

Інформаційні технології для запобігання та ліквідації надзвичайних ситуацій

УДК 502.55:621.039.7

DOI: 10.30748/soi.2018.154.14

И.Ю. Чернявский

Военный институт танковых войск НТУ «ХПИ», Харьков

ОЦЕНКА ТЯЖЕСТИ РАДИАЦИОННОГО ПОРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ УЧЕТА СООТНОШЕНИЙ ГАММА-НЕЙТРОННЫХ КОМПОНЕНТ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ И ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В работе предполагается, что «стандартизированные» эффекты поражения организма, приводящие к ранней преходящей недееспособности человека, будут в зависимости от спектра нейтронного излучения и соотношения гамма-нейтронного излучения в суммарной дозе облучения наблюдаться на различных расстояниях от центра взрыва для различных типов и мощностей ядерных боеприпасов. Отсутствие данных о спектральных характеристиках нейтронной компоненты, определяющих тип ядерного боеприпаса, должно заметно сказываться на достоверности оценки степени тяжести радиационного поражения. Выявляются закономерности в методологии оценки поражающей дозы гамма-нейтронного излучения для боеприпасов различного типа. На основании существующих моделей и аналитических выражений, позволяющих рассчитать γ/n – соотношение компонент проникающей радиации для боеприпасов различного типа, получены распределения поражающей дозы с расстоянием от центра взрыва. Это позволяет более корректно оценивать районы с заданным биологическим эффектом в разрабатываемых системах радиационного мониторинга чрезвычайных ситуаций военного характера.

Ключевые слова: соотношение гамма-нейтронных компонент, проникающая радиация, поражающая доза, тип ядерного боеприпаса.

Введение

Постановка проблемы. Известно [1–4], что при мгновенном общем гамма-нейтронном облучении в дозах (34–60 Гр и более), вызывающих острую лучевую болезнь крайне тяжелой степени с переоблучением головы, шеи и груди, развивается острейшее поражение нервной системы, в литературе получившее название эффект ранней преходящей недееспособности человека (РПН). В работах Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова отмечается, что проявление данного церебрального лучевого синдрома зависит от мощности дозы облучения. При ее значении более 10–15 Гр/мин в течение нескольких минут после облучения могут развиваться коллаптоидное состояние, редчайшая слабость, атаксия, судороги, через 10–45 мин. основные проявления РПН проходят, сменяясь временным улучшением состояния [5]. Если облучение происходит с «небольшой» мощностью дозы, то РПН не развивается, однако после проявлений первичной реакции нарастают признаки отека мозга, атаксия, дезориентация, судороги (симптоматика обусловлена не только дисфункцией, но и гибелью нервных клеток). Смерть наступает в течение не более чем 48 ч. после облучения, ей предшествует кома. Специалисты [5]

отмечают, что наиболее вероятно ее развитие при импульсном (особенно нейтронном) облучении человека.

В то же время, рекомендованные критерии для оценки такого радиационного поражения в настоящее время являются весьма неопределенными из-за отсутствия данных о соотношении (балансе) гамма-нейтронного излучения в суммарном воздействии, и, как показывает проведенный анализ, могут базироваться пока только на данных экспериментальной радиобиологии, исследованиях, связанных с наиболее тяжелыми случаями облучения человека в результате самопроизвольных цепных реакций при ядерных инцидентах [6]. Неопределенность в критериях оценки радиационного поражения также существует и при воздействии мгновенного гамма-нейтронного излучения проникающей радиации ядерного взрыва для различных мощностей и типов ядерного боеприпаса. В связи с тем, что интенсивность излучений (мощность дозы) снижается обратно квадрату расстояния от центра взрыва для каждого типа и мощности ядерного боеприпаса по разному, как собственно и γ/n – соотношение на заданном расстоянии для каждого сценария, то логично было бы предположить изменение и времени проявления указанных выше эффектов.

Трудность состоит в том, что для человека нет экспериментальных данных по характеру проявления РПН для различных видов, типов и мощностей ядерного взрыва, а ориентировочные дозовые зависимости были ранее получены путем экстраполяции результатов исследований с подопытными животными. Закономерности развития ранних неврологических нарушений в свое время были изучены в ряде экспериментов с облучением нейтронами ($E_n = 0,37$ МэВ дозами 55 и 100 Гр) лабораторных животных (обезьян *Macaca fascicularis*) под руководством Н.Г. Даренской [4]. Данные закономерности связывают только с поглощенной дозой гамма-нейтронного излучения без учета имеющихся особенностей γ/n – соотношений и спектральных характеристик нейтронной компоненты.

В большинстве случаев при ядерных испытаниях также отсутствовали надежные сведения о дозовых нагрузках по отдельным компонентам излучений и спектральным характеристикам нейтронной составляющей. Кроме того, облучения были, как правило, неравномерными по телу человека (из-за особенностей γ/n соотношений на заданном расстоянии), что должно существенно влиять на последствия облучения. Поэтому приводящиеся в литературе сведения о зависимости доза-эффекта для таких сценариев радиационного поражения, на наш взгляд, нельзя считать достоверно установленными. Хотя за последнее десятилетие существенно расширилось знание биологических эффектов, вызываемых мгновенным гамма-нейтронным воздействием, целый ряд фундаментальных вопросов еще предстоит сформулировать и решить, чтобы уменьшить неопределенность в оценках степени тяжести радиационного поражения и в сроках наступления недееспособности человека.

Мозаичность клинической картины при облучении с преимущественным вкладом в дозу нейтронов объясняется, с одной стороны, неравномерностью радиационного воздействия, уменьшающей суммарный поражающий эффект нейтронов (в сравнении с равномерным гамма-облучением), а с другой стороны – на молекулярном и клеточном уровне нейтроны характеризуются высокой линейной передачей энергии, обладающей большими повреждающими свойствами без восстановления ткани. Так, ранний некроз при местном лучевом поражении кожи на 24–30 сутки наблюдается при поглощенной дозе гамма-излучения более 50 Гр, данный эффект для гамма-нейтронного излучения отмечают [5] при дозе, начиная с 30 Гр до 8 суток.

