

И.Ю. Чернявский
факультет Військової Підготовки НТУ «ХПІ»
ім. Верховної Ради України

РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЁННОЙ ДОЗЫ ИМПУЛЬСНОГО ГАММА-НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЕННОГО ХАРАКТЕРА

В рамках НИР по модернизации радиологических принципов системы радиационной безопасности в работе анализируются пространственное распределения поглощённой дозы путём оценки коэффициента неравномерности облучения.

Ключевые слова: *гамма-нейтронный поток проникающей радиации, неравномерность*

І.Ю. Чернявський
Факультет Військової Підготовки НТУ «ХПІ»
ім. Верховної Ради України

РАДИОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ПОГЛИНЕНОЇ ДОЗИ ІМПУЛЬСНОГО ГАММА-НЕЙТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

З метою оптимізації радіологічних принципів системи радіаційної безпеки у роботі аналізуються можливі способи врахування просторового розподілу поглиненої дози шляхом оцінки коефіцієнта нерівномірності опромінення.

Результати. *Проведена порівняльна оцінка відношення доз нейтронного і гамма-випромінювання, а також отримано залежності коефіцієнта нерівномірності і індексу зниження біологічного ефекту від відстані до центру вибуху для боєприпасів різного типу. В цілому опромінення тіла людини у полі випромінювання імпульсного гамма-нейтронного випромінювання нейтронного боєприпасу виявляється значно більш рівномірним, ніж у випадках опромінення під час вибуху термоядерного боєприпасу. Функціонал об'ємного розподілу дозового навантаження залежить від співвідношення γ/n компонентів, яке залежить від відстані до центру ядерного вибуху, від наявності розсіяного випромінювання; спектральних особливостей типу боєприпасу (наявність захватного гамма-випромінювання в повітрі і ґрунті); орієнтації людини у полі гамма-нейтронного випромінювання; екранування тіла людини*

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

I.Y. Cherniavskiy
Guards department of military training of the National Technical University "KhPI"
behalf of the VerhovnaRada of Ukraine

RADIOLOGICAL ASPECTS OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ABSORBED DOSE OF PULSED GAMMA-NEUTRON RADIATION

In order to optimize radiological principles radiation safety systems this paper examines possible ways of accounting the spatial distribution of the absorbed dose by assessment of the uneven irradiation rate.

Results. A comparative evaluation of the doses ratio of neutron and gamma radiation was conducted, and obtained dependence of unevenness factor and the reduction index of biological effect which depended on distance from the center of the explosion of different types of ammunition. In general, irradiation of the human body in a field of pulsed gamma-neutron radiation of neutron ammunition is much more uniform than in the cases of irradiation in the explosion of thermonuclear ammunition. Functional of distribution of dose load depends on the ratio γ/n components, which is depends on the distance from the center of a nuclear explosion, on the presence of the scattered radiation; on the spectral features of the type of ammunition (the presence of capture gamma radiation in the air and soil); on human orientation in a field of gamma-neutron radiation; on the human body screening

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

Вступительная часть

Постановка проблемы. Одним из путей получения оперативной и достоверной информации о степени тяжести радиационных поражений личного состава в условиях воздействия проникающей радиации ядерного взрыва является прогнозирование дозовых нагрузок путём: анализа радиационных характеристик гамма-нейтронного излучения, учёта особенностей размещения, экранирования элементов боевого порядка подразделений и частей. В условиях сложного характера радиационного воздействия такой поход, на наш взгляд единственным способом приведения сложного характера облучения гамма-нейтронным излучением к условиям стандартного радиационного воздействия, хорошо проработанного в современной радиологии через понятиеравноценной дозы [5,7,8,10]. 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 условиями размещения подразделений и частей на местности. Не учёт данных модифицирующих факторов, приводит к получению некорректных результатов в оценки степени радиационного поражения. Исследования [5] предполагают, что неравномерность облучения (различие в дозах, поглощённых различными областями тела – превышает 10-15 %) снижает поражающее действие излучения более чем в 3 раза по сравнению с равномерным облучением при одинаковой максимальной эквивалентной дозе.

