
ОРИГІНАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 614.876

ИГОРЬ ЮРЬЕВИЧ ЧЕРНЯВСКИЙ¹, ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ ВИННИКОВ²

¹ *Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

² *ГУ «Институт медицинской радиологии им. С. П. Григорьева НАМН Украины», Харьков*

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПОТЕРЮ ДЕЕСПОСОБНОСТИ ЧЕЛОВЕКА В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

Цель работы. Определить возможность учета факторов, приводящих к неравномерности радиационного облучения, для коррекции прогноза тяжести радиационного поражения и оценки потерь дееспособности личного состава во время воздействия импульсного гамма-нейтронного излучения ядерного взрыва.

Материалы и методы. Информационный поиск по данным литературы, методы анализа и синтеза информации, математическое моделирование.

Результаты. На основании результатов математического моделирования радиационно-индуцированных потерь дееспособности среди личного состава для различных условий облучения осуществлено ранжирование факторов, которые необходимы для включения в модель прогноза тяжести радиационного поражения во время действия современных ядерных боеприпасов. Представляется крайне необходимым учет соотношения γ/n компонент и спектральных характеристик нейтронного излучения в качестве основных факторов при оценке тяжести радиационного поражения в условиях импульсного действия гамма-нейтронного излучения от ядерного взрыва. Ведущим механизмом немедленной потери дееспособности личного состава при взрыве ядерного боеприпаса является краниальное облучение в больших дозах, вызывающее орофарингеальные синдромы и синдромы ранней переходящей недееспособности.

Выводы. В условиях применения нейтронных боеприпасов основную оценку следует осуществлять в сроках развития крайне тяжелой формы острой лучевой болезни и гибели пораженных лиц в течение нескольких суток. При этом остается сравнительно малая доля лиц с поражениями средней и легкой степени тяжести, потеря дееспособности которых отложена с момента воздействия проникающей радиации на несколько часов. Изложенный выше подход представляется достаточно целесообразным для включения в новую концепцию военной радиационной безопасности в части оценки поражающего действия современных ядерных боеприпасов.

Ключевые слова: гамма-нейтронное излучение проникающей радиации, неравномерность облучения, дееспособность.

В условиях чрезвычайных ситуаций военного характера, связанных с применением ядерного оружия, основой для принятия оперативных управленческих решений является расчетный метод прогнозирования санитарных и безвозвратных потерь среди личного состава [1–5]. Совершенно очевидно, что успешность прогноза во многом зависит от адекватности использованной модели. При использовании ядерных боеприпасов (ЯБ) прогнозирование дозовых нагрузок на различных расстояниях от точки регистрации радиационных характеристик возможно благодаря изотропии поля проникающей радиации, а также наличию

равновесного спектра излучения на расстояниях, представляющих практический интерес в аспекте биологического действия нейтронов [6–8].

В случае применения ЯБ малого и сверхмалого калибров имеет место процентное перераспределение вклада поражающих факторов в сторону преобладания проникающей радиации, причем в виде импульсного гамма-нейтронного излучения, и доминирующим клиническим следствием выступают радиационные поражения в «чистом виде», не осложненные механической или ожоговой травмой. Выход личного состава из строя по критерию нуждаемости в медицинской помощи в условиях открытого его размещения

и получения дозы облучения 20 Гр составляет через 5 мин — 10%, через 10 мин — 40% и через 40 мин — 100%, а по критерию неспособности продолжать выполнение боевой задачи для тех же параметров облучения и временных интервалов — соответственно 5, 20 и 80% [9].

Особенности такого воздействия проявляются в виде модифицированных форм кишечного синдрома и орофарингеального синдрома (ОФС), а также синдрома ранней переходящей недееспособности (РПН). Во всех трех случаях скорость развития и тяжесть в значительной степени определяются неравномерностью облучения, которая может быть отчасти связана с защитой участков тела за счет пребывания в инженерных сооружениях, но фактически всегда — с естественно образующимся перепадом поглощенных доз по глубине тела, т.е. «биологическим» экранированием критических органов и систем. Клиническая картина такого поражения может существенно отличаться от хорошо известных «классических» форм острой лучевой болезни (ОЛБ), возникающих после равномерного облучения, что в значительной мере осложняет прогнозирование тяжести возможных исходов и оценку дееспособности, причем последняя в этих условиях будет связана не только с периодами ОЛБ, но и с геометрией облучения (рис. 1).

Необходимо отметить, что главной парадигмой гражданской радиационной защиты является обеспечение выживания населения после ядерного удара, т.е. сведение к минимуму числа смертельных исходов и потребностей в медицинской помощи [11]. Решение о трудоспособности населения основывается на непосредственных медицинских данных о состоянии здоровья облученных групп лиц, а не на величине измеренных или полученных расчетным путем значений доз облучения.

В отличие от этого, в действиях оперативно-спасательных отрядов и армейских подразделений главенствует выполнение поставленных аварийно-спасательных и боевых задач. В этом контексте выживаемость отступает на второй план, а прерогативой становится сохранение дееспособности личного состава, оценка которой осуществляется посредством контроля индивидуальной или групповой дозовой нагрузки [12].

Применяемый в настоящее время в армии основной дозиметрический критерий — максимальная поверхностная поглощенная доза, с одной стороны, легко поддается измерению, но с другой стороны — не обеспечивает объективности оценки, необходимой при неравномерном облучении. В такой ситуации принятие верного решения о тяжести радиационного поражения будет зависеть от манифестации клинических синдромов. Проблема заключается в том, что их информативность так же варьирует в зависимости от геометрии распределения поглощенной дозы облучения.

Как показал анализ специализированной литературы, данные вопросы не подвергались критическому пересмотру с 1970-х годов; количественные оценки в доступных источниках представлены недостаточно, либо требуют уточнений применительно к ситуациям военного характера, ожидаемым в современных условиях. Радиобиологические исследования в этой области привели к выводу, что сильный градиент поглощенных доз, определяемый как геометрией облучения, так и наличием нейтронной компоненты смешанного гамма-нейтронного излучения, значимо снижает общую тяжесть поражения организма [13,14,15]. Однако не менее достоверные результаты Института биофизики МЗ РФ и Института военной медицины МО РФ [17,18] опровергают некоторые устоявшиеся положения о связи