В работе [7] автор приводит сравнительную оценку летальных доз для различных критических систем. Отмечается, что, если для кроветворной формы лучевой болезни разница в $LD_{50/30-60}$ (и для кишечной формы $LD_{50/5-8}$) между воздействием гамма-излучения и импульсным гамма-нейтронным излуче-

нием составляет 2 Гр, то для церебральной формы $LD_{50/2}=80$ Гр разница между условиями облучения отсутствует. Учитывая современные модели оценки поражающей дозы, [8], применяемые при остром облучении гамма-нейтронным излучением, требуются, на наш взгляд, дополнительные исследования для различных соотношений дозовых компонент и спектральных характеристик нейтронного излучения.

В то же время в литературе появились работы [9–11], авторы которых исследуют как аддитивный эффект поражения гамма-нейтронным излучением, так и наблюдаемый синергизм (при 30% вкладе нейтронов). Подчеркивается необходимость отдельной оценки эффективности одновременного действия гамма-квантов и нейтронов при более высоких вкладах последних: 60–80%. Данное направление, на наш взгляд, актуально для оценки именно поражающего воздействия проникающей радиации ядерных взрывов с повышенным выходом нейтронной компоненты. В работе [12] в рамках изучения вопроса о чистом термоядерном взрыве анализируются радиусы смертельного поражения от нейтронного излучения термоядерного боеприпаса в зависимости от выхода нейтронов (рис. 1).

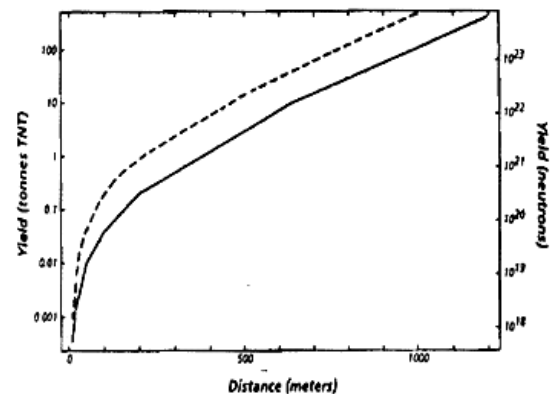


Рис. 1. Радиусы смертельного поражения от нейтронного излучения термоядерного боеприпаса в зависимости от выхода нейтронов (цит. по [12])

Сплошная линия (рис. 1) соответствует расстоянию, ниже которого человек получит смертельную дозу излучения (4,5 Гр или более) от нейтронов высокой энергии, образующихся при термоядерном взрыве на открытом воздухе. Штриховая кривая показывает аналогичное расстояние с учетом оцениваемой экранировки бетонными зданиями в городе. Слева на оси ординат приведены мощности взрыва в единицах тротилового эквивалента, справа – полный выход нейтронов.

Немногочисленные данные [13–15] о суммарной поглощенной дозе гамма-нейтронного излучения, полученные в результате ядерных испытаний, позволили только ориентировочно стандартизировать степень тяжести и скорость потери дееспособности человека. Для других случаев (других типов ядерных боеприпасов и других мощностей ядерного взрыва), в том

числе при взрыве нейтронного боеприпаса, проявления заболевания выражены более резко, характерны более ранние сроки выхода людей из строя.

В данной работе нами предполагается, что «стандартизированные» эффекты поражения организма (РПН) на открытой местности будут в зависимости от спектра нейтронного излучения и соотношения гамма-нейтронного излучения в суммарной дозе облучения наблюдаться на различных расстояниях от центра взрыва для различных типов и мощностей ядерных боеприпасов. Отсутствие данных о спектральных характеристиках нейтронной компоненты, определяющих тип ядерного боеприпаса, должно заметно сказываться на достоверности оценки степени тяжести радиационного поражения.

Цель данной работы: на основании существующих моделей по оценке радиационного поражения и аналитических выражений, позволяющих рассчитать γ/n – соотношение компонент проникающей радиации для боеприпасов различного типа, получить распределение поражающей (биологической) дозы с расстоянием от центра взрыва. Это позволит более корректно оценивать районы с заданным биологическим эффектом в разрабатываемых системах радиационного мониторинга чрезвычайных ситуаций военного характера.

Материалы и методы

Анализ безвозвратных и санитарных потерь в результате атомных бомбардировок японских городов показывает, что умерших в первый день по данным [14] в Хиросиме составило 45 тыс. (70,3%), в Нагасаки – 22 тыс. (56,4%), умерших после первого дня – 19 тыс. (29,7%) и 17 тыс. (43,6%) соответственно.

В радиусе 1 км от эпицентра взрыва, где частота смертельных исходов превысила 90%, число пострадавших с комбинированным радиационным поражением составило почти 70%, а на расстоянии 2 км – около 50%. Проведенная реконструкция дозовых компонент гамма-нейтронного излучения на заданном расстоянии от центра взрыва [13–15] позволила установить доминирование гамма-излучения проникающей радиации: в Хиросиме в радиусе 500 м от эпицентра взрыва доза мгновенного излучения составила 35 Гр от гамма-излучения и 6,04 Гр от нейтронов. На расстоянии 2 км от эпицентра – 0,07 Гр и 0 Гр соответственно. Подчеркивается, что на долю нейтронного излучения приходилось лишь около 10% излучений, а также тот факт, что нейтронный компонент в Хиросиме превышал таковой в Нагасаки (рис. 2).