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. В действующих методиках прогнозирования и оценки радиационной обстановки [12] не учитываются особенности такого воздействия.

Данный факт обуславливает необходимость разработки моделей, учитывающих влияние пространственной неравномерности радиационного воздействия на радиобиологический эффект, для корректной оценки последствий радиационного поражения.

Анализ последних исследований и публикаций. В рамках исследования [5] распределения тканевой дозы от внешнего гамма-нейтронного излучения разного состава в модели тела человека были построены кривые выживаемости человека при облучении с различным соотношением γ/n . Эксперименты были проведены на небольших расстояниях без учёта особенностей распространения импульсного гамма-нейтронного излучения в атмосфере [11]. Согласно [1,6] на расстояниях, где суммарная доза равна примерно 200-500 бэр при мощности взрыва $0,1-10^3$ 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 раздельной

регистрации доз должно учитываться при разработке, градуировке и поверке войсковых дозиметров. В работе [9] исследованы соотношения доз гамма-нейтронного излучений от мощности наземного ЯВ. Авторы показывают, что соотношение дознейтронного и гамма-излучений в условиях применения ядерного оружия, когда проникающая радиация рассматривается какосновной поражающий фактор, составляет от 1 до 4. Данная модель неравномерности дозового распределения, учитывая боеприпасы сверхмалой мощности (до 1кТ), в действительности не учитывает особенности воздействия быстрых нейтронов, характерных для нейтронных боеприпасов, а значит значения перепадов дозовых компонент, приведённые в данных исследованиях, не корректно использовать для тактического ядерного оружия.

Таким образом, имеющаяся в открытой литературе информация по вопросу особенностей воздействия импульсного гамма-нейтронного излучения проникающей радиации (ПР) различных типов ядерных боеприпасов, соотношения дозовых компонент, учёта неравномерности облучения при оценки радиационных потерь– довольно противоречива и требует уточнений.

Цель работы: В рамках создания модели радиационного поражения на основе обобщённого дозиметрического функционала, проанализировать особенности пространственного распределения дозовой нагрузки импульсного гамма-нейтронного воздействия, за счёт соотношения дозовых компонентпроникающей радиации различных типов боеприпасов.

Основной материал. 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]:

$$D_{\Sigma} = 1,7(\overline{D}_{\gamma} + \eta \cdot \overline{D}_{n})\Psi_{д}\Psi_{т} \quad (1)$$

где $\overline{D}_{\gamma}(\overline{D}_{n})$ – среднетканевые дозы гамма- и нейтронного излучений, соответственно, БРэ; η – коэффициент эффективности излучения для тела в целом (2,2-3); $\Psi_{д}$ и $\Psi_{т}$ – величины, характеризующие фактор эффективности распределения поглощённой дозы по длине и толщине туловища, соответственно (0,45-1).

В работе не даются пояснения использования данного модифицирующего фактора (эффективности распределения поглощённой дозы), однако он должен существенно влиять на тяжесть и исход заболевания.

Учет пространственного макрораспределения гамма-нейтронного излучения ПР путём воспроизведения геометрических параметров контролируемой области тела, например кожи, учет конфигурации и размеров тела человека и его органов, целесообразно проводить используя понятие коэффициента неравномерности.

В модели, предложенной Г.М. Аветисовым [8], неравномерное облучение крупных биообъектов рассматривается как плавный переход от равномерного облучения к локальному. Основными параметрами модели является коэффициент неравномерности облучения $K_{н}$ и индекс выраженности снижения биологического эффекта I :

$$K_{н} = \frac{D_{max}}{D_{min}} \quad I = \frac{D_{max}}{D_p} \quad (2)$$

где D_{max} и D_{min} – максимальная и минимальная поглощённые дозы в организме; D_p – доза в условиях равномерного облучения, при которой наблюдается та же выраженность биологического эффекта, что и при неравномерном облучении с данными $K_{н}$ и D_{max} . В соответствии с основными закономерностями радиобиологии индекс I растёт с увеличением неравномерности $K_{н}$. Сама модель представлена простой эмпирической зависимостью, связывающий индекс биологического эффекта с коэффициентом неравномерности

$$I = A \cdot \frac{1}{K_n}$$

(3)