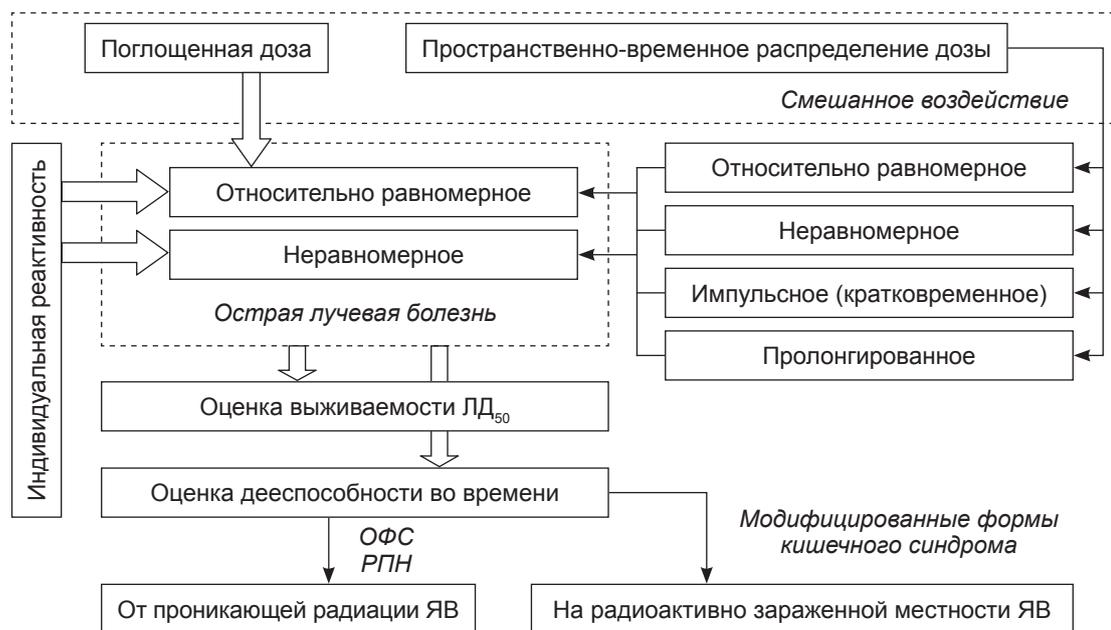


Рис. 1. Факторы, определяющие оценку тяжести радиационного поражения

тяжести радиационного поражения с параметрами импульсного гамма-нейтронного излучения.

В этих условиях получение надежного прогноза степени радиационного поражения возможно только при наличии адекватных моделей воздействия радиационного фактора на живой организм, учитывающих вышеуказанные аспекты.

Цель работы: определить возможность учета факторов, приводящих к неравномерности радиационного облучения, для коррекции прогноза тяжести радиационного поражения и оценки потерь дееспособности личного состава при воздействии импульсного гамма-нейтронного излучения ядерного взрыва.

Работа выполнялась в рамках плановой НИР ГУ «ИМП НАМН» «Модернізація радіологічних

засад військової системи радіаційної безпеки»; шифр НАМН 03.16.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В общем виде оценку радиационной дозы при неравномерном облучении организма можно представить в виде значения равноценной дозы, рассчитываемого в рамках функционала объемного распределения поглощенной энергии; для этого необходимы параметры, которые определены и проанализированы в работах [14, 15, 16]. На рис. 2 эта информация выделена в отдельные блоки с учетом способа и последовательности ее получения, а также дальнейшей роли в системе прогнозирования тяжести радиационного поражения.

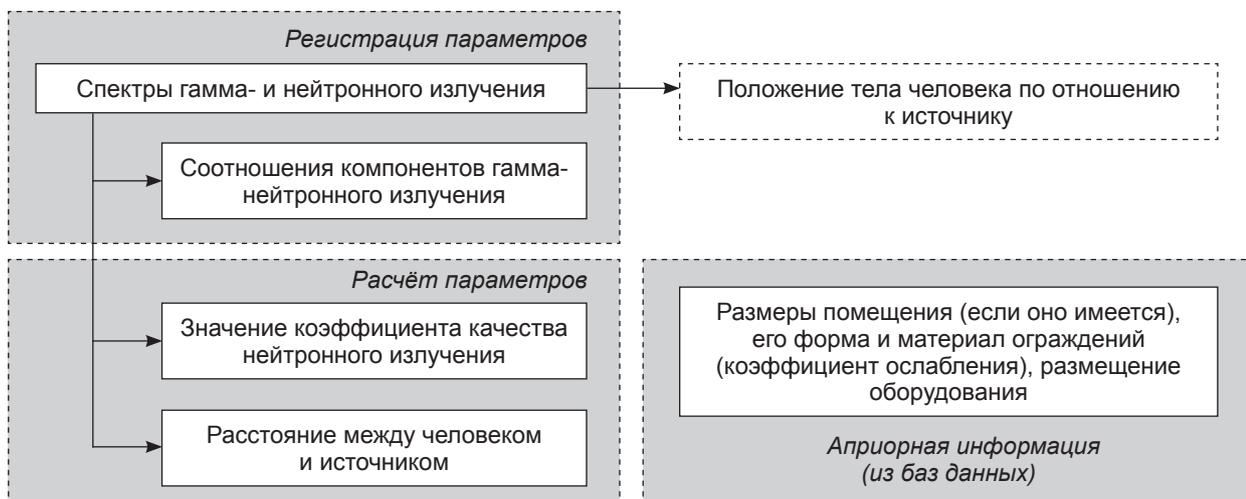


Рис. 2. Необходимые сведения для расчета функционала радиационной нагрузки в сценарии неравномерного облучения

Современный уровень развития спектрометрических методов получения и обработки радиационно-дозиметрической информации определяет возможность использования сведений, перечисленных на рис. 2. Эти вопросы исследованы в работах [1, 4]. Неопределенность же вносится сведениями (или предположениями) о положении тела по отношению к источнику гамма-нейтронного излучения.

Оценим важность того или иного фактора для разрабатываемой модели прогнозирования тяжести радиационного поражения. По кривым выживаемости человека при равномерном и неравномерном распределении поглощенной дозы, построенным в рамках исследований дозовой нагрузки в полях гамма-нейтронного излучения [15,16], можно определить коэффициенты, модифицирующие равномерное облучение по критерию радиационной дозы, вызывающей гибель 50% особей ($ЛД_{50}$), для различных условий облучения (табл. 1).

Анализ значений коэффициентов модификации, представленных в табл. 1, подтверждает базовое положение радиационной медицины — если острое облучение человека неравномерно, то тяжесть последствий меньше, чем при равномерном облучении, и зависит от того, насколько затронуты облучением

различные критические органы. Наибольшим эффектом снижения тяжести поражения, выраженном по критерию $ЛД_{50}$, обладают соотношение γ/n компонент (коэффициент модификации 0,11–0,27) и значения энергии гамма-нейтронного излучения (коэффициент модификации 0,10–0,13).