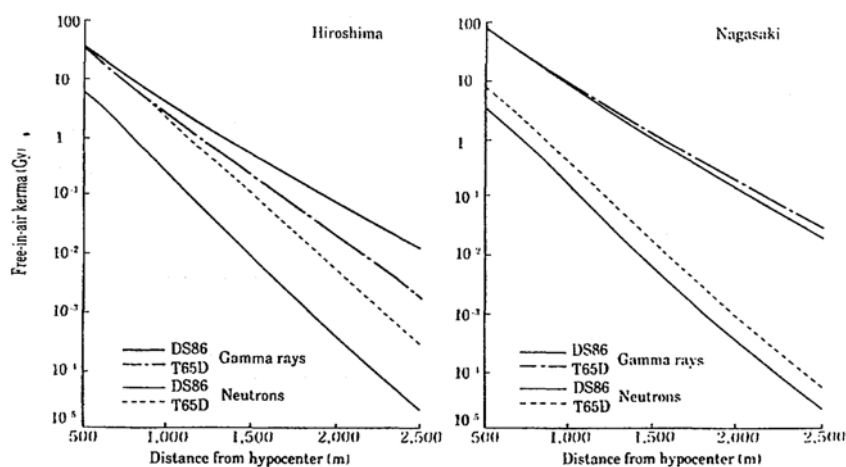


Рис. 2. Зависимости доз гамма-нейтронного излучения от расстояния до центра взрыва (цит. по [15])

Приведенная выше оценка, с нашей точки зрения, является недостаточно корректной, так как соотношение между дозами гамма-нейтронного излучения в суммарной дозе проникающей радиации зависит не только от особенностей ядерного заряда (урановый или плутониевый), но и от мощности боеприпаса, а также от расстояния до центра взрыва, которое, в свою очередь, зависит от высоты подрыва.

В связи с тем, что точных данных по отдельным видам поражения получить невозможно, как невозможно точно определить время наступления определенного эффекта (полный выход из строя; временный выход из строя и летальный исход), то, в принципе, при учете суммарной поглощенной дозы

гамма-нейтронного излучения можно говорить только о вероятности наступления определенного эффекта. В литературе для оценки воздействия на человека больших доз проникающей радиации ядерного взрыва в «чистом» виде выделяют несколько уровней поражающего действия, полученные в результате испытаний, проводившихся на макаках-резус при облучении их нейтронами [16]:

– 180 ± 10 Гр, радиус действия 400 м, полный выход из строя (люди сразу же становятся недееспособными);

– 80 ± 10 Гр, радиус действия 500 м, пораженные становятся недееспособными через 5 мин., смерть наступает в течение суток;

– 30 ± 5 Гр, радиус действия 640 м, временный выход из строя: (недееспособность через 5 мин., наступление летального исхода через 4–6 дней);

– $6,5 \pm 1,5$ Гр, радиус действия 750 м, летальный исход (пониженная работоспособность в течении 2 часов, после медицинской обработки некоторые остаются в живых, большая часть погибает в течение нескольких недель). В работе не указываются спектральные характеристики нейтронного излучения, а приведенные значения расстояний от эпицентра взрыва, мощность которого эквивалентна 1 кт (ТНТ), не согласуются с другими имеющимися данными о зависимости дозы от расстояния.

Методика исследования соотношения дозовых компонент проникающей радиации, спектрального состава нейтронного излучения на заданном расстоянии от центра взрыва должна основываться на существующих полуэмпирических зависимостях, полученных в результате полигонных испытаний и учитывающих многочисленные поправочные коэффициенты для каждого из типов ядерных боеприпасов, параметров среды распространения гамма-нейтронного излучения. Данные зависимости, реализованные в математическом пакете программ Mathcad, позволяют, на наш взгляд, корректно оценить основные параметры полей гамма-нейтронного излучения в любой точке пространства. На рис. 3–4 приведены доли нейтронной компоненты на различных расстояниях с учетом специфики ослабления компоненты с заданными спектральными характеристиками, характерными для атомного и термоядерного боеприпасов. Данные зависимости были получены для высоты ядерного взрыва 150 м с учетом спектрального распределения нейтронного излучения в «равновесных» зонах, определяемых типом ядерного боеприпаса, что исследовано в работе [17].

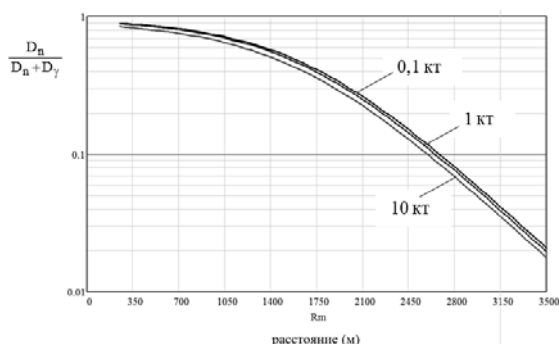


Рис. 3. Доля нейтронной дозы в общей дозе гамма-нейтронного излучения проникающей радиации при взрыве атомного боеприпаса в зависимости от расстояния до эпицентра взрыва

Анализ показывает, что с уменьшением мощности взрыва вклад нейтронов в суммарную дозу проникающей радиации возрастает. Увеличивается доля нейтронов в суммарной дозе и с уменьшением рас-

стояния, достигая, в зависимости от мощности взрыва, в зоне нейтронного облака 35–80%. Доля нейтронов возрастает и с увеличением доли энергии взрыва, обусловленной термоядерной частью заряда.

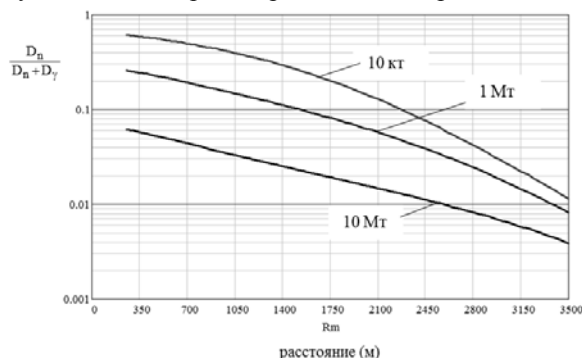


Рис. 4. Доля нейтронной дозы в общей дозе гамма-нейтронного излучения проникающей радиации при взрыве термоядерного боеприпаса в зависимости от расстояния до эпицентра взрыва