где A – числовой коэффициент значение которого зависит от вида млекопитающего и направления перепада дозы по телу (вдоль продольной оси тела, по поперечной оси и т.п.). Для человека в случае облучения в направлениях, перпендикулярных продольной оси тела $A=2-5$. С радиобиологических позиций коэффициент A отражает наибольшую степень снижения биологического эффекта, которую можно получить при применении данного способа неравномерного воздействия. В исследованиях [5], приводятся ориентировочные данные коэффициента неравномерности с учётом угловой ориентации положения тела к воздействию гамма-нейтронному воздействию ПР.

В положении стоя грудью к источнику (рис.1), 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.

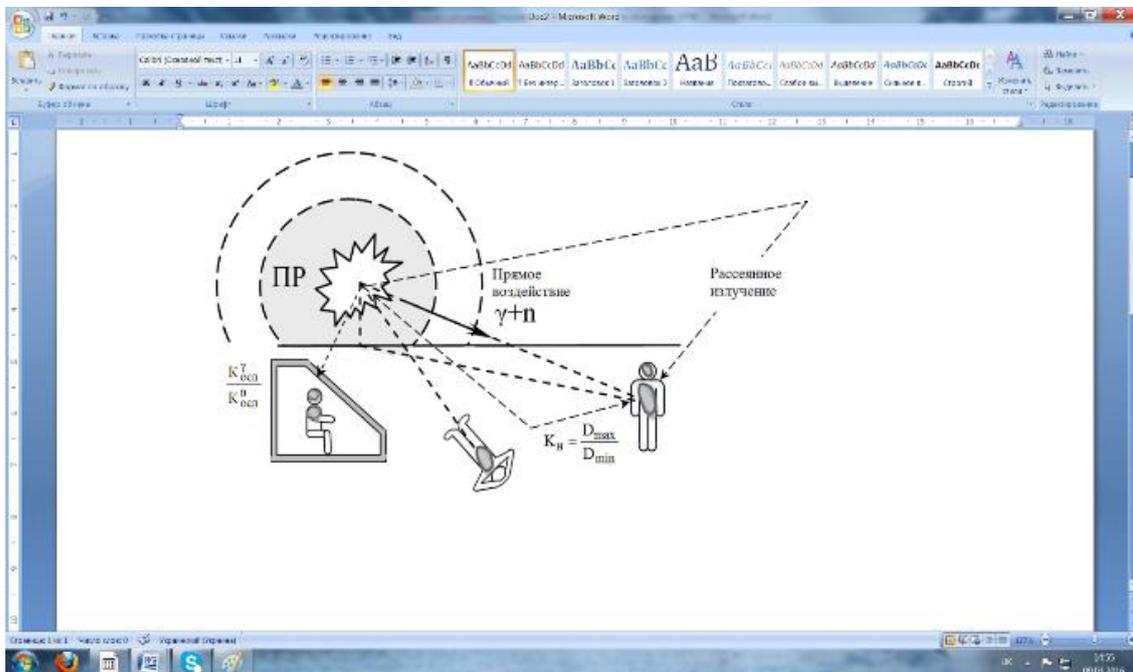


Рис.1. Распределение дозовой нагрузки по телу военнослужащего за счёт прямого и рассеянного гамма-нейтронного воздействия проникающей радиации

Однако в боевой обстановке чаще всего могут возникать сочетанные радиационные поражения с преимущественным воздействием на голову и развитием при достижении достаточной дозы церебрального и офарингеального синдромов. На втором месте по вероятности возникновения стоят варианты с преимущественным облучением живота и развитием при соответствующей дозе модифицированного кишечного синдрома [4].

Чтобы оценить возможный диапазон коэффициента неравномерности, вызванного соотношением дозовых компонент проникающей радиацией (γ/n), проведём анализ особенностей последствий облучений гамма-нейтронным излучением ПР на открытой местности на различных расстояниях от центра взрыва (табл.1). Воспользуемся данными приведёнными в работах [1,9,12], а также действующей 30% градацией степени ОЛБ от внешнего облучения [10,11].

Таблица 1

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

Ядерный (термоядерный) боеприпас		Взрывной боеприпас	
Расстояние (м)	D _{0,1} (рэд)	Расстояние (м)	D _{0,1} (рэд)
100	600	100	60000
700	250	1000	12000
760	150	1600	16000
1200	100	8100	8100
1450	20	650	650
1750		450	450
1800		200	200
2500		100	100
		35	35

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 центра взрыва) на личный состав, что отражается на степени дееспособности подразделений и частей. При невозможности стандартизации засечки различия тип боеприпаса (ядерный или нейтронный), данный факт, безусловно,

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 центра 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. 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 [9] 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.2).

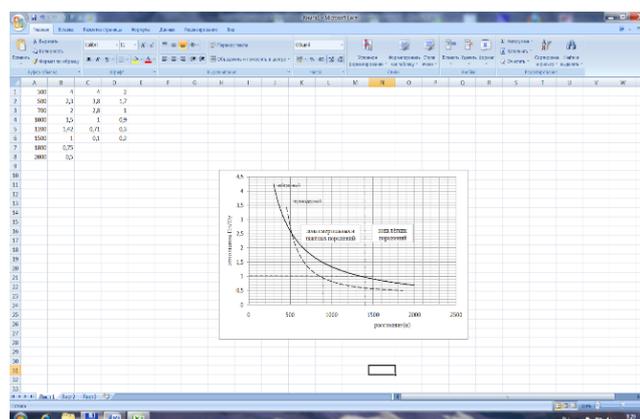


Рис.2. Сравнительная оценка отношения доз нейтронного и гамма-излучения

Для термоядерного взрыва граница дозового равновесия ($D_n \approx D_\gamma$) смещается к центру взрыва и составляет примерно 800-900 м. Анализ полученной зависимости (рис.3) показывает, что интересующая нас граница зоны смертельных и тяжёлых поражений напрямую связана с преобладанием нейтронной составляющей (до 4-х раз), а также биологической эффективностью нейтронного излучения (η), зависящего от характерного спектра данного типа боеприпаса– выражение (1).

С другой стороны, основной вклад в поглощённую дозу вторичного гамма-излучения вносят процессы неупругого соударения и захвата быстрых нейтронов ($E_n=14$ МэВ), характерных для спектра нейтронного боеприпаса. Вклад различных компонентов во вторичное (захватное) гамма-излучение приведён на рис.3, а также в табл.2 [1]

Таблица 2

Вклад различных компонентов в процентах в дозу вторичного гамма-излучения при взрыве на высоте 15 м

Расстояние, м	Вклад нейтронов, взаимодействующих с воздухом		Вклад нейтронов, взаимодействующих с грунтом		
	Быстрые нейтроны	Промежуточные нейтроны	Тепловые нейтроны	Суммарный вклад	Быстрые нейтроны
Источники нейтронов с энергией $E_n = 12,5-15$ МэВ					
50	54,0	1,0	0,5	55,5	40,0
200	79,0	1,8	1,1	81,9	11,4
400	81,4	2,1	2,0	85,2	7,0
800	82,5	1,7	3,0	87,5	5,0
1200	83,8	1,5	3,7	89,0	4,0
Источники нейтронов со спектром деления					
50	1,5	1,5	6,0	9,0	9,0
200	1,7	4,0	12,3	18,0	4,0
400	1,9	9,3	22,0	33,2	2,6
800	2,1	18,0	36,0	56,1	1,6
1200	2,1	22,0	49,0	73,1	1,1

Из приведенных данных видно, что основной вклад в поглощённую дозу вторичного гамма-излучения вносят процессы неупругого соударения и захвата быстрых нейтронов. Следует отметить, что по данным [27] на расстояниях менее

Анализ представленных данных показывает, что на близком расстоянии от центра взрыва значительный вклад в дозу создаётся при взаимодействии нейтронов с элементами земли, но с увеличением расстояния вклад этой компоненты быстро уменьшается. На расстоянии порядка 1200 м вклад от взаимодействия быстрых нейтронов с грунтом составляет только 4%, а от взаимодействия с элементами воздуха – 85%. Второй по значению вклад в дозу вторичного гамма-излучения создаётся на этом расстоянии от радиационного захвата тепловых нейтронов, однако он не превышает 10 %. Поэтому, можно предположить, что на расстояниях представляющих интерес с точки зрения тяжести радиационного поражения, помимо потока нейтронной составляющей ПР, значительное влияние оказывает именно вторичное (захватное) гамма-излучение высокой энергии (до 6,5 МэВ). Не подвергая сомнению, коэффициент качества данного фотонного излучения, проведём анализ возможного вклада данного излучения в создаваемую равномерность облучения на различных расстояниях от центра взрыва на открытой местности.

Используя экспериментальные данные зависимости коэффициента неравномерности

$K_{\text{н}} = \frac{D_{\text{max}}}{D_{\text{min}}}$ (перепад дозовой нагрузки от соотношения γ/n компонентов излучений полученных в работе [5], и рассчитанных значений соотношения дозовых компонент для боеприпасов мощностью 1 кт, приведённые на рис.2, проведём аппроксимацию значений коэффициента неравномерности облучения гамма-нейтронным воздействием ПР на открытой местности рис.3а. Зависимость индекса I (выражение 2) выражающего снижение биологической эффективности от расстояния до центра взрыва представлена на рис.3б.

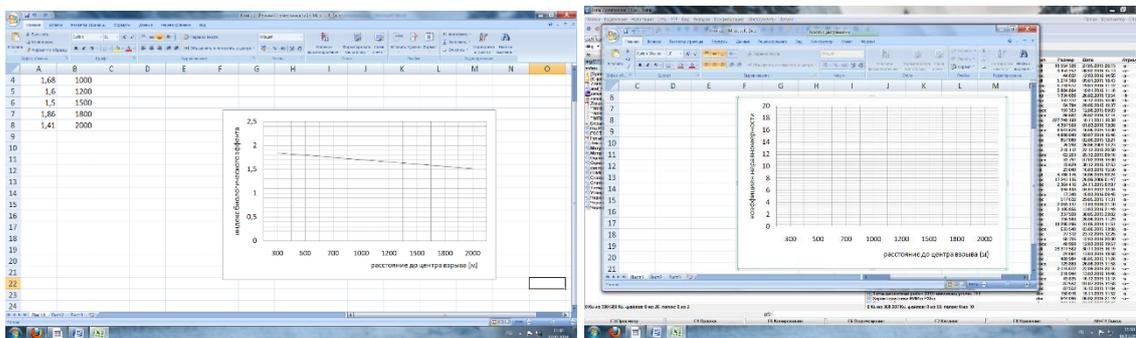


Рис. 3. Зависимости коэффициента неравномерности и индекса снижения биологического эффекта от расстояния до центра взрыва боеприпасов разного типа.

Анализ полученных зависимостей (рис.3), показывает, что коэффициент неравномерности снижается обратно квадрату расстояния до центра взрыва не только за счёт снижения нейтронной составляющей ПР, но и за счёт рассеянного излучения как для термоядерного так и для нейтронного боеприпаса. Несмотря на доминирование нейтронной компоненты для нейтронного боеприпаса, на расстояниях до 1500 м (рис. 3а), снижения неравномерности происходит значительно быстрее, за счёт присутствия в спектре излучения быстрых нейтронов с $E_n=14$ МэВ вызывающих при взаимодействии с воздухом и грунтом – вторичное(захватное) гамма- излучение со средней энергией излучения порядка 6,5 МэВ [1,11]. С расстояний начиная порядка 1500 м для нейтронного боеприпаса 1 кт, перепад дозовых нагрузок на открытой местности можно оценивать в диапазоне 1,5-3, что соответствует современным представлениям в радиологии [2,3,4] о равномерном облучении. Данная граница согласуется также с дозовым равновесием ($D_n \approx D_\gamma$) (рис.3), определяющим начало доминирования гамма-компоненты в смешанном излучении ПР.

Таким образом, проведённый анализ показывает, что коэффициент неравномерности связанный с соотношением дозовых компонент ПР и связанный с ориентацией человека в поле гамма-нейтронного излучения имеют примерно одинаковый порядок.

Выводы

1. Проведён анализ особенностей последствий облучений гамма-нейтронным излучением ПР на открытой местности на различных расстояниях от центра взрыва ядерных боеприпасов различного типа. При взрыве нейтронного боеприпаса очень высока доля крайне тяжелых форм лучевой болезни (церебральная, кишечная, токсемическая), 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 и распределение по различным видам излучений их спектрально-энергетических характеристик, приводит к катастрофическим последствиям в оценке радиационного поражения подразделений и частей поданными прогноза.

3. Проведена сравнительная оценка отношения доз нейтронного и гамма-излучения, а также получены зависимости коэффициента неравномерности и индекса снижения биологического эффекта от расстояния до центра взрыва для боеприпасов разного типа. В целом облучение тела человека в поле излучения импульсного гамма-нейтронного излучения ПР нейтронного боеприпаса оказывается значительно более равномерным, чем в случаях облучения при взрыве термоядерного боеприпаса. Сказываются большие расстояния от центра взрыва и накопление рассеянного излучения, определяющего распределение дозовой нагрузки, а также вторичное (захватное) гамма-излучение.

4. Равноценная доза зависит от характеристик поля излучения, причем она не пропорциональна уровню облучения и не аддитивна для разных компонент ПР. Поэтому для определения равноценной дозы необходимо использовать фантомные измерения или расчеты распределения дозовой нагрузки по телу человека. Функционал объемного распределения дозовой нагрузки зависит от соотношения γ/n компонентов, которое зависит от расстояния до центра ядерного взрыва, от наличия рассеянного излучения; спектральных особенностей типа боеприпаса (наличие захватного гамма-излучения в воздухе и грунте); ориентации человека в поле гамма-нейтронного излучения; экранирования тела человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Тарасенко Ю. Н. Ионизационные методы дозиметрии высокоинтенсивного ионизирующего излучения – М.: Техносфера, 2013. – 264 с.
2. Актуальные проблемы военной радиологии под ред. Нечаева Э.А. М., Воениздат, ЦВМУ МО, 1991.
3. Бадюгин И.С. Военная токсикология, радиология и защита от оружия массового поражения. М., Воениздат, 1992.
4. Куценко С.А., Бутомо Н.В., Гребенюк А.Н. и др.. Военная токсикология, радиобиология и медицинская защита: Учебник/ Под ред. С.А. Куценко. – СПб: ООО «Издательство ФОЛИАНТ», 2004. -528 с.
5. Дозовая нагрузка на человека в полях гамма-нейтронного излучения. М., Атомиздат, 1978.- 168 с. Авт.: Гозенбук В.Л., Кеирим-Маркус И.Б., Савинский А.К., Чернов Е.Н.
6. Тарасенко Ю.Н. Пепел Чернобыля. Сличения средств измерений ионизирующих излучений в зонах радиоактивного заражения после взрыва четвертого блока ЧАЭС. Москва: Техносфера, 2011.–232 с.
7. Кеирим-Маркус И. Б. Эквидозиметрий. - М.: Атомиздат, 1980, 191 с.
8. Гозенбук В.Л., Кеирим-Маркус И.Б. Дозиметрические критерии тяжести острого облучения человека. - М.: Энергоатомиздат, 1988. -184 с.
9. Васильев И.О., Лопатин Ю.В., Исследования полей нейтронного и гамма-излучений реактора с целью создания на нём рабочих эталонов единиц дозиметрических величин нейтронного и гамма-излучений/ Проблемы метрологии. Научно-технический журнал «Вестник Метролога» № 2, 2014 г. С. 12-17.
10. ГОСТ 25645.201-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Термины и определения.
11. Распространение ионизирующих излучений в воздухе / Климанов В.А., Коновалов С.А., Кочанов В.А. и др. Под ред В.И. Кухтевича и В.П. Машковича. – М.: Атомиздат, 1979. - 216 с.
12. Защита объектов народного хозяйства от оружия массового поражения: Справочник/Под редакцией Г.П. Демиденко. 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вицашк. Головное изд-во, 1989.–287 с.