В работе [16] высказывалось мнение, что соотношение гамма- и нейтронного компонентов более существенно сказывается на неравномерности облучения человека, чем различие спектральных характеристик источников излучения. Данный тезис сопровождается парадоксальным с точки зрения радиобиологии выводом о более высокой относительной биологической эффективности (ОБЭ) гамма-излучения по сравнению со смешанным и, тем более, чистым нейтронным (в табл. 1 $ЛД_{50}$ составляет 36 Гр для $\gamma/n = 0$ против 4 Гр чистого гамма-излучения). На наш взгляд, такой результат является артефактом, который не вполне соответствует реальной картине. Во-первых, в работе [16] данные при различных соотношениях γ/n компонент были получены без учета рассеянного и вторичного (захватного) излучения в воздухе и грунте из-за лабораторных ограничений условий облучения. Во-вторых, неравномерность облучения за счет различий в энергии гамма- и нейтронного излучений получена

при спектральных характеристиках, не совпадающих с таковыми для нейтронного боеприпаса ($E_n = 14$ МэВ).

В любом случае, присутствие значимой нейтронной компоненты в смешанном излучении *a priori* создает значительную неравномерность облучения, при котором в ранней клинической симптоматике, выходящей человека из строя, начинают доминировать лучевые поражения кожи, тогда как другие критические органы вовлекаются в патологический процесс в меньшей степени. При равных поглощенных дозах, с возрастанием вклада гамма-излучения облучение тела человека становится более равномерным, а значит, ведет к меньшей выживаемости ввиду большего поражения костного мозга и кишечника. Можно аргументированно предположить, что в аспекте ранней потери дееспособности более опасным является доминирование нейтронной компоненты, в силу развития поражений слизистой полости рта, носоглотки и гортани (орофарингеальный синдром), а также большей вероятности развития синдрома взаимного отягощения разных органов.

Считается [16], что для быстрых нейтронов при дозе порядка 1 Гр коэффициент ОБЭ составляет несколько меньше 3,0 для клеток костного мозга и свыше

3,0 для кишечника. Поэтому для корректного прогнозирования как выживаемости, так и дееспособности определение спектральных характеристик нейтронной компоненты E_n и учет ее ОБЭ является, с нашей точки зрения, обязательным и приоритетным этапом.

Кроме того, данные табл. 1 показывают, что одним из путей повышения выживаемости личного состава может быть сознательное создание неравномерного распределения дозы по телу, за счет чего остаточное поражающее действие излучения будет уменьшено. Технически это осуществимо с использованием средств локальной защиты. Известно, что даже небольшая доля ККМ, оставшаяся неповрежденной, создает лучшую возможность бороться за сохранение жизни человека (табл. 1), следовательно, одной из стратегий индивидуальной защиты личного состава может быть использование экранов, обеспечивающих высокую кратность ослабления дозы ($K_{осл}$) в проекции на небольшие участки анатомической локализации ККМ.

В работе [17] представлено сравнение поражающей эффективности гамма- и гамма-нейтронного излучения в терминах радиационной дозы и временных характеристик развития лучевых синдромов (табл. 2).

Таблица 1

Значения коэффициентов модификации лучевого поражения для разных условий облучения, по данным работ [15, 16]

Условия облучения	Эквивалентная доза, определяющая 50% выживание ЛД ₅₀ , Гр	Коэффициент модификации	
В зависимости от соотношения γ/n компонент			
Чистое γ , равномерное	4	1	
$\gamma/n = 8,4$	14,5	0,27	
$\gamma/n = 1$	22,5	0,17	
$\gamma/n = 0$ (преобладание нейтронного излучения)	36	0,11	
Облучение груди от источников различной энергии			
Чистое γ , равномерное	3	1	
$E_\gamma = 0,4$ МэВ, $E_n = 5$ МэВ	23	0,13	
$E_\gamma = 0,2$ МэВ, $E_n = 4$ МэВ	25	0,12	
$E_\gamma = 0,5$ МэВ, $E_n = 0,1$ МэВ	29	0,10	
В зависимости от ориентации по отношению к источнику мгновенного деления в воздухе			
равномерное	4	1	
спина	8,5	0,47	
лежа	10,2	0,39	
грудь	10,5	0,38	
правым боком	12	0,33	
В зависимости от экранирования различных долей % ККМ при различной степени ослабления дозы $K_{осл}$			
равномерное		2,7	1
$K_{осл} = 2$	доля ККМ = 5%	4	0,67
	доля ККМ = 15%	4,8	0,56
	доля ККМ = 30%	5	0,54
$K_{осл} = 3$	доля ККМ = 5%	5,8	0,46
	доля ККМ = 15%	6,2	0,43
	доля ККМ = 30%	7,2	0,37
$K_{осл} = 5$	доля ККМ = 5%	8,8	0,30
	доля ККМ = 15%	10,5	0,25
	доля ККМ = 30%	11,2	0,24

Примечания: ККМ — красный костный мозг

Значения поражающей дозы и временные характеристики развития лучевого поражения человека***

Условия облучения и показатели	Поражающие дозы	Временные характеристики	Показатели
Кроветворная форма ОЛБ			
ЛД _{50/30-60} , поглощенная доза гамма-излучения	4,3–4,5 Гр	Средняя продолжительность жизни при ЛД_{50/30-60} - продолжительность первичной реакции - начало периода разгара - начало восстановления (у выживших)	40 сут 3 сут 25 сут 60 сут
ЛД _{50/30-60} , поглощенная доза импульсного гамма-нейтронного излучения	2,55 Гр		
Кишечная форма ОЛБ			
ЛД _{50/5-8} , поглощенная доза гамма-излучения	10 Гр	Средняя продолжительность жизни при ЛД_{50/5-8} - время появления рвоты - время появления диареи Средняя продолжительность жизни при ЛД_{100/5-8} - время появления рвоты - время появления диареи - продолжительность раннего переходящего снижения дееспособности - продолжительность удовлетворительной дееспособности	12*сут < 1 часа < 10 часов 6*сут < 1 мин 1 час 2 часа 120* часов
ЛД _{50/5-8} , поглощенная доза импульсного гамма-нейтронного излучения	8 Гр		
ЕД ₅₀ ** , тканевая доза по средней линии, приводящая к РПН у 50% выборки	30 Гр		
Церебральная форма ОЛБ			
ЛД _{50/2} , поглощенная доза гамма- или гамма-нейтронного излучения, вызывающая необратимое снижение дееспособности	80 Гр	Средняя продолжительность жизни при ЛД_{100/2} - время наступления полной недееспособности	46* часов 20–30 часов

Примечание: * — в условиях интенсивной терапии; РПН — синдром ранней переходящей недееспособности; ** — спектр излучения не указан; *** — цитирование [17] с изменениями.

Анализ данных табл. 2 позволил выявить несколько важных аспектов для учета в прогнозе тяжести радиационного поражения.

Во-первых, для кроветворной формы ОЛБ значения ЛД_{50/30-60} (2,5 Гр) при действии импульсного гамма-нейтронного излучения, характерного для взрыва ЯБ, оказывается существенно меньшим, чем при чистом гамма-облучении (4,3–4,5 Гр), возможным в ситуации при пребывании на радиоактивно зараженной местности. При этом не приводятся данные о геометрии облучения, а также энергетический спектр нейтронной компоненты. Можно предположить, что указанная разница связана не только с высокой ОБЭ нейтронов, но и с импульсным характером облучения, что рассматривалось нами в работе [19], а также с вторичным (захватным) гамма-излучением в теле человека. В любом случае нейтронная компонента не снижает, а усугубляет тяжесть ОЛБ I. Однако при увеличении поглощенной дозы до уровня, вызывающего кишечную форму ОЛБ, разница в ЛД₅₀ уменьшается, а для церебральной формы ОЛБ исчезает вообще, и значит, нивелируется прогностическая значимость информации о спектре воздействующего излучения.

Во-вторых, при импульсном действии гамма-нейтронного излучения первичная реакция, определяющая степень потери дееспособности, проявляется значительно раньше, чем при чистом гамма-излучении, и в силу особенностей геометрии облучения включает в себя орофарингеальный синдром и отек конечностей, что не было принято во внимание в работах [17, 18] и не учтено в действующих рекомендациях по оценке бое- и трудоспособности лиц, подвергшихся острому радиационному воздействию [10]. В качестве хорошо

документированного примера можно привести картину развития симптомов поражения у пострадавших в инциденте с возникновением критической ядерной реакции на Токай-Мура [20, 21]. Среди троих фигурантов этого инцидента, вживую увидевших пространство Черенкова, лицо с наименьшей дозой (2–3 Гр) не имело значимых ранних симптомов, зато двое других немедленно испытали боль, тошноту, затрудненность дыхания. У пострадавшего с дозой облучения 8–10 Гр рвота началась через 1 час после экспозиции, и все это время он испытывал тошноту и боль в конечности из-за сильного отека, а также сильное покраснение кожи лица, шеи и груди У фигуранта с наивысшей дозой — 18–24 Гр — через несколько минут после облучения открылась рвота и произошла потеря сознания на последующие 70 минут.

В-третьих, известно, что в основе церебральной формы ОЛБ, развивающейся у человека после облучения головы или всего тела в дозах 50 Гр и выше, лежат дисфункция и гибель нервных клеток, обусловленные преимущественно их прямым радиационным поражением. В табл. 2 приведена лишь тканевая доза по средней линии, приводящая к синдрому ранней переходящей недееспособности (РПН) у 50% выборки ЕД₅₀, определяемая пороговым значением в 30 Гр, однако отсутствуют данные об условиях облучения. Как известно, развитие синдрома РПН наиболее вероятно при импульсном гамма-нейтронном облучении с мощностью дозы свыше 10–15 Гр/мин [22]. В связи с этим, прогностические модели должны включать специальную поправку на длительной экспозиции, так как сверхбыстрое накопление дозы гамма-нейтронного излучения предопределяет крайнюю

степень первичной реакции — коллаптическое состояние организма (здесь снова уместно вспомнить пример Токаи-Мура [20]).

В контексте вопроса о геометрии воздействия импульсного гамма-нейтронного излучения ЯБ на личный состав важно отметить возникновение в этих условиях неравномерного краниокаудального облучения с большим перепадом поглощенных доз вдоль продольной оси тела и максимальной дозовой нагрузки на область головы. При этом характерная клиническая картина у облученных лиц, по данным работ Н. Г. Даренской, включает орофарингеальный синдром, который развивается при облучении в дозах > 2Гр и характеризуется фазностью течения [23]. Первичная реакция обнаруживается с первых суток и проявляется гиперемией и отеком слизистых оболочек; эти симптомы полностью или частично стихают через 4–5 суток. При оценке потерь дееспособности личного состава от ОФС важно учитывать, что степень поражения определяется локальной дозой облучения, приходящейся на слизистые оболочки верхних дыхательных путей и полости рта, однако она

не зависит от среднетканевой дозы и общей тяжести ОЛБ [23].

Обобщение данных публикаций [10, 13, 18, 24] по оценке дееспособности и выживаемости (без лечения) лиц, подвергшихся острому, тотальному, гамма-нейтронному облучению без детализации условий и геометрии облучения, а также без учета возможного влияния нерадиационных факторов, приведено в табл. 3. Характеристика дееспособности дается как типичная для большей части лиц, облученных в данном диапазоне доз. Из табл. 3 видно, что каждая степень тяжести радиационного поражения в заданном диапазоне поглощенных доз характеризуется процентом гибели k и сроками наступления летального исхода. Предполагается, что диапазон данных сроков определяется условиями облучения, обсуждаемыми выше, в частности — информацией о соотношении гамма- и нейтронной компонент.

Для описания модели, отражающей процесс потери дееспособности после воздействия импульсного гамма-нейтронного излучения ЯБ, введем следующие обозначения:

Таблица 3

Оценки дееспособности и выживаемости лиц, подвергшихся острому гамма-нейтронному облучению

Доза, D, Гр	Степень ОЛБ	T_0	В период первичной реакции			В период разгара			Смертельные исходы	
			T_n	физ	умс	T_p	физ	умс	k%	$T_{к,ч}$
До 2	I	Все время	Сохранена			Сохранена			—	—
2–4	II	1–2 ч	от 2 ч до 1 сут	Огран	Сохран	от 20–30 до 40 сут	Огран	Сохран	20	30–40
4–6	III	30–60 мин	от 1 ч до 2 сут	Огран	Сохран	от 8–20 до 60 сут	Отсут	Огран	50–80	30–40
6–10	IV переход	15–30 мин	от 40 мин до 2 сут	Сущ огр	Огран	от 6–8 до 20 сут	Отсут	Сущ огр	90–100	11–20
10–20	IV кишечная	5–15 мин	от 30 мин до 2–3 сут	Отсут	Огран	от 6–8 сут	Отсутствует		100	6–8
20–80	IV токсемич	0	от 30 мин до 3–5 сут	Отсут	Сущ огр	от 3–5 сут	Отсутствует		100	3–5
>80	IV церебрал	0	от 5 мин до 1–2 сут	Отсутствует		Часы, мин	Отсутствует		100	1–2

T_0 — срок сохранения дееспособности от момента облучения до наступления первичной реакции.