Гамма-излучение при наземных и воздушных ядерных взрывах дает основной вклад в суммарную дозу при мощности более 5 кт и расстояниях от центра взрыва более 500 м. При увеличении высоты взрыва доза проникающей радиации резко возрастает, так как при распространении в разреженной атмосфере излучения ослабляются в меньшей степени (растут эффективные длины свободного пробега гамма-квантов и нейтронов соответственно). При этом увеличивается доля нейтронного потока в общем потоке проникающей радиации, и при высотах взрыва более 15 км она на всех расстояниях от центра взрыва превышает долю потока гамма-излучения. Это объясняется, главным образом, уменьшением дозы захватного гамма-излучения. Кроме того, гамма-кванты и нейтроны проникающей радиации ядерного взрыва, распространяясь в плотных слоях атмосферы, рассеиваются, и на расстоянии нескольких длин свободного пробега рассеянное излучение становится преобладающим. В связи с этим воздействие данных компонент на объект возможно не только со стороны взрыва, но и с других направлений.

На рис. 5 представлена сравнительная оценка доли нейтронной составляющей для всех типов ядерных боеприпасов при тех же условиях взрыва. Наглядно видно, что для нейтронных боеприпасов заметно расширяется область доминирования нейтронной компоненты проникающей радиации, а, значит, при оценках тяжести поражения отсутствие достоверной информации о типе ядерного боеприпаса, вероятнее всего, приведет к катастрофическим последствиям.

В работах [17–18] отмечается, что на расстояниях [17–18] отмечается, что на расстояниях, где суммарная доза равна 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. Причем, вклад доз осколочно-

го и вторичного гамма-излучения изменяются от 7 до 56 и от 13 до 40%, соответственно. Поражающее действие нейтронной компоненты D_n в большинстве случаев определяется мгновенными нейтронами,

составляющими ~ 99% общего количества нейтронов. Основной вклад в дозу нейтронов при взрыве нейтронных боеприпасов вносят быстрые нейтроны с энергией от 12 до 14 МэВ.

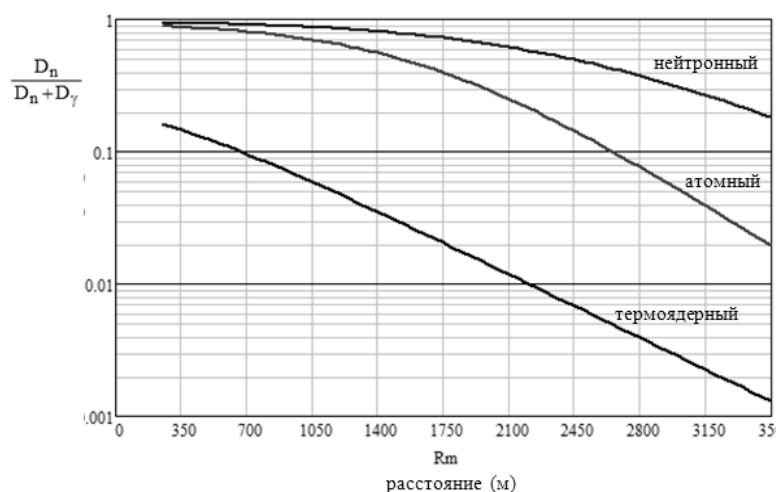


Рис. 5. Сравнительная оценка доли нейтронной составляющей для различных типов боеприпасов

При этом значения мощности дозы, создаваемые ими на расстояниях до 900 м от эпицентра взрыва, будут превышать мощности дозы, создаваемые спектром нейтронов при атомном взрыве в 1000 и более раз (до 10^9 – 10^{11} с Гр/с). При раздельной регистрации доз в системе радиационного мониторинга это должно учитываться в разрабатываемых математических моделях оценки тяжести радиационного поражения.

На основании имеющихся данных об эффектах воздействия гамма-нейтронного излучения проникающей радиации [16] и полученных данных о доле нейтронной дозы в общей дозе гамма-нейтронного

излучения на данном расстоянии была получена таблица 1, позволяющая исследовать влияние соотношений доз отдельных компонент проникающей радиации для различных типов ядерных боеприпасов и их мощности, определяющих заданный эффект. С учетом рекомендованной погрешности для заданных эффектов воздействия были найдены суммарные дозы гамма-нейтронного излучения, приводящие к аналогичным эффектам для различных условий облучения, а, значит, различных соотношений дозовых компонент.

Таблица 1

Дозы отдельных компонент проникающей радиации (в Гр) для различных типов ядерных боеприпасов и их мощности, определяющие заданный эффект воздействия импульсного гамма-нейтронного излучения на человека

эффект воздействия	Доза, Гр	атомный			нейтронный			термоядерный				
		10 кт	1 кт	0,1 кт	10 кт	1 кт	0,1 кт	100 кт	1 Мт	10 Мт		
Полный выход из строя												
Немедленный выход из строя	180±10%	198	n	170	190	170	180	170	220	86	12	2,4
			γ	14	30	19	22	14	14	120	200	190
		162	n	120	140	100	130	160	140	60	16	1,8
			γ	37	23	12	16	12	9,2	94	160	140
Недееспособность через 5 мин, смерть наступает в течение 1 суток	80±10%	88	n	57	64	85	91	73	85	30	6,4	1
			γ	20	14	9	12	8	5,7	53	72	90
		72	n	48	60	65	65	63	59	29	4,7	7,5
			γ	18	10	7,5	9,6	6,4	4,14	49	56	70
Временный выход из строя												
Недееспособность через 5 мин, смерть наступает через 4–6 суток	30±5%	37	n	26	28	32	33	37	32	11	2,7	0,42
			γ	11	6	4,8	5,6	3,7	2,5	23	34	43
		22	n	18	17	23	17	19	22	8	1,4	0,18
			γ	8,4	3,9	3,1	3,4	2,5	1,8	18	16	21
Летальный исход												
Пониженная работоспособность в течение 2 часов, большая часть погибает в течение нескольких недель	6,5±1,5%	n	4,4	5,2	6	5	6	5	1,6	3,2	0,04	
		γ	2,8	1,4	1	1,5	0,8	0,6	5,2	6,3	6,6	

Проведенный анализ показывает тенденцию увеличения соотношения n/γ излучения для известных эффектов воздействия гамма-нейтронного излучения проникающей радиации боеприпасов малой и сверхмалой мощности. Исключения составляют боеприпасы большого тротилового эквивалента (100 кт – 10 Мт), основанные на принципе «деление-синтез-деление». В этих условиях (на расстояниях от центра взрыва, где предполагается полный выход из строя), – поражение личного состава будет осуществляться нерадиационными факторами термоядерного взрыва, где доминирование нейтронной компоненты как поражающего фактора нивелируется. Интерес представляет оценка ситуаций радиационного поражения в «чистом» виде на расстояниях от 200–3000 м от эпицентра взрыва. В этих условиях, например, для временного выхода из строя (табл. 1) при воздействии атомного боеприпаса мощностью в 0,1, 1 и 10 кт на расстояниях 300, 600, 900 м соотношение дозовых компонент D_n/D_γ соответственно 7:1, 5:1 и 2:1. Для тех же мощностей нейтронного боеприпаса аналогичный эффект поражения прогнозируется на расстояниях 500, 800, 1150 м с соотношением дозовых компонент D_n/D_γ – 13:1, 10:1 и 5:1 соответственно. Наблюдается прямая зависимость между соотношением дозовых компонент не только для мощности взрыва, но и для тяжести поражения.

Так для нейтронного боеприпаса мощностью в 0,1 кт полный выход из строя личного состава целесообразно ожидать при соотношении 15:1, временный выход из строя и летальный исход – 13:1 и 8:1 соответственно. Приведенные выше данные отражают особенности облучения, связанные именно с процессом ослабления нейтронного потока и трансформацией его энергетического спектра (характерного для заданного типа боеприпаса) с расстоянием.

Сравнивая тип ядерного боеприпаса, можно утверждать, что для получения одного и того же эффекта поражения для нейтронного боеприпаса с типичной энергией нейтронов в 14 МэВ требуется большая доля нейтронной компоненты (большой поток), создаваемый большую поглощенную дозу нейтронного излучения, чем при атомном боеприпасе. Однако, для характеристики биологического воздействия ионизирующего излучения одной физической величины «поглощенной дозы» недостаточно.

Эквидозиметрическим критерием [19–21] оценки острых и подострых радиационных поражений людей в литературе является эффективная поражающая доза E_{inj} , измеряемая в эквивалентах грея (Гр) [8]. Она является мерой воздействия излучения произвольного состава с произвольным распределением поглощенной дозы по телу, вызывающая по тяжести и исходу острого поражения такой же результат, как воздействие с численно равным значе-

нием полевой поглощенной дозы одностороннего импульсного гамма-облучения от далеко расположенного источника. В ряде практических задач достаточно исходить из оценки итоговой тяжести и исхода острого поражения без подробностей развития поражения во времени. Поэтому при оценке поражающего действия гамма-нейтронного излучения по критерию «точность и исход заболевания» соотношение нарушений критических органов не учитывается, и поражающую дозу определяют из соотношения:

$$E_{inj} = 1,7(\bar{D}_\gamma + f_{RBW}\bar{D}_n)\psi_1\psi_s, \quad (1)$$

где \bar{D}_γ и \bar{D}_n – среднетканевые поглощенные дозы гамма- и нейтронного излучений, соответственно, Гр. Компонента гамма излучения характеризует сумму доз внешнего гамма-излучения и гамма-излучения от неупругого рассеяния и захвата нейтронов в пределах тела. Нейтронная компонента выражения (1) характеризует сумму доз протонов и тяжелых ядер отдачи от взаимодействия нейтронов с массой тела;

f_{RBW} – коэффициент относительной биологической эффективности, учитывающий энергетическое распределение и более высокую биологическую эффективность плотно ионизирующего компонента дозы. Значение находится в пределах 2–3 в зависимости от типа ядерного взрывного устройства и трансформации энергетического спектра нейтронов в воздухе;

$\psi_1\psi_s$ – комбинация коэффициентов, учитывающих роль неравномерности распределения дозы по длине тела $\psi_1 = (1 - 0,5)$ и толщине $\psi_s = (0,9 - 0,6)$, а также коэффициента размерности, учитывающего переход от идеальных условий облучения с равномерным распределением дозы к принятому за стандарт одностороннему гамма-облучению от далеко расположенного источника (1,7 Гр/Гр).

Таким образом, учесть соотношение компонент гамма-нейтронного излучения их спектральные характеристики представляется возможным, применяя эквидозиметрические модели поражения.

Результаты и их обсуждение

На основании простейшей – гомогенной расчетной модели выражения (1) произведена оценка радиационного поражения E_{inj} , учитывающая соотношение компонент проникающей радиации для боеприпасов различного типа, взорванных на высоте 150 м с относительной плотностью воздуха 0,9 (рис. 6–8). Были выбраны наиболее характерные тротилловые эквиваленты боеприпасов: для атомного и нейтронного – 1 кт, для термоядерного 100 кт. Энергетическое распределение и более высокая биологическая эффективность плотноионизирующей компоненты

дозы (нейтронная компонента) учтены путем корректного выбора коэффициента относительной биологической эффективности f_{RBW} (для нейтронного заряда – 2,2; для термоядерного – 2,5; для атомного – 3,0 [18]). Комбинация коэффициентов $\psi_1\psi_s = 0,45$,

учитывающих роль неравномерности распределения дозы по длине и толщине тела, принята для ситуаций, характерных при заданной высоте подрыва боеприпаса на интересующих нас расстояниях от центра взрыва.

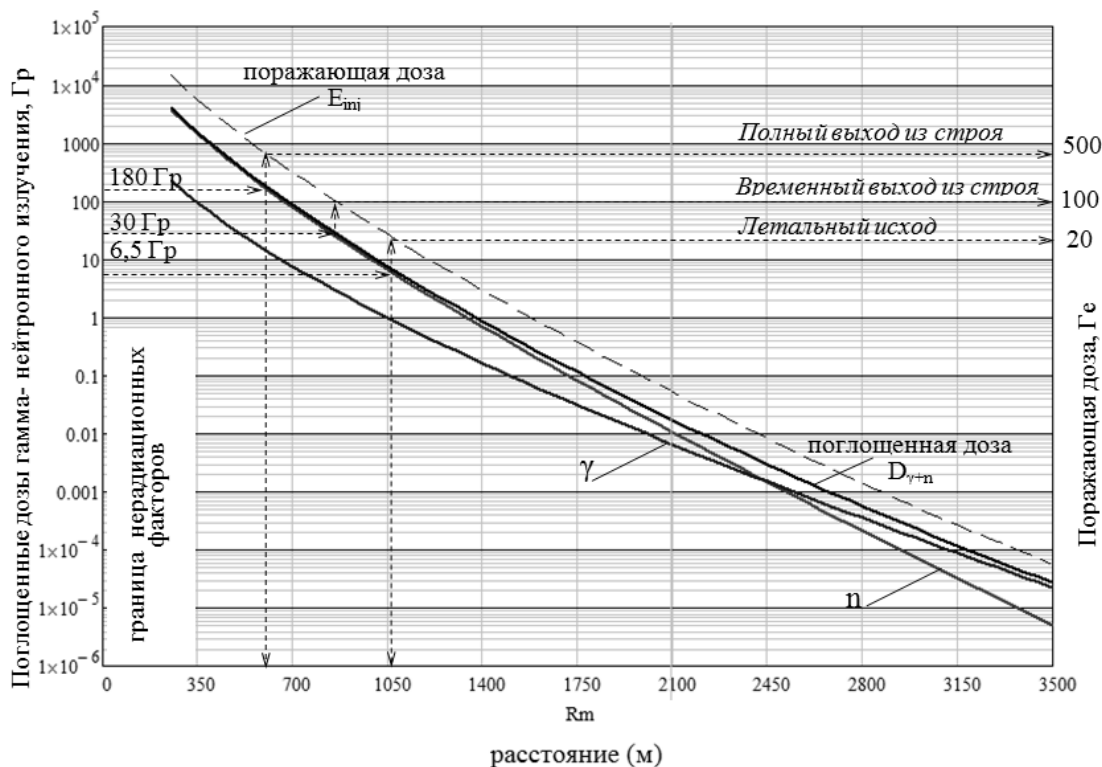


Рис. 6. Зависимость поражающей дозы гамма-нейтронного излучения проникающей радиации от расстояния до эпицентра взрыва нейтронного боеприпаса

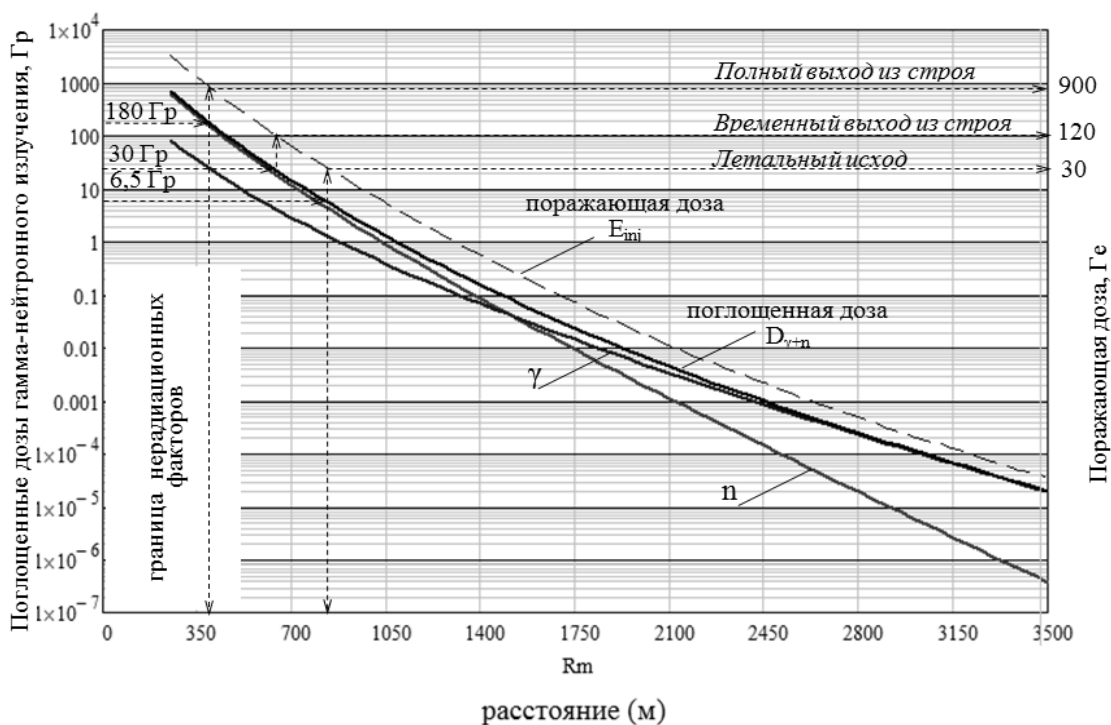


Рис. 7. Зависимость поражающей дозы гамма-нейтронного излучения проникающей радиации от расстояния до эпицентра взрыва атомного боеприпаса

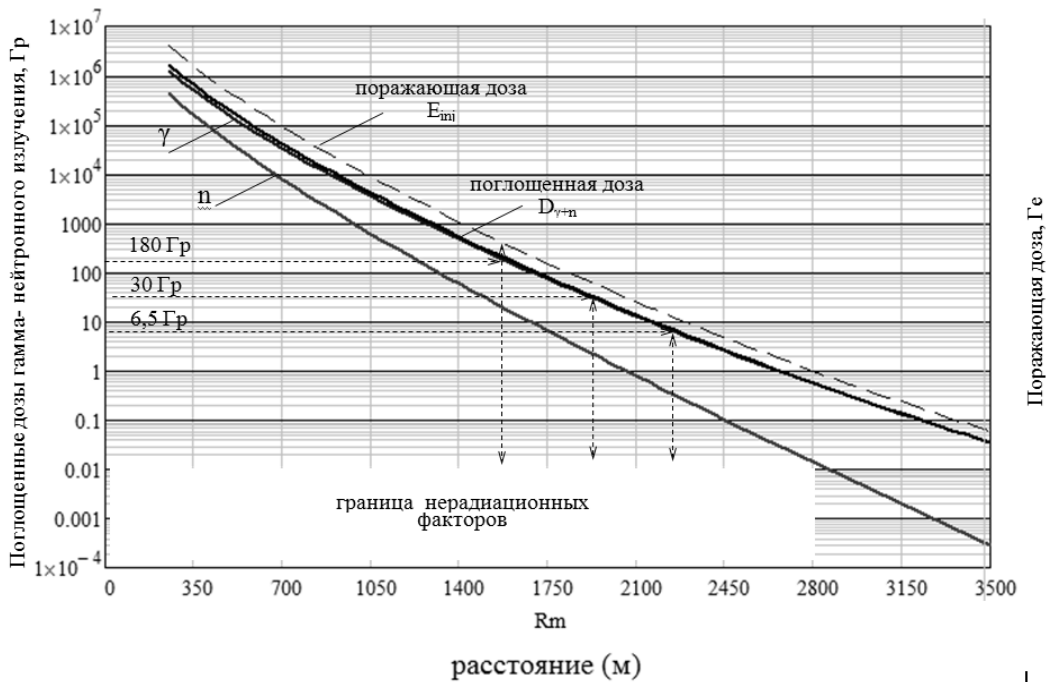


Рис. 8. Зависимость поражающей дозы гамма-нейтронного излучения проникающей радиации от расстояния до эпицентра взрыва термоядерного боеприпаса

Анализ полученных зависимостей показывает, что на близких расстояниях в зоне полного выхода из строя (180 Гр), временного выхода из строя (30 Гр), а также в зоне летальных исходов (6,5 Гр) наблюдается значительная доля нейтронной компоненты, которая, на наш взгляд, при импульсном характере воздействия является причиной РПН. Полученные значения расстояний от эпицентра, при котором наблюдается равенство компонент проникающей радиации (1500 м для атомного взрыва и 2400 м для нейтронного взрыва), не согласуются с другими имеющимися данными [22], связанными, на наш взгляд, с отличиями условий моделирования.

Зона, представляющая интерес для оценки дееспособности при воздействии атомного боеприпаса, ограничивается зоной поражения нерадикационными факторами (рис. 7), что должно учитываться при комплексной оценке комбинированного поражения. При термоядерном взрыве (рис. 8) будут доминировать очаги комбинированного ядерного поражения на всех расстояниях, где возможно острое радиационное поражение человека.

В принципе, применение эффективной поражающей дозы охватывает практически все актуальные условия облучения при различных типах ядерного взрыва и их мощности. Воздействие в диапазоне более 20 Ге, как правило, связывается с зоной потерь, радиационное поражение уступает комбинированному действию других (нерадикационных) поражающих факторов, более высокие дозы с «чистым» радиационным поражением возможны для ядерного устройства нейтронного типа. В диапазоне доз более 20 Ге прогноз на выживание абсолютно

неблагоприятен для всех типов ядерных боеприпасов. Результат воздействия характеризуется как быстро текущая форма радиационного поражения. Временный выход из строя для нейтронного (атомного) боеприпасов мощностью в 1 кт прогнозируется при эффективной поражающей дозе от 100 (120) Ге соответственно. Полный выход из строя (немедленный или потеря неспособности через пять минут) для нейтронного (атомного) боеприпасов мощностью в 1 кт прогнозируется при эффективной поражающей дозе от 500 (900) Ге соответственно. Для атомного взрыва данный эффект так же, как термоядерного мощностью в 100 кт, будет отягощен нерадикационными факторами поражения.

Таким образом, зависимость доза-эффект, по крайней мере, на современном уровне знаний может иметь только эмпирический характер. Поэтому прогнозировать тяжесть поражения по каким-либо дозиметрическим величинам можно, только опираясь на зависимости, полученные при экспериментальных или клинических наблюдениях. Однако, понимание механизмов поражения при воздействии импульсного гамма-нейтронного излучения проникающей радиации и представление их в виде математических моделей открывает путь для количественного учета модифицирующего действия различных особенностей лучевой нагрузки при ее неизменном масштабе.

Выводы

1. В условиях возрастающей опасности ограниченной ядерной войны с применением тактического ядерного оружия (боеприпасов малого и

сверхмалого калибров), а также нейтронных боеприпасов, характеризующихся повышенным (до 80%) выходом нейтронной компоненты, вопросы, касающиеся уточнения эффектов воздействия проникающей радиации на организм человека для различных соотношений этих двух компонент, а также различных спектральных характеристиках нейтронного излучения, являются актуальными и своевременными. Соотношение между дозами нейтронов и гамма-излучения в значительной степени для всех типов ядерных боеприпасов зависит от расстояния до центра взрыва и от его мощности.

2. На основании гомогенной расчетной модели была произведена оценка радиационного поражения, учитывающая соотношение компонент проникающей радиации для боеприпасов различного типа.

Применение эффективной поражающей дозы позволяет провести корректную оценку границ потери дееспособности человека для различных типов ядерных боеприпасов, сохраняя принятую градацию эффектов поражения.

3. От параметров отдельных компонент смешанного гамма-нейтронного излучения, а также от спектральных характеристик нейтронной составляющей зависят только последовательность и сроки развития состояния, ухудшающего, затем полностью исключаящего профессиональную деятельность, а также сроки наступления коллаптоидального состояния, сроки гибели. Наибольший интерес представляет оценка нарушения функции управления в масштабе времени «минуты-часы» после облучения.

Список литературы

1. Зиновьева Г.А. Радиационные поражения нервной системы. Часть 1. Поражение нервной системы при острой лучевой болезни / Г.А. Зиновьева // Клиническая неврология. – 2008. – № 1. – С. 28-40.
2. Клинические рекомендации по оказанию медицинской помощи пострадавшим от воздействия ионизирующего излучения в чрезвычайных ситуациях. – М.: МЗ РФ, 2013. – 72 с.
3. Даренская Н.Г. Радиобиологические закономерности развития орофарингиальной формы лучевого поражения / Н.Г. Даренская, Т.А. Насонова, О.А. Добрынина // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2006. – Том 51. – № 6. – С. 16-23.
4. Даренская Н.Г. Реакция организма на лучевое воздействие: Церебральная форма лучевой болезни / Н.Г. Даренская // Радиационная медицина: в 4 т.; под ред. Л.А. Ильина. – М.: Медицина, 2004. – Т. 1. – С. 551-560.
5. Военная токсикология, радиобиология и медицинская защита: учебник / С.А. Куценко, Н.В. Бутомо, А.Н. Гребенюк и др.; под ред. С.А. Куценко. – СПб.: ООО «Издательство ФОЛИАНТ», 2004. – 528 с.
6. Барабанов А.В. Анализ наиболее тяжелых случаев облучения человека в радиационных авариях, связанных с развитием самопроизвольной цепной реакции / А.В. Барабанов, А.Ю. Бушманов, В.Ю. Соловьев // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2011. – № 2. – С. 32-38.
7. Иванов И.В. Исходная реактивность организма и радиационные воздействия: лечебно-профилактические аспекты проблемы: научно-практическое руководство / И. В. Иванов. – М.: Изд-во РМАПО, 2005. – 395 с.
8. Физика ядерного взрыва: Том 2. Действие взрыва / Министерство обороны Российской Федерации. Центральный физико-технический институт. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 256 с.
9. Бекетов Е.Е. Зависимость эффективности одновременного воздействия гамма-квантов и нейтронов с энергией 14 МэВ от вклада плотной ионизирующего компонента / Е.Е. Бекетов [и др.] // Радиация и риск. – 2012. – Том 21. – № 3. – С. 82-90.
10. Поздышкина О.В. Сравнительное изучение закономерностей образования аберраций хромосом в культуре лимфоцитов человека при импульсном и пролонгированном нейтронном облучении: научное издание / О.В. Поздышкина, А.В. Севаньяев, Г.М. Обатуров // Радиационная биология. Радиационная экология. – 2000. – Т. 40, № 6. – С. 651-655.
11. Экспериментальное и теоретическое исследование действия импульсного нейтронного излучения на биологические объекты: научное издание / Г.М. Обатуров и др. // Международный конгресс "Энергетика-3000", Обнинск, 12-16 окт., 1998. – Обнинск, 1998. – С. 74-75.
12. Suzanne L. Jones. The Question of Pure Fusion Explosions Under the CTBT / Suzanne L. Jones and Frank N. Von Hippel // Science and Global Security. – 1997. – Volume 7. – P. 129-150.
13. A-Bomb Radiation Effects Digest. – Tokyo: Buncocoh Co., Ltd, 1993.
14. Гуськова А.К. Очерк радиационных эффектов атомной бомбардировки (рецензия) / А.К. Гуськова, С.П. Ярмоленко // Мед. Радиология и радиационная безопасность. – 1995. – Т. 40, № 6. – С. 67-69.
15. Nishiwaki Y. Fifty years after Hiroshima and Nagasaki / Y. Nishiwaki // International Atomic Energy Agency (IAEA). 1995 IRPA regional congress on radiation protection in Central Europe; Portoroz (Slovenia); 4-8 Sep 1995. – P. 17-26.
16. Schmidt D. Eigenschaften von Neutronenwaffen / D. Schmidt, V. Stein // Wissenschaft und Fortschritt. – 1983. – № 2. – С. 55-57.
17. Тарасенко Ю.Н. Ионизационные методы дозиметрии высокоинтенсивного ионизирующего излучения / Ю.Н. Тарасенко. – М.: Техносфера, 2013. – 264 с.
18. 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. Научно-технический журнал «Вестник Метролога». – 2014. – № 2. – С. 12-17.

19. Дозовая нагрузка на человека в полях гамма-нейтронного излучения / В.Л. Гозенбук, И.Б. Кеирим-Маркус и др. – М.: Атомиздат, 1978. – 168 с.
20. Кеирим-Маркус И.Б. Эквидозиметрия / И.Б. Кеирим-Маркус. – М.: Атомиздат, 1980. – 191 с.
21. Гозенбук В.Л. Дозиметрические критерии тяжести острого облучения человека / В.Л. Гозенбук, И.Б. Кеирим-Маркус. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 184 с.
22. Защита от оружия массового поражения / Под ред. В.В. Мясникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1989. – 389 с.

References

- Zinovieva, G.A. (2008), "Radiatsionnye porazheniya nervnoj sistemy. Chast' 1. Porazhenie nervnoj sistemy pri ostroj luchevoj bolezni" [Radiation damage to the nervous system. Part 1. The defeat of the nervous system in acute radiation sickness], *Clinical neurology*, No. 1, pp. 28-40.
- Ministry of Health of the Russian Federation (2013), "Klinicheskiye rekomendatsii po okazaniyu meditsinskoj pomoshchi postradavshim ot vozdeystviya ioniziruyushchego izlucheniya v chrezvychaynykh situatsiyakh" [Clinical recommendations for the provision of medical care to victims of ionizing radiation in emergency situations], Moscow, 72 p.
- Darenskaya, N.G., Nasonova, T.A. and Dobrynina, O.A. (2006), "Radiobiologicