценки получаемых радиационных характеристик системой войсковой дозиметрии остаётся выполнение поставленной боевой задачи войсками, дозиметрические измерения должны быть адекватными условиям воздействия радиационных факторов и их ожидаемым последствиям.

При действии личного состава на радиоактивно зараженной местности облучение считается пролонгированным а распределение дозы гамма-излучения близко к равномерному, и поэтому считается, что облучение не более четырёх суток поражающая доза численно равна экспозиционной дозе гамма-излучения. В то же время радиационное воздействие в условиях импульсного гамма-нейтронного излучения проникающей радиации (ПР) характеризуется сложным составом излучений и их энергетического спектра, которые различаются в значительной степени по своей биологической эффективности. Оно характеризуется неравномерным распределением доз как по глубине тела, так и во времени. Имеющаяся в открытой литературе информация по вопросу особенностей воздействия импульсного гамма-нейтронного излучения ПР, соотношения дозовых компонент – довольно противоречива и требует уточнений.

По расчётам, выполненным в конце 80-х гг. ВМедА им. С.М.Кирова, выход из строя личного состава при воздействии нейтронного боеприпаса по критерию нуждаемости в оказании медицинской помощи в условиях открытого его размещения и получения дозы облучения 2000 рад составит через 5 мин 10 %, 10 мин – 40 % и 40 мин – 100 %, а по критерию неспособности продолжать выполнение боевой задачи для тех же параметров облучения и временных интервалов – соответственно 5, 20 и 80%. Данные оперативно-тактические расчёты для медицинских мероприятий основывались на учёте

не только особенностей импульсного гамма-нейтронного воздействия ПР боеприпаса, но и на специфики восстановительных процессов в организме. Биологически взвешенную эффективную дозу $D_{\text{эф}}$ к моменту времени t после кратковременного воздействия в работе [1] описывают выражением:

$$D_{\text{эф}} = D_0 \left[(1 - K) \cdot e^{-\lambda t} + K \right], \quad (1)$$

где $D_0 = F(f_{0\text{бс}})$ – биологически взвешенная доза, представляющая собой среднее значение поглощённой дозы гамма-нейтронного излучений в фантоме человеческого торса с учётом повышенного биологического воздействия нейтронного излучения; $f_{0\text{бс}}$ – коэффициент относительной биологической эффективности, для гамма компоненты $f_{0\text{бс}}=1$, для нейтронной компоненты в зависимости от энергии ($1 < f_{0\text{бс}} < 4$); $\lambda = 0,15; 0,40$ – постоянная затухания лучевого поражения; $K=2,5$ и $1,5$ – необратимая доля остаточной дозы отдельно для гамма-излучения и нейтронов с энергией от 0,025 эВ до 10 кэВ и нейтронов от 10 кэВ до 15 МэВ.

Сама идея объяснить последствия такого воздействия на организм на основе картины радиационного поражения критических органов (нарушения кровотока – доза $D_{\text{крт}}$ и желудочно-кишечного трактов – доза $D_{\text{жкт}}$ и последующего восстановления быстро обновляющихся клеточных систем критического органа указывает правильный путь создания модели острого облучения при выявлении сроков потери дееспособности или трудоспособности. Однако соотношение и глубина нарушения критических систем зависит не только от интенсивности, но и продолжительности облучения (характера облучения), спектрально-угловых характеристик излучения, условий экранирования тела человека. Существующие в настоящее время методики оценки тяжести радиационного поражения, основываются на учёте суммарной дозы гамма-нейтронного излучения [2-6], без учёта:

- соотношения между компонентами импульсного излучения проникающей радиации (определяющего неравномерность облучения);

- скорости накопления дозы (мощности дозы), а значит в целом и без учёта пространственно-временного распределения дозовой нагрузки.

Из ряда публикаций известно, что совместное действие редкоизионизирующего излучения и нейтронов (вклад 30% и более) может носить синергический характер [7], что отразится в большей опасности такого смешанного воздействия. При этом развивается острая лучевая болезнь (ОЛБ) частично напоминающая таковую при неравномерном гамма-облучении. Однако действие этой же компоненты на больших расстояниях от центра взрыва, вызывает, за счёт рассеянных от земли нейтронов – равномерное облучение (перепад тканевых доз $h_{\max}/h_{\min} < 3-5$) [8].

Данный факт обуславливает необходимость разработки моделей, учитывающих влияние пространственной и временной неравномерности радиационного воздействия на радиобиологический эффект, уточнения зависимостей коэффициентов относительной биологической эффективности (ОБЭ) излучений от линейной передачи энергии (ЛПЭ), установления степени модификации радиобиологических эффектов за счёт учёта дополнительных факторов: длительности облучения и неравномерности облучения. Требуется также обоснование принципов приведения данного сложного характера облучения к условиям стандартного радиационного воздействия.

Цель работы. В данной работе анализируются медико-радиологические особенности радиационных потерь от импульсного гамма-нейтронного излучения ПР, с учётом биологической эффективности нейтронной компоненты, а также соотношение между компонентами доз проникающей радиации для боеприпасов различного типа. В условиях сложного характера радиационного воздействия, предлагается учитывать пространственно-временное распределения поглощённой дозы путём оценки обобщённого дозиметрического функционала. Также целью работы является развитие концепции оценки радиационной опасности на основе обобщённой дозы, которая позволяет привести сложный характер облучения к условиям стандартного радиационного воздействия, тем самым корректно оценивать последствия импульсного гамма-нейтронного воздействия проникающей радиации путём прогнозирования дозовых нагрузок.

1. Особенности дозовой нагрузки проникающей радиации

Конкретные данные по параметрам ПР нейтронного боеприпаса в открытой печати отсутствуют. Однако на основе опубликованных материалов

[9-12] можно предположить, что поражающий эффект от ПР при взрыве нейтронного боеприпаса мощностью 1 кт практически эквивалентен поражающему действию проникающей радиации при взрыве ядерного боеприпаса мощностью 10 кт, что в общем то и определяет выбор нейтронных боеприпасов как эффективное средство для изменения соотношений сил на поле боя. Для оценки параметров импульсного гамма-нейтронного излучения проникающей радиации нейтронного боеприпаса, воспользуемся расчетами приведённых в работе [1].

Суммарная поглощённая доза в этом случае с учётом принятой модели нейтронного боеприпаса определяется выражением:

$$D_{\Sigma} = 3,36 \cdot 10^{16} R^{-2} q + 8 \cdot 10^{-6} R^{-2} N_n (E_n = 14 \text{ МэВ}) K_n R^{-2}, \quad (2)$$

где $q = 4,6 \cdot 10^{22} / 1,9 \cdot 10^{23} = 0,242$ кт – мощность термоядерного запала ($1,9 \cdot 10^{23}$ нейтр./кт – общий выход нейтронов), $N_n(E_n = 14 \text{ МэВ}) = 1 \cdot 10^{24}$ – выход нейтронов с энергией 14 МэВ, $K_n = 7,8 \cdot 10^{-9}$ рад/нейтр. – удельная поглощённая доза, создаваемая нейтронами с энергией 14 МэВ. Подставляя в выражение (2) значения q , N_n , K_n , получим

$$D_{\Sigma} = 6,23 \cdot 10^{10} R^{-2}. \quad (3)$$

Оценивая интенсивность (плотность потока излучения), которое обратно квадрату расстояния до центра взрыва (3), необходимо отметить, что оно напрямую зависит также и от типа боеприпаса. Так дозе в 1 бРэ соответствует флюенс быстрых нейтронов $3,6 \cdot 10^8$; $3 \cdot 10^8$; $2,3 \cdot 10^8$ нейтр./см² для ядерных, термоядерных и нейтронных боеприпасов, соответственно [1].

Имеющаяся в открытой литературе информация по вопросу соотношения дозовых компонент проникающей радиации довольно противоречива. Так, в работе [22] утверждается, что вкладом гамма-излучения в полную дозу от источника со спектром типичного ядерного взрыва можно пренебречь для всех изученных в этой работе расстояний (до 5 км). С другой стороны, из результатов работ [20,21] следует, что в некоторых случаях вклад гамма-излучения в полную дозу значительно превышает вклад нейтронного излучения. Вместе с тем для спектра деления на близком расстоянии от источника доза вторичного гамма-излучения по данным работы [20] в несколько раз превышает значения, полученные в работе [21], а на расстоянии более 2,5 км соотношения меняется на обратное.

Проведём анализ особенностей последствий облучений гамма-нейтронным излучением ПР на открытой местности на различных расстояниях от центра взрыва (табл. 1). Воспользуемся данными приведённые в работах [1, 3], а также действующей 30% градацией степени ОЛБ от внешнего облучения.

Таблиця 1

Ориентировочные дозы гамма-нейтронного облучения и их последствия на личный состав в зависимости от типа боеприпаса мощностью в 1 кт

Расстояние (м)	Ядерный (термоядерный) боеприпас		Нейтронный боеприпас	
	$D_{\gamma+n}$ (рад)	Последствия	$D_{\gamma+n}$ (рад)	Последствия
500	600	ОЛБ крайне тяжелой степени тяжести, боеспособность существенно снижена или отсутствует	60000-120000	немедленная смерть
700	250	ОЛБ средней степени тяжести, боеспособность частично снижена	16000	немедленная и полная потеря незащищенным человеком способности к физической и умственной деятельности и предсмертная агония длится 1-2 дня
760	150	ОЛБ легкой степени тяжести, боеспособность сохранена или частично снижена	8000	потеря боеспособности через несколько минут, смертельный исход наступает через 2-6 суток
1200	100	ОЛБ легкой степени тяжести, боеспособность сохранена или частично снижена	650	тяжелые функциональные нарушения в организме человека примерно через 1 час после взрыва, гибель наступает спустя 2-3 недели после облучения
1450	20	степень боеспособности сохранена	450	ОЛБ тяжелой степени, степень боеспособности существенно снижена
1550			200	ОЛБ средней степени тяжести, боеспособность частично снижена
1650			100	ОЛБ легкой степени тяжести, боеспособность сохранена или частично снижена
2300			15	возникновение злокачественных опухолей, лейкемии, боеспособность сохранена

Анализ данной таблицы показывает, что очаги поражения, вызванные нейтронными боеприпасами по сравнению с очагами, вызванными ядерными (термоядерными) боеприпасами той же мощности, отличаются значительно большими дозами излучения (на одних и тех же расстояниях от эпицентра взрыва) на личный состав, что отражается на степени дееспособности подразделений и частей.

Невозможность станциям засечки параметров ядерных взрывов различить тип боеприпаса (термоядерный или нейтронный), безусловно, приведёт к существенным ошибкам в оценке радиационного поражения подразделений и частей за данными прогноза. На расстоянии 760 м разница в ожидаемой дозе может составить 53 раза (дееспособность сохранена – потеря дееспособности через несколько минут, смертельный исход через 2-6 суток). В этих случаях последствия такого воздействия могут проявиться только в медико-радиологических признаках - более выраженная первичная реакция с частой рвотой в первые 3-5 часов (отсутствие видимого латентного периода), глубокая адинамия.

Соотношение между дозами нейтронов и гамма-излучения в суммарной дозе ПР зависит от типа, мощности боеприпаса и расстояния от центра взрыва. Согласно [13] на расстояниях, где суммарная доза равна примерно 200-500 бэр при мощности взрыва 0,1-10³ кт вклад дозы нейтронов и гамма-излучения изменяется от 4 до 80 и от 20 до 96%, соответственно. Причём вклад доз осколочного и вторичного гамма-излучения изменяется от 7 до 56 и от 13 до 40%, соответственно,

что на взгляд автора, при отдельной регистрации доз должно учитываться при разработке, градуировке и проверке войсковых дозиметров.

На близких расстояниях от центра взрыва нейтронного боеприпаса в зоне смертельных и тяжёлых поражений доза нейтронов значительно превышает дозу гамма-излучения и только на границе лёгких поражений, по данным [3,16] на расстоянии 1500-1800 м, их значения будут приблизительно одинаковыми. Пользуясь расчётными значениями доз облучения при воздушном взрыве нейтронного боеприпаса мощностью 1 кт получим зависимость отношения доз от расстояния для разного типа боеприпаса (рис. 1). Для термоядерного взрыва граница дозового равновесия ($D_n \approx D_\gamma$) смещается к эпицентру взрыва и составляет примерно 800-900 м.

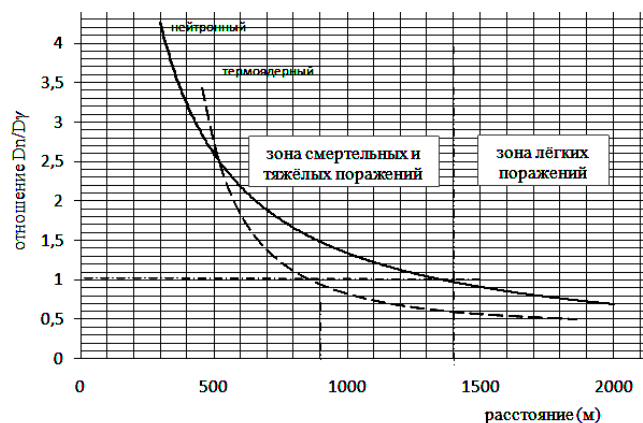


Рис. 1. Сравнительная оценка отношения доз нейтронного и гамма-излучения

Анализ полученной зависимости (рис. 1) показывает, что интересующая нас граница зоны смертельных и тяжёлых поражений напрямую связана с преобладанием нейтронной составляющей (до 4-х раз), а также биологической эффективностью данного вида ионизирующего излучения, зависящего от характерного спектра данного типа боеприпаса (табл. 2). С другой стороны в рамках исследования распределения ткане-

вой дозы от внешнего гамма-нейтронного излучения разного состава в модели тела человека в работе [8], были построены кривые выживаемости человека при облучении с различным соотношением γ/n . Неравномерность облучения снижает поражающее действие излучения более чем в 3 раза по сравнению с равномерным облучением при одинаковой максимальной эквивалентной дозе (табл. 3).

Таблица 2

Групповые интервалы энергетического распределение нейтронов и вторичных гамма-квантов и энергетическое распределение нейтронов для спектра деления и типичного спектра термоядерного взрыва [23]

№ группы	Групповые интервалы, МэВ		Число нейтронов в группе	
	нейтроны	гамма-кванты	спектр деления	спектр термоядерного взрыва
1	12,2-15,0	8,0-10,0	1,560-4	7,06-2
2	10,0-12,2	6,5-8,0	8,932-4	2,56-2
3	8,18-10,0	5,0-6,5	3,480-3	1,41-2
4	6,36-8,18	4,0-5,0	1,392-2	1,47-2
5	4,97-6,36	3,0-4,0	3,457-2	1,80-2
6	4,07-4,97	2,5-3,0	3,051-2	1,70-2
7	3,01-4,07	2,0-2,5	1,072-1	2,60-2
8	2,46-3,01	1,66-2	8,898-2	1,90-2
9	2,35-2,46	1,33-1,66	2,323-2	5,00-3
10	1,83-2,35	1,00-1,33	1,203-1	2,80-2
11	1,11-1,83	8,0-1,0	2,181-1	6,20-2
12	5,50-1,11	6,0-8,0	1,983-1	8,50-2
13	2,35-2,46	4,0-6,0	1,403-1	1,02-1
14	1,83-2,35	3,0-4,0		3,65-1
15	1,11-1,83	2,0-3,0		1,22-1
16	5,83-1,11	1,0-2,0		2,40-2
17	1,01-5,83	5,0-1,0		2,00-3
18	2,90-1,01	2,0-5,0		
19	1,06-2,90			
20	3,06-1,06			
21	4,14-1,12			
22	0,00-4,14			

Таблица 3

Зависимость дозовой нагрузки от соотношения γ/n компонентов излучения [8]

Показатель	Соотношение					
	0	1	1,4	2,8	5,6	8,4
H_{max} , нБэр·см ² ·нейтр ⁻¹	5,5	7,2	7,9	10	15	20
H_{min} , нБэр·см ² ·нейтр ⁻¹	0,30	0,52	0,61	0,93	1,6	2,2
K_n (H_{max}/H_{min}) коэффициент неравномерности облучения	19	14	13	11	9,5	9,0

В тоже время с удалением человека от источника изменяется спектрально-угловое распределение излучения, возрастает вклад рассеянных нейтронов. Это должно сказываться и на распределении дозовой нагрузки по телу, по крайней мере в тех случаях, когда вклад нейтронного компонента велик. За счёт образования под действием быстрых нейтронов с $E_n=14$ МэВ вторичного (захватного) гамма-излучения, как в воздухе так и в грунте, возможно существование значительно большей равномерности облучения при нейтронном боеприпасе чем при термоядерном.

Тяжесть поражения от нейтронной компоненты при преимущественном облучении головы, возможно, связать также с развитием местных поражений слизистых оболочек рта и носоглотки (орофарингальный синдром) и в целом с "лучевыми ожогами" кожи и подкожных тканей. Проанализируем данные особенности гамма-нейтронного поражения.

2. Особенности спектрально-угловых характеристик излучения

В международных и национальных рекомендациях специально оговаривается, что эквивалентная доза может применяться только для оценки облучения в малых дозах (меньше или порядка 1 Зв в год), стохастических эффектов в организме. Известно, что относительная биологическая эффективность быстрых нейтронов при воздействии на живые ткани примерно в семь раз выше, чем у гамма-квантов. Такое соотношение означает, что, например, поглощенная доза нейтронного излучения 10 рад по своему биологическому воздействию на организм человека будет эквивалентна дозе 70 рад гамма-излучения. Однако это касается малых доз и стохастических эффектах в организме. Для детерминированных эффектов при остром кратковременном облучении гамма-нейтронным излучением, так называемый коэффициент каче-

ства (η), согласно [8, 14, 15], будет уменьшаться с увеличением дозовой нагрузки, по причине быстрого ослабления потока нейтронов.

С увеличением глубины у крупных биообъектов начинает нарастать доля вторичного гамма-облучения, образующегося при соударении и захвате слабо скоростных – тепловых нейтронов с $E_n \approx 0,025\text{эВ}$ тяжелыми ядрами (костная ткань). Возникающие при радиационном захвате гамма-кванты с энергией 2,23 МэВ взаимодействуя с тканью, дают основной вклад в дозу. В реакции на азоте образуются протоны с энергией 0,62 МэВ, которые в ткани имеют малый пробег, т.е. практически поглощаются в месте своего возникновения. Распределение поглощенной энергии между гамма-излучением и протонами, образующимися в реакции (n,p) на азоте, таково, что доза, обусловленная гамма-излучением, примерно в 20 раз больше дозы, вызванной протонами. Тканевую поглощенную дозу нейтронов можно представить в виде суммы составляющих, обусловленных протонами отдачи D_p , ядрами отдачи ($^{12}\text{C}, ^{14}\text{N}, ^{16}\text{O}$) $D_{яд}$, ионизирующими частицами, возникающими в ядерных реакциях D_p и гамма-квантами, возникающими при захвате нейтронов D_γ (и разрядке возбужденных ядер при неупругом рассеянии нейтронов). Вследствие этого эквивалентную дозу можно оценить следующим выражением:

$$H = \eta_n D_n + \eta_{яд} D_{яд} + \eta_p D_p + \eta_\gamma D_\gamma \quad (4)$$

Таким образом, особенностью биологического действия нейтронов является то, что различные виды вторичного излучения, создающего тканевую дозу, имеют различный коэффициент качества.

Вклад в тканевую дозу того или иного вида вторичного излучения изменяется с изменением энергии нейтронов, потому зависимость эквивалентной дозы, выраженной в бэрах, от энергии нейтронов будет отличаться от энергетической зависимости тканевой дозы, выраженной в радах.

Считается [1], что относительная биологическая активность нейтронов ядерного взрыва составляет 1,7. В диапазоне доз облучения (50-2000) бРэ в момент облучения отношение $D_{жкт}/D_{крт}$ изменяется в пределах (0,8-1,6). В этом случае коэффициент качества изменяется от 0,7 до 1,6. Нижние значения характерны для открытых и закрытых фортификационных сооружений, в подвалах зданий независимо от типа боеприпаса, а верхнее значение – на открытой местности в автомобилях, БТР, БМП при взрывах нейтронных боеприпасов. При дозах облучения (2000-15000) рад коэффициент качества приближается к единице. Доза 15000 рад определяет мгновенную (в течении 1-5 мин) утрату дее- или трудоспособности, связанную с потерей сознания. На сегодняшний день эта доза определяет максимальную величину диапазона измерений термлюминесцентного дозиметра ИД-11.

В работе [16] предлагается коэффициенты эффективности излучения проникающей радиации для различного типа боеприпасов (для нейтронного заряда - 2,2; для термоядерного -2,5; для атомного - 3,0). Данные значения, η каким то образом отражают неравномерность нейтронной компоненты, но опять же, на наш взгляд не в состоянии объяснить специфику поражающего действия гамма-нейтронного излучения нейтронного боеприпаса.

Для источника импульсного гамма-нейтронного излучения ПР ограничением пространства является только поверхность земли. В рассматриваемой дальней зоне спектрально-угловое распределение остаётся постоянным и не зависит от расстояния до центра взрыва. В этом случае большой вклад даёт рассеянное нейтронное излучение [8].

Анализ результатов исследований, показывает, что для импульсного гамма-нейтронного излучения на открытой местности распределение дозовой нагрузки по телу человека зависит от его положения (рис. 2).

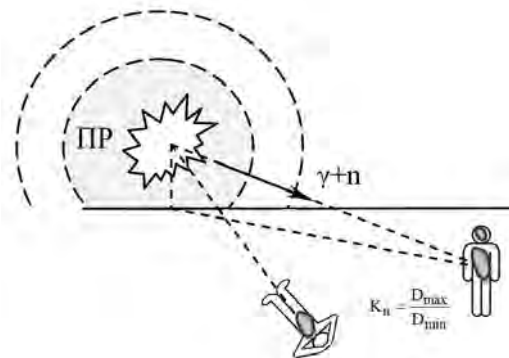


Рис. 2. Распределение дозовой нагрузки по телу человека на открытой местности (коэффициент неравномерности облучения)

В положении стоя грудью к источнику, максимальная доза находится на передней поверхности тела с перепадом дозы грудь – спина равной 2,4 и максимальным перепадом по телу $K_n = 3,6$. В положении стоя боком к источнику максимум дозы излучения локализуется на соответствующей боковой поверхности тела. Перепад дозы бок-бок равен 2,2, т.е. немного меньше, а максимальный перепад $K_n = 4,3$ – значительно больше, чем в случае облучения со стороны груди. В положении лёжа боком к источнику излучения максимум дозы по поверхности тела $K_n = 2,5$, по объёму тела – 4,3. Поэтому в целом облучение тела в поле излучения источника импульсного гамма – нейтронного излучения в воздухе оказывается значительно более равномерным, чем от точечного источника в помещениях [8]. Проявляется большое расстояние от источника и накопление рассеянного излучения, определяющего распределение дозовой нагрузки.

Таким образом, наиболее корректным подходом к оценке поражающего действия совместного

гамма-нейтронного излучения на человека по критерию «тяжесть и исход заболевания» целесообразно принять подход к определению поражающей дозы по Тарасенко [1]:

$$D_{\Sigma} = 1,7(\overline{D}_{\gamma} + \eta \cdot \overline{D}_n)\Psi_d\Psi_T, \quad (5)$$

где \overline{D}_{γ} (\overline{D}_n) – среднетканевые дозы гамма- и нейтронного излучений, соответственно, бРэ; η – коэффициент эффективности излучения для тела в целом (2,2-3); Ψ_d и Ψ_T – величины, характеризующие фактор эффективности распределения поглощённой дозы по длине и толщине туловища, соответственно (0,45-1). Дальнейшее развитие данной модели (6), целесообразно проводить в направлении исследования коэффициента качества вторичного гамма-излучения $E_{\gamma} = 8-10$ МэВ, образованного под действием быстрых нейтронов характерных для нейтронного боеприпаса (табл. 2).

3. Влияние продолжительности облучения

При прочих равных условиях облучения, конечный его результат "доза-эффект" зависит не столько от полной дозы, сколько от ее мощности, то есть времени, в течение которого она накоплена, а также как было показано выше, равномерности ее распределения. Это обусловлено тем, что в живом организме в ответ на облучение, так же, как и на любое другое вредоносное воздействие факторов окружающей среды, включаются защитные механизмы систем адаптации или компенсации, призванные обеспечить

стабильность внутренней среды организма (гомеостаз) и восстановить нарушенные функции. Для правильной оценки исхода облучения необходимо знать не только дозу, ее мощность и время облучения, но и скорость восстановительных процессов, происходящих в организме. Если облучение происходит за промежуток времени в несколько часов или более, то для возникновения эффекта нужна доза большая, чем при кратковременном облучении.

В биологической дозиметрии [17], в частности в работах Д. Лойда имеются очень убедительные доказательства того, что выходы хромосомных аберраций или микроядер связаны с дозой линейно-квадратичным уравнением для излучения с высоким ЛПЭ и линейным для излучения с низким ЛПЭ (рис. 3, а). Чем ниже мощность дозы, тем меньше частота треков ионизации в единицу времени, и, следовательно, имеется больше времени на репарацию первого повреждения до возникновения второго повреждения. Если проследить за соотношением "доза-эффект" при внешнем облучении изотопа Со-60 с различной мощностью дозы, то нетрудно заметить, что чем больше скорость накопления дозы, тем большие дозы требуются для таких же последствий. Считается, что указанный эффект, проявляются только к воздействию излучений с низкими значениями ЛПЭ (линейно-квадратичная зависимость), однако приведённые данные для нейтронов с $E_n = 14,7$ МэВ даёт основание предполагать наличия данного эффекта (при определённых условиях) и у нейтронной компоненты проникающей радиации нейтронного боеприпаса.

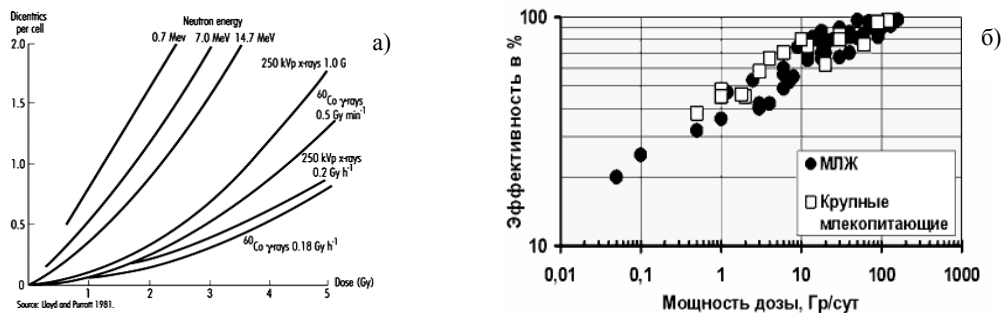


Рис. 3. Снижение эффективности радиационного воздействия при снижении мощности дозы

В основе отличий, присущих ОЛБ при воздействии нейтронами, лежат меньшая репаруемость нейтронных поражений на клеточном уровне и меньшая, в сравнении с гамма-излучением, проникающая способность (а стало быть и меньшая равномерность распределения дозы по телу). Нетрудно заметить, что эти факторы действуют в противоположенных направлениях. Поэтому при нейтронных воздействиях сильнее поражается кишечный эпителий, радиорезистентность которого в сравнении с кроветворной тканью в значительной мере связана с большей способностью к репарации сублетальных повреждений клеток. Кроветворная же система по-

ражается меньше, чем при соответствующей поглощённой дозе гамма-излучения. Это связано с ускорением процесса восстановления кроветворной ткани за счет миграции клеток из менее облучённых её участков. По этим же причинам серьёзные повреждения тонкой кишки развиваются даже при несмертельных дозах нейтронного облучения организма. Термин «острое радиационное воздействие» (воздействие в диапазоне мощности дозы излучения, в котором эффективность ионизирующего излучения в отношении рассматриваемого радиобиологического эффекта максимальна) предлагается как методологическое понятие для сопоставления облуче-

ний с произвольным характером распределения дозы во времени [18]. Граничные значений мощностей доз с низким значением ЛПЭ: 0,1 Гр/мин (менее 2 ч для костномозгового синдрома) и 0,6 Гр/мин (менее 1 ч для желудочно-кишечного синдрома). Тенденция зависимости среднелетального эффекта (LD_{50-30}) от скорости нарастания поглощённой дозы при облучении крупных млекопитающих подтверждается и экспериментальными исследованиями проводимыми Институтом медико-биологических проблем МЗ СССР (рис. 3, б) [18].

Данный эффект в работе учитывается коэффициентом эффективности радиационного воздействия K_γ , равный отношению дозы LD_{50-30} при кратковременном облучении с высокой мощностью дозы к дозе при протяжённом облучении длительностью от нескольких часов до нескольких суток. Для учёта эффекта растягивания дозы во времени, в линейно-квадратичную часть уравнения (рис.3а) в разрабатываемой модели снижения дееспособности целесообразно использовать функцию G , предложенную Ли и Кечезидом:

$$G(t/t_0) = \left(2t_0/t^2\right) \cdot \left(t - t_0 + e^{-t/t_0}\right), \quad (6)$$

где t – время, в течении которого происходило облучение; t_0 – средняя продолжительность разрывов, которая, как правило, составляет около 2 часов. Для более коротких интервалов между воздействиями функцию G можно заменить на $\exp(-t_1/t_0)$, где t_1 – время между воздействием. Экспериментальные данные, поддерживающие гипотезу функции G , были представлены Ллойдом и др. и Бочингером и др. [19]. Таким образом, потери дееспособности после смешанного гамма-нейтронного воздействия можно попробовать аппроксимировать выражением

(7), исходя из предположения о независимости действий этих излучений:

$$S = 100 \cdot e^{-(\alpha_\gamma \cdot D_\gamma + \beta_\gamma \cdot G \cdot D_\gamma^2 + \alpha_n \cdot D_n + \beta_n \cdot G \cdot D_n^2)} \quad (7)$$

где $\alpha_\gamma(\beta_\gamma)$ и $\alpha_n(\beta_n)$ – линейные и квадратические коэффициенты аппроксимации смешанного гамма-нейтронного воздействия.

4. Влияние импульсного характера воздействия гамма-нейтронного излучения

Необходимо заметить, что особенности биологического действия импульсного нейтронного излучения практически не изучены, хотя в отдельных работах и делалась попытка оценить цитогенетический эффект на культуре лимфоцитов крови человека при использовании импульсных источников электронов (Purrot R.J., 1977), а в других – при различных режимах импульсного облучения нейтронами (Севаньяев А.В., 1989; Поздышкина О.В., 2000). В работе [6] отмечается, что особенности проявления церебрального лучевого синдрома (симптомокомплекс – в течении нескольких минут после облучения развивается коллаптоидное состояние, сильнейшая слабость, атаксия, судороги), получившая в литературе название синдрома ранней переходной недееспособности (РПН), наиболее вероятно связано с импульсным характером гамма-нейтронного облучения (рис.4а).

Импульсный характер облучения предположительно предопределяет результат прямого и глубокого разрушения клеток, исключая возможность активации репаративных ферментативных систем и возможность быстрых процессов восстановления клеток.

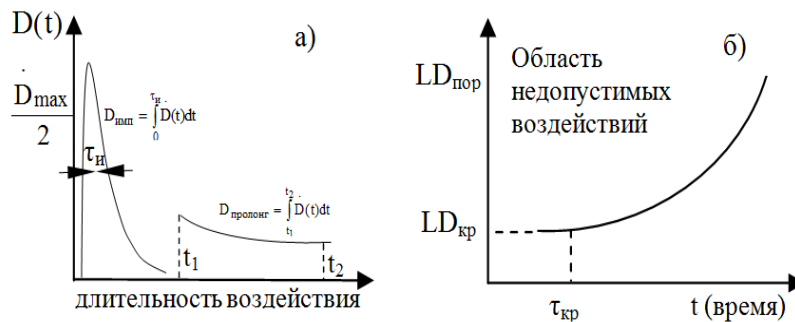


Рис. 4. Особенности импульсного воздействия гамма-нейтронного излучения проникающей радиации

За счёт выделения той же энергии ($D_{имп} = D_{продолг}$), за значительно меньшее время – эффекты предположительно будут разными. Степень радиационного поражения при импульсном воздействии в этом случае должна характеризоваться с помощью пороговой дозы, при поглощении которой за время действия импульса дозовой нагрузки наблюдается среднелетальный эффект (LD_{50}). Для импульсных воздействий с длительностью $\tau_n < \tau_{кр}$ эта доза (порция

энергии) постоянна и будет определяться критической дозой поражения. Если длительность импульса превышает $\tau_n \geq \tau_{кр}$, то доза поражения выше чем $LD_{кр}$ (рис. 4, б).

Оценим мощность дозы и длительность импульса нейтронной компоненты ПР нейтронного боеприпаса [1]. Для подсчёта мощности поглощённой дозы в ткани примем $D = 5 \cdot 10^3$ рад. В этом случае $R = 3,53$ км. Примем, что нейтроны равномерно

распределены в интервале $E_n=13,9-14,2$ МэВ. В этом случае длительность импульса в сек определяется выражением

$$t_{n14} = \frac{10^{-6}}{13,8} (E_{n1-0,5} - E_{n2-0,5}) = 2,065 \cdot 10^{-10} R, \quad (8)$$

где $E_{n1} = 13,9$ МэВ; $E_{n2} = 14,2$ МэВ.

Используя выражение (2), (3) из соотношения $D_n = \frac{D_\Sigma}{t_{n14}}$, получим, что максимальная мощность поглощённой дозы, создаваемой нейтронами, будет

равна $6,9 \cdot 10^9$ рад/с, а длительность импульса $t_{n14}=7,3 \cdot 10^{-9}$ с, причём поглощённой дозой, создаваемой мгновенным гамма-излучением, можно пренебречь (вклад её не превышает 0,4 % от суммарной дозы). При уменьшении выхода нейтронов с энергией 14 МэВ суммарная доза 5000 рад будет получаться при мощностях поглощённой дозы более $6,9 \cdot 10^9$ рад/с, а длительность импульса уменьшается. Расчётные значения характеристик поглощённой дозы нейтронов при различных взрывах для $D_n=452-605$ рад приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика поглощённой дозы нейтронов при различных взрывах

Тип боеприпаса и вид взрыва	Расстояние от центра взрыва R, м	Мощность поглощённой дозы нейтронов D_n , рад/с	Поглощённая доза D_n , рад	Эффективная длительность импульса $t_{n\text{эфф}}$, мкс
Высотный взрыв НБ	3530	$6,9 \cdot 10^9$	5000	0,73
	11160	$2,2 \cdot 10^8$	500	2,3
	35300	$6,8 \cdot 10^6$	50	7,3
Воздушный взрыв НБ	1050	$8,6 \cdot 10^6$	566	67
	1600	$2,5 \cdot 10^6$		70
Наземный взрыв НБ	850	$2,55 \cdot 10^8$	4958	19
	1250	$1,2 \cdot 10^7$	452	38
	1600	$6,4 \cdot 10^5$		47,8

Вклад в поглощённую дозу нейтронов с энергией 13,9 – 14, МэВ при воздушном взрыве нейтронного боеприпаса на расстояниях $R=1050$ и 1500 м составляет 5,1 и 1% при мощности поглощённой дозы $1,1 \cdot 10^9$ и $1,8 \cdot 10^7$ рад/с соответственно. Основной вклад в дозу нейтронов при взрыве нейтронных боеприпасов вносят быстрые нейтроны с энергией от 12 до 14 МэВ. При этом значение мощности дозы, создаваемые ими на расстояниях до 900 м от центра взрыва, будут превышать мощности доз, создаваемые спектром нейтронов при ядерном взрыве в 1000 и более раз (до 10^9-10^{11} сГр/с).

Таким образом, подводя итог проведённому анализу особенности импульсного гамма-нейтронному воздействию ПР необходимо объективно признать, что для корректной оценки радиационного поражения, помимо учёта чисто энергетических характеристик (D_i – среднетканевая поглощённая дозы) и качества излучения (η), необходимо учитывать: временную неравномерность воздействия (K_v – коэффициент учитывающий мощность дозы и характер распределения дозы во времени); макропространственное распределение дозы по телу (K_p – коэффициент равноценности воздействия). Критерием и количественной мерой радиационной опасности ПР предлагается взять обобщённый дозиметрический функционал [18]:

$$H[3в] = \left(\sum_{i=1}^n \overline{D_i} [\Gamma p] \cdot \eta(L, D_i) \cdot K_v \cdot K_p \right). \quad (9)$$

Такой подход, на наш взгляд единственным способом приведения сложного характера облучения к условиям стандартного радиационного воздействия,

хорошо проработанного в современной радиологии. Очевидно, что одной и той же равноценной дозе (доза в условиях стандартного – равномерного облучения) соответствует бесконечное множество вариантов неравномерного облучения, определяемое спецификой импульсного гамма-нейтронного воздействия и условиями экранирования биологического объекта.

Выводы

1. При взрыве нейтронного боеприпаса очень высока доля крайне тяжелых форм лучевой болезни (церебральная, кишечная, токсическая), характеризующихся быстрым и практически одномоментным выходом пораженных из строя, в то время как доля поражений средней и легкой степени тяжести, когда выход пораженных из строя отсрочен от момента воздействия проникающей радиации на несколько часов, сравнительно мала.

2. Для точного прогноза исходов радиационных поражений важна информация о соотношении дозовых компонент гамма-нейтронного излучения в суммарной поглощённой дозе. Невозможность различать тип боеприпаса, а значит распределение по различным видам излучений их спектрально-энергетических характеристик, приводит к катастрофическим последствиям в оценке радиационного поражения подразделений и частей за данными прогноза.

3. Основным фактором радиационного поражения организма является вторичное гамма-излучение, приводящие к его неравномерному поражению. В целом облучение тела человека в поле излучения импульсного гамма-нейтронного излучения ПР

нейтронного боеприпаса оказывается значительно более равномерным, чем в случаях облучения от точечных источников в помещениях. Проявляются большие расстояния от центра взрыва и накопление рассеянного излучения, определяющего распределение дозовой нагрузки.

4. Для корректного оценивания радиационных потерь в условиях сложного характера радиационного воздействия, каким является импульсное гамма-нейтронное излучение, единственным путём является приведение сложного характера облучения к условиям стандартного радиационного воздействия на основе обобщенного дозиметрического функционала.

Список литературы

1. Тарасенко Ю.Н. Ионизационные методы дозиметрии высокоинтенсивного ионизирующего излучения / Ю.Н. Тарасенко. – М.: Техносфера, 2013. – 264 с.
2. Самойлов Г.Л. Оружие массового поражения и защита от него / Г.Л. Самойлов. – М.: Воениздат МО СССР, 1973. – 396 с.
3. Защита от оружия массового поражения / Под ред. В.В. Мясникова. – М.: Воениздат, 1989. – 389 с.
4. Актуальные проблемы военной радиологии / Под ред. Э.А.иНечаева. – М.: Воениздат, ЦВМУ МО, 1991.
5. Бадюгин И.С. Военная токсикология, радиология и защита от оружия массового поражения / И.С. Бадюгин. – М.: Воениздат, 1992. – 188 с.
6. Военная токсикология, радиобиология и медицинская защита: Учебник / Под ред. С.А. Куценко. – СПб: ООО «Издательство ФОЛИАНТ», 2004. – 528 с.
7. Bird Zaider M. The sequential irradiation of mammalian cells with X rays and charged particles of high LET / Bird Zaider M., Rossi H., Hall E. // *Radiation Research*. – 1983. – V. 93. – P. 444-452.
8. Дозовая нагрузка на человека в полях гамма-нейтронного излучения / [Гозенбук В.Л., Кеуриим-Маркус И.Б., Савинский А.К., Чернов Е.Н.]. – М.: Атомиздат, 1978. – 168 с.
9. Белоус В. Тактическое оружие в новых геополитических условиях / В. Белоус // *Ядерный контроль*. – 1996. – № 14. – С. 2-7.
10. Соков Н. Тактическое ядерное оружие: новые геополитические реальности или старые ошибки / Н. Соков // *Ядерный Контроль*. – 1997. – №26. – С. 5-9.
11. Василенко И.Я. Ядерное оружие нового поколения и его радиационно-гигиенические аспекты / И.Я. Василенко, О.И. Василенко // *Бюллетень по атомной энергии*. – 2004. – № 1. – С. 60-62.
12. Широкоград А. Малая бомба для малой войны / А. Широкоград // *Независимое военное обозрение*. – 6 марта 1998 г.
13. Тарасенко Ю.Н. Пепел Чернобыля. Сличения средств измерений ионизирующих излучений в зонах радиоактивного заражения после взрыва четвёртого блока ЧАЭС / Ю.Н. Тарасенко. – М.: Техносфера, 2011. – 232 с.
14. Кеуриим-Маркус И.Б. Эквидозиметрий / И.Б. Кеуриим-Маркус. – М.: Атомиздат, 1980. – 191 с.
15. Гозенбук В.Л. Дозиметрические критерии тяжести острого облучения человека / В.Л. Гозенбук, И.Б. Кеуриим-Маркус. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 184 с.
16. Васильев И.О. Исследования полей нейтронного и гамма-излучений реактора с целью создания на нём рабочих эталонов единиц дозиметрических величин нейтронного и гамма-излучений / И.О. Васильев, Ю.В. Лопатин // *Проблемы метрологии*. – 2014. – № 2. – С. 12-17.
17. Lloyd, D.C., Edwards, A.A., Prosser, J.S., Corp, M.J., The dose response relationship obtained at constant irradiation times for the induction of chromosome aberrations in human lymphocytes by cobalt-60 gamma rays, *Radiat. Environ. Biophys.* 23(1984). – P. 179-189.
18. ГОСТ 25645.201-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Термины и определения.
19. Использование цитогенетической дозиметрии для обеспечения готовности и реагирования при радиационных аварийных ситуациях МАГАТЭ, ВЕНА, 2014 год.
20. Straker E.A., Gritzner M.L. Neutron and Secondary γ -Ray Transport in Infinite Homogeneous Air. *Computing Technology Center, ORNL-4464, Dec. 1969.*
21. Speilberg D. Neutron Fluxes from a Point Fission Source in Air, Moments Method Calculation / D. Speilberg // *NRDL-OCDM, Shielding Symposium Proc., R and L, 1960, N 110.* – P. 416-423.
22. Karcher R.H. Neutron Air-Transport Data for the Design of Protective Structures / R.H. Karcher // *Nucl. Sci. and Engng.* – 1967. – V. 27, N 2. – P.367-387.
23. Распространение ионизирующих излучений в воздухе / В.А. Климанов, С.А. Коновалов, В.А. Кочанов и др. Под ред В.И. Кухтевича и В.П. Машиковича. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

Поступила в редколлегию 11.03.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Стаховский, Национальный технический университет «ХПИ», ФВП, Харьков.

БИОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ІМПУЛЬСНОГО ВПЛИВУ РАДІАЦІЙНОГО ФАКТОРУ ВІЙСЬКОВОГО ХАРАКТЕРУ

І.Ю. Чернявський, В.В. Марущенко, В.Б. Матикін, С.А. Писарев, С.М. Меньшов, В.Є. Гайдабука

В рамках НДР по модернізації радіологічних принципів військової системи радіаційної безпеки у роботі аналізуються медико-радіологічні особливості біологічного впливу імпульсного гамма-нейтронного випромінювання проникаючої радіації на різній відстані від центру вибуху. Пропонується враховувати просторово-часовий розподіл поглиненої дози шляхом оцінки узагальненого дозиметричного функціоналу.

Ключеві слова: гамма-нейтронний потік проникаючої радіації, нерівномірність опромінення.

BIOLOGICAL ASPECTS OF IMPULSE EXPOSURE OF RADIATION FACTOR WHICH HAS A MILITARY NATURE

I.Y. Cherniavskiy, V.V. Marushenko, V.B. Matykin, S.A. Pysarev, S.N. Menshov, V.E. Haydobuka

As part of the research work for the modernization of military radiological principles of radiation safety, the paper analyzes the medical and radiological features of the biological effect of pulsed gamma-neutron penetrating radiation at different distances from the center of the explosion. It is proposed to take into account the spatiotemporal distribution of absorbed dose by evaluation of the generalized dissymmetric functional.

Keywords: gamma-neutron flux of penetrating radiation, unevenness of irradiation.