При воздействии в диапазоне 20–80 Гр и более, в течение $T_0=1-2$ мин возможно выполнение только стереотипных, твердо закрепленных навыков профессиональной деятельности;

T_n и T_p — соответственно, сроки наступления первичной реакции и разгара болезни;

$T_{к,ч}$ — срок наступления смертельного исхода при отсутствии лечения.

Необходимо отметить, что в современной парадигме военной радиационной защиты рассматривается как «мгновенный выход из строя» личного состава за счет синдрома РПН, за которым сразу же наступает их смерть, так и «немедленный выход из строя», под которым понимается процесс, длящийся не более 10–15 мин после взрыва ЯБ, с последующей гибелью. Оба термина характеризуют утрату дееспособности, т.е. невозможность выполнения личным составом текущей боевой задачи.

Возможные состояния дееспособности и выживаемости личного состава при воздействии импульсного гамма-нейтронного излучения от взрыва ЯБ были

смоделированы путем построения граф состояний (рис. 3). Математическая модель основана на марковских процессах с дискретными состояниями и непрерывным временем. Интенсивность перехода λ_i определяется как лимит вероятности перехода из одного состояния в другое за время Δt . С целью учета промежуточных состояний потери дееспособности в рамках этапов протекания ОЛБ в модели будем различать интенсивности $\lambda_{ин}$, $\lambda_{р}$, $\lambda_{г}$, $\lambda_{в}$ — соответственно, первичной реакции, разгара болезни, гибели и восстановления. Для интенсивностей, характеризующих переход от дееспособного состояния к недееспособному разной степени при первичной реакции облучения, получим:

$$\lambda_{ip} = \frac{p[\Phi(D_{кон}) - \Phi(D_{нач})]}{T_{ин}} \cdot K_c \cdot K_{\gamma/n}, \quad (1)$$

где $\Phi(D_{кон})$, $\Phi(D_{нач})$ — функция Лапласа (нормального закона распределения) для диапазона поглощенных доз гамма-нейтронного излучения (табл. 3); K_c — коэффициент, учитывающий спектральный состав нейтронного излучения; $K_{\gamma/n}$ — коэффициент соотношения дозовых компонент гамма- и нейтронного излучений на заданном расстоянии от центра взрыва.

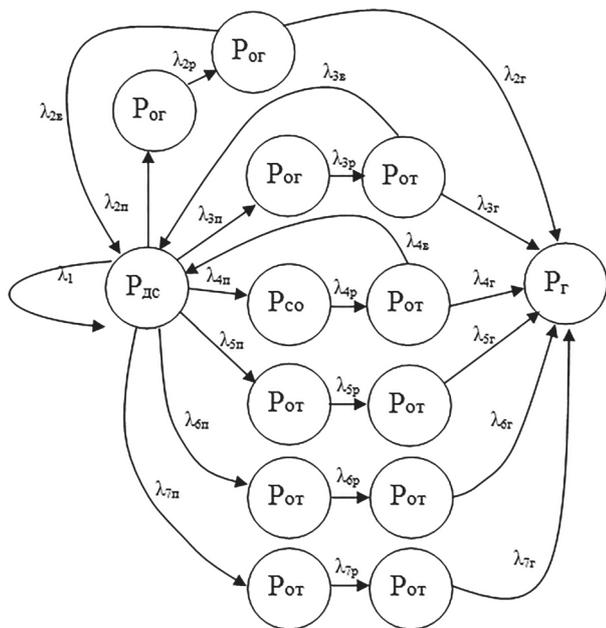


Рис. 3. Графы состояний тяжести радиационного поражения при воздействии гамма-нейтронного излучения ($P_{дс}$ — вероятность сохранения дееспособности; $P_{ог}$ — вероятность ограничения дееспособности; $P_{со}$ — вероятность существенного ограничения дееспособности; $P_{от}$ — вероятность отсутствия дееспособности; $P_{г}$ — вероятность гибели)

Для интенсивностей, характеризующих переход от недееспособного состояния за счет первичной реакции облучения к состоянию недееспособности за счет разгара ОЛБ:

$$\lambda_{ip} = \frac{1}{T_{ip}} \quad (2)$$

Для интенсивностей, характеризующих переход от недееспособного состояния за счет разгара ОЛБ к состоянию гибели облученных:

$$\lambda_{ir} = \frac{k}{T_{ик}}, \quad (3)$$

где k — доля облученных со смертельным исходом за время $T_{ик}$.

Для интенсивностей, характеризующих переход от недееспособного состояния за счет разгара ОЛБ к состоянию возвращения к дееспособному состоянию (выздоровление) облученных, получаем:

$$\lambda_{iv} = \frac{1-k}{T_{ик}} \quad (4)$$

Результаты моделирования воздействия импульсного гамма-нейтронного излучения от взрыва ЯБ мощностью 1 кт со спектром нейтронного излучения $E_n = 2,35-1,1$ МэВ на личный состав приведены на рис. 4а, со спектром $E_n = 14-12,2$ МэВ на рис. 4б.

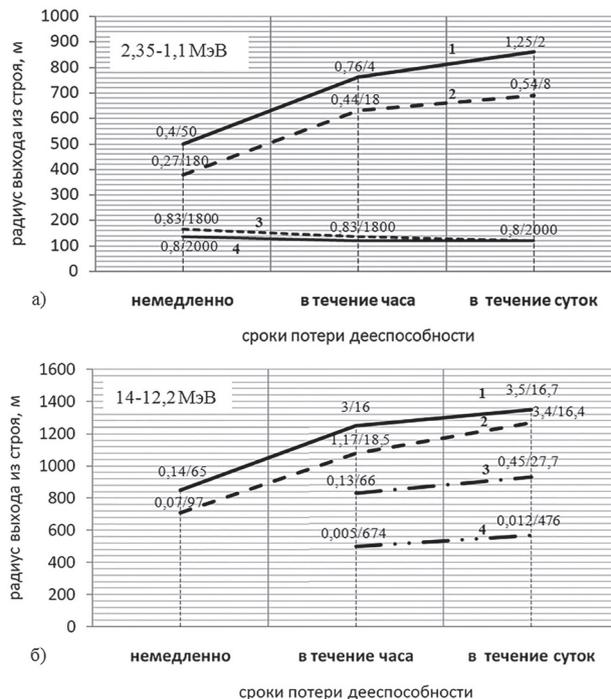


Рис. 4. Зависимость сроков проявления тяжести лучевого поражения от радиуса выхода из строя личного состава: а) для боеприпаса термоядерного типа; б) для нейтронного боеприпаса: 1 — для открыто расположенных на местности, в автомобилях, в военной технике; 2 — в открытых фортификационных сооружениях; 3 — в домах каменных одноэтажных ($K_{осл} = 10$); 4 — в подвалах двухэтажных домов ($K_{осл} = 100$)

Результаты моделирования показывают, что сроки выхода личного состава из строя зависят в значительной степени от вклада нейтронной компоненты. При ее доминировании $K_{\gamma/n} = 0,14$ с энергией 14,0–12,2 МэВ, а радиус немедленного выхода из строя открыто расположенного личного состава оказывается на 370 м больше, чем при действии нейтронов 2,35–1,1 МэВ. В соответствии с действующими методиками для оценки поражающего действия взрывов нейтронных боеприпасов в радиусы выхода из строя личного состава, действующие при взрывах «обычных» ЯБ, необходимо уменьшить в 1,1–1,3 раза. Адекватность предложенной нами модели подтверждается полученными радиусами выхода из строя личного состава для ЯБ различного типа.

Кроме того, расчеты показывают, что для термоядерного боеприпаса на расстоянии 500 м и для нейтронного боеприпаса на расстоянии 850 м немедленный выход из строя сопровождается полной потерей дееспособности в течение 5–15 мин, переходящей в 100% гибель в течение ближайших суток.

С увеличением вклада гамма-излучения увеличиваются сроки потери дееспособности личного состава. Наличие неравномерности за счет экранирования (с преимущественным ослаблением гамма-компоненты) выражается в снижении частоты погибших в течение суток.

В числителе дроби приведено соотношение γ/n компонент на данном расстоянии от центра взрыва, в знаменателе — доза нейтронного излучения в Гр на том же расстоянии. Используются типичные значения γ/n для современных ЯБ.

Для количественной оценки полноты и точности отражения факторов, представленных на рис. 1, а также основных особенностей и закономерностей процесса прогнозирования тяжести радиационного поражения будем использовать показатель достоверности, вычисляемый по формуле:

$$K_{\text{полн}} = 1 - \sum_{j=1}^4 S_j \sum_{i \in \gamma_i} k_i, \quad (5)$$

где $0 < k_i < 1$ — вес (важность) i -го фактора; γ_i — множество факторов, которые учитываются j -м способом обобщения; S_j — погрешность, обусловленная неточным (обобщением) учетом факторов. Значение относительной погрешности S_j ($j = 1, 2, 3, 4$) зависит от способа учета факторов и обычно находится в пределах:

$$S_j = \begin{cases} 0 & \text{— при непосредственном (Н) учете факторов (j = 1);} \\ 0,4 & \text{— при простом (П) обобщении (j = 2);} \\ 0,6 & \text{— при функциональном (Ф) обобщении (j = 3);} \\ 1,0 & \text{— при косвенном (К) обобщении (j = 4).} \end{cases}$$

Непосредственным способом учета является измерение спектральных характеристик гамма-нейтронной компоненты, т.е. определение энергии воздействующего излучения прямым спектрометрическим методом. Простое обобщение связано с присвоением некоторого значения из заранее прописанных величин, взятых из баз данных. Например, для

зарегистрированных значений энергии нейтронного излучения таким параметром будет значение коэффициента качества. Функциональное обобщение заключается в аналитическом вычислении необходимого параметра с учетом других зависимостей и всех возможных поправочных коэффициентов. При косвенном учете (обобщении) оценка параметра происходит в условиях неопределенности информации об объекте, в разряд которой попадает положение тела человека по отношению к источнику (здесь для получения граничной оценки наиболее пессимистического прогноза можно принять наилучшую ситуацию).

Сравним характеристики для оценки выживаемости и дееспособности личного состава. Для этого воспользуемся шкалой значимых факторов, учитываемых при моделировании тяжести радиационного поражения, которые представлены в табл. 4.

В итоге проведенный анализ позволил ранжировать основные факторы, влияющие на распределение дозовой нагрузки по телу человека по степени важности их учета в разрабатываемых моделях. Для модели, характеризующей дееспособность, порядок рангов значимости оказался таким:

1. Спектры гамма-нейтронного излучения;
2. Соотношение компонент гамма-нейтронного излучения (γ/n);
3. Скорость накопления дозы (мощность дозы);
4. Положение тела человека по отношению к источнику;
5. Выбранное значение коэффициента качества нейтронного излучения; расстояние между человеком и источником; размеры помещения, его форма и материал ограждений, размещение оборудования.

Необходимо заметить, что неравномерность облучения за счет нейтронной компоненты определяется фактором соотношения компонент (γ/n), который в свою очередь на открытой местности зависит напрямую от расстояния между человеком и центром взрыва, что исследовано в работах [19, 25], а внутри

Таблица 4

Ранжирование основных факторов, влияющих на распределение дозовой нагрузки по телу человека, и способ их учета при прогнозировании тяжести облучения

№	Наименование фактора	Способ учета	Вес в относительных единицах	
			выживаемость	дееспособность
1	Спектры гамма-нейтронного излучения	Н	0,20	0,40
2	Соотношение компонент гамма-нейтронного излучения (γ/n)	Ф	0,20	0,20
3	Выбранное значение коэффициента качества нейтронного излучения	П	0,05	0,05
4	Расстояние между человеком и источником	Ф	0,25	0,05
5	Скорость накопления дозы (мощность дозы)	Н	0,05	0,15
6	Положение тела человека по отношению к источнику	К	0,05	0,10
7	Размеры помещения, его форма и материал ограждений, размещение оборудования	П	0,20	0,05

Примечания:

Н — непосредственный учет фактора (измерение);

Ф — учет фактора путем функционального обобщения (вычисление);

П — простое обобщение;

К — косвенное обобщение.

сооружений — дополнительно фактором, определяющим защитные свойства объекта (его формой, материалом ограждений), что рассмотрено в работе [4]. Кроме того, фактор учета спектра гамма-нейтронного излучения, определяющий тип ЯБ, связан с фактором правильного выбора коэффициента качества нейтронного излучения. Поэтому для оценки как выживаемости, так и дееспособности определяющими факторами

$$K_{\text{полн}} = 1 - (k_1(0,4) \cdot S_1(0) + k_2(0,2) \cdot S_3(0,6) + k_3(0,05) \cdot S_2(0,4) + k_4(0,05) \cdot S_3(0,6) + k_5(0,15) \cdot S_1(0) + k_6(0,1) \cdot S_4(1) + k_7(0,05) \cdot S_2(0,4)) = 1 - 0,29 = 0,71$$

Аналогичным образом определяется полнота и точность учета исследованных в данной работе факторов, оценивающих выживаемость. Относительно низкое ее значение $K_{\text{полн}} = 0,58$ можно объяснить отсутствием в модели учета процесса оказания медицинской помощи, значительно влияющей на исход облучения.

ВЫВОДЫ

1. На основе результатов математического моделирования радиационно-индуцированных потерь дееспособности среди личного состава для различных условий облучения произведено ранжирование факторов, необходимых для включения в модель прогноза тяжести радиационного поражения при действии современных ядерных боеприпасов.

2. Представляется крайне необходимым учет соотношения γ/n компонент и спектральных характеристик нейтронного излучения как основных факторов при оценке тяжести радиационного поражения

можно считать спектры гамма-нейтронного излучения и соотношение компонентов гамма-нейтронного излучения (γ/n).

Используя выражение (5) и полученные весовые значения факторов (табл. 4), оценим полноту и точность учета различных факторов, представленных на рис. 1, определяющих дееспособность в предложенной модели:

в условиях импульсного действия гамма-нейтронного излучения от ядерного взрыва.

3. Ведущим механизмом немедленной потери дееспособности личного состава при взрыве ядерного боеприпаса является краниальное облучение, в больших дозах вызывающее синдромы ОФС и РПН. В условиях применения нейтронных боеприпасов основную оценку следует производить в терминах развития крайне тяжелой формы острой лучевой болезни и гибели пораженных лиц в течение нескольких суток. При этом остается сравнительно малая доля лиц с поражениями средней и легкой степени тяжести, потеря дееспособности которых отсрочена от момента воздействия проникающей радиации на несколько часов.

4. Вышеприведенный подход представляется достаточно целесообразным для включения в новую концепцию военной радиационной безопасности в части оценки поражающего действия современных ядерных боеприпасов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чернявский И. Ю.* Оценка степени радиационного поражения путем прогнозирования дозовых нагрузок за данными датчика боеприпасности / И. Ю. Чернявский, В. В. Марущенко, А. В. Матюкин // Системи озброєння і військова техніка : наук.-техн. журн. — Харків : Харк. ун-т повітряних сил ім. Івана Кожедуба, 2016. — № 1. — С. 125–133.
2. *Чернявский И. Ю.* Анализ условий для создания системы выявления и оценки уровня радиационной безопасности жизнедеятельности населения при чрезвычайных ситуациях военного характера : сб. науч. пр. / И. Ю. Чернявский, В. В. Тютюник, В. Д. Калугин // Проблеми надзвичайних ситуацій. — Харків: НУЦЗУ, 2016. — Вип. 23. — С. 168–185.
3. *Чернявский И. Ю.* Войсковая дозиметрия как система выявления и оценки радиационной обстановки / И. Ю. Чернявский // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України : наук.-техн. журн. — Харків : Харк. ун-т повітряних сил ім. Івана Кожедуба, 2015. — № 4. — С. 126–133.
4. *Анализ особенностей влияния спектрально-угловых характеристик радиационного фактора на защитные свойства материалов* / И. Ю. Чернявский, А. Н. Григорьев, З. В. Билык и др. // Системи озброєння і військова техніка : наук. журн. — Харків : Харк. ун-т повітряних сил ім. Івана Кожедуба, 2016. — № 3. — С. 38–43.
5. *Чернявский И. Ю.* Особенности учета пространственно-временного распределения поглощенной дозы при оценке радиационных потерь в современных условиях / И. Ю. Чернявский // Укр. радіол. журн. — 2015. — Т. XXIII, вип. 2. — С. 193–196.
6. *Действие ядерного взрыва* : сб. пер. / под ред. С. С. Григоряна и Г. С. Шапиро. — М. : Мир, 1971.
7. *Распространение ионизирующих излучений в воздухе* / В. А. Климанов, С. А. Коновалов, В. А. Кочанов и др. ; под ред. В. И. Кухтевича и В. П. Машковича. — М. : Атомиздат, 1979. — 216 с.
8. *Тарасенко Ю. Н.* Ионизационные методы дозиметрии высокоинтенсивного ионизирующего излучения / Ю. Н. Тарасенко. — М. : Техносфера, 2013. — 264 с.
9. *Марасанов Р. А.* Основные итоги научно-исследовательских работ по совершенствованию медицинской противорадиационной защиты / Р. А. Марасанов, В. Г. Владимиров, С. И. Черняк // Воен.-мед. журн. — М. : Воениздат, 1988. — Вып. 45. — С. 139–145.
10. *Рекомендации по критериям оценки боеприпасности и трудоспособности лиц, подвергшихся острому радиационному воздействию.* — М. : Воениздат, 1981. — 16 с.
11. *Воздействие ионизирующей радиации в чрезвычайных обстоятельствах* : рек. Нац. комитета США по радиац. защите / пер. с англ. под ред. А. А. Моисеева. — М. : Гос. изд-во л-ры по атом. науке и технике Гос. комитета по использованию атом. энергии СССР, 1963. — 90 с.

12. *Чернявський І. Ю.* Військова дозиметрія: підручник / І. Ю. Чернявський, В. В. Марущенко, І. М. Мартинюк. — Харків : ФВП НТУ «ХП», 2011. — 531 с.
13. *Острые эффекты облучения человека: препринт ЦНИИатоминформ-ОН-3* / А. Е. Барабанова, А. К. Баранов, И. Б. Гуськова и др. М. : Гос. комитет по использованию атом. энергии СССР, НКРЗ при Минздраве СССР, 1986. — 80 с.
14. *Кеирим-Маркус И. Б.* Эквидозиметрия / И. Б. Кеирим-Маркус. — М. : Атомиздат, 1980. — 191 с.
15. *Гозенбук В. Л.* Дозиметрические критерии тяжести острого облучения человека / В. Л. Гозенбук, И. Б. Кеирим-Маркус. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 184 с.
16. *Гозенбук В. Л.* Дозовая нагрузка на человека в полях гамма-нейтронного излучения / В. Л. Гозенбук, И. Б. Кеирим-Маркус, А. К. Савинский, Е. Н. Чернов. — М. : Атомиздат, 1978. — 168 с.
17. *Иванов И. В.* Исходная реактивность организма и радиационные воздействия: лечебно-профилактические аспекты проблемы : науч.-практ. рук-во / И. В. Иванов. — М.: Изд-во РМАПО, 2005. — 395 с.
18. *Иванов И. В.* Критериальные показатели воздействия ионизирующих излучений в сублетальных и летальных дозах : метод. пособие / И. В. Иванов. — М. : Изд-во РМАПО, 2005. — 56 с.
19. *Биологические аспекты импульсного воздействия радиационного фактора военного характера* / И. Ю. Чернявский, В. В. Марущенко, В. Е. Гайдабука, С. А. Писарев, С. Н. Меньшов, В. Б. Матикин // Системи обробки інформації : зб. наук. пр. — Харків : Харк. ун-т повітряних сил ім. Івана Кожедуба, 2016. — Вип. 5. — С. 193–201.
20. *International Atomic Energy Agency : Report on the preliminary fact finding mission following the accident at the nuclear fuel processing facility in Tokaimura, Japan, 1999.* — IAEA, Vienna, 1999. — 35 p.
21. *Cytogenetical dose estimation for 3 severely exposed patients in the criticality accident in Tokaimura* / I. Hayata, R. Kanda, M. Minamihisamatsu et al. // J. Radiat. Res. — 2001. — Vol. 42, Suppl. — P. S149–S155.
22. *Военная токсикология, радиобиология и медицинская защита : учебник* / С. А. Куценко, Н. В. Бутомо, А. Н. Гребенюк и др. ; под ред. С. А. Куценко. — СПб. : Фолиант, 2004. — 528 с.
23. *Даренская Н. Г.* Радиобиологические закономерности развития орофарингеальной формы лучевого поражения / Н. Г. Даренская, Т. А., Насонова О. А. Добрынина // Мед. радиология и радиац. безопасность. — 2006. — Т. 51, № 6. — С 16–23.
24. *Клинические рекомендации по оказанию медицинской помощи пострадавшим от воздействия ионизирующего излучения в чрезвычайных ситуациях.* — М. : МЗ РФ, 2013. — 72 с.
25. *Чернявский И. Ю.* Военно-радиологические аспекты пространственного распределения поглощенной дозы импульсного гамма-нейтронного излучения / И. Ю. Чернявский, В. В. Марущенко // Укр. радіол. журн. — 2016. — Т. XXIV, вип. 2. — С. 34–39.

Статья поступила в редакцию 12.07.2017.

І. Ю. ЧЕРНЯВСЬКИЙ¹, В. А. ВІННІКОВ²

¹ *Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

² *ДУ «Інститут медичної радіології ім. С. П. Григор'єва НАМН України», Харків*

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ ВТРАТУ ДІЄЗДАТНОСТІ ЛЮДИНИ В УМОВАХ НЕРІВНОМІРНОГО ОПРОМІНЮВАННЯ ПІД ЧАС ВПЛИВУ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЯДЕРНОГО ВИБУХУ

Мета роботи. Визначити можливість врахування факторів, які приводять до нерівномірності радіаційного опромінювання, для корекції прогнозу важкості радіаційного ураження та оцінки втрат дієздатності особового складу під час впливу імпульсного гамма-нейтронного випромінювання ядерного вибуху.

Матеріали та методи. Інформаційний пошук за даними літератури, методи аналізу і синтезу інформації, математичне моделювання.

Результати. На підставі результатів математичного моделювання радіаційно-індукованих втрат дієздатності серед особового складу для різних умов опромінювання здійснене ранжування факторів, які необхідні для включення у модель прогнозу важкості радіаційного ураження під час дії сучасних ядерних боєприпасів. Вбачається вкрай необхідним врахування співвідношення γ/n компонент та спектральних характеристик нейтронного випромінювання як основних факторів під час оцінки важкості радіаційного ураження в умовах імпульсної дії гамма-нейтронного випромінювання від ядерного вибуху. Основним механізмом негайної втрати дієздатності особового складу при вибуху ядерного боєприпасу є краніальне опромінювання у значних дозах, які викликають орофарингеальний синдром і синдром ранньої перехідної недієздатності.

Висновки. В умовах застосування нейтронних боєприпасів основну оцінку слід здійснювати у термінах розвинення вкрай важкої форми гострої променевої хвороби та загибелі уражених осіб протягом кількох діб. При цьому залишається порівняно мала частка осіб, уражених середнім та легким ступенем важкості, втрата дієздатності яких відкладена від моменту впливу проникаючої радіації на кілька годин.

Викладений вище підхід вбачається достатньо доцільним для включення у нову концепцію військової радіаційної безпеки у частині оцінки вражаючої дії сучасних ядерних боєприпасів.

Ключові слова: гамма-нейтронне випромінювання проникаючої радіації, нерівномірність опромінювання, дієздатність.

I. YU. CHERNIAVSKYI¹, V. A. VINNIKOV²

¹ *National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*

² *SI «Grigoriev Institute for Medical Radiology of National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kharkiv*

ANALYSIS OF FACTORS DEFINING INCAPACITATION OF PEOPLE UNDER CONDITIONS OF UNEVEN IRRADIATION DURING NUCLEAR EXPLOSION GAMMA-NEUTRON EMISSION

Purpose. To estimate the possibility of consideration of factors leading to uneven irradiation in order to correct the prognosis of radiation injury severity and to assess incapacitation of the personnel during nuclear explosion gamma-neutron emission.

Materials and methods. Information search in accordance with literature data, information analysis and synthesis methods, mathematical modelling.

Outcomes. According to the mathematical modelling findings representing radiation-induced incapacitation observed in the personnel, ranging of factors, necessary for inclusion into the model of radiation injury severity prognosis during the action of modern nuclear ammunition, was carried out for different irradiation conditions. It is considered to be dramatically important to take into account the ratio of γ/n component and spectral features of neutron emission as basic factors for estimation of radiation injury severity under conditions of impulse action of gamma neutron emission resulting from nuclear explosion. The principal mechanism of urgent incapacitation of the personnel under conditions of nuclear ammunition explosion is cranial irradiation in high doses which leads to oropharyngeal and early transitional incapacitation syndromes.

Conclusions. Under conditions of employing neutron ammunition, a basic assessment has to be made in case of severe form of acute radiation disease and death of people who were exposed within several days. In this case the number of people who have medium and mild severity is comparatively small, so the incapacitation of these people is postponed from the moment of penetrating radiation impact for a few hours.

The approach which has been outlined above is considered to be rather applicable for inclusion into a new concept of military radiation security in terms of assessment of affecting action of modern nuclear ammunition.

Keywords: gamma-neutron emission of penetrating radiation, uneven irradiation, capacity.

Контактная информация:

Чернявский Игорь Юрьевич

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры радиационной, химической, биологической защиты факультета военной подготовки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»

e-mail: chern.igor.71@gmail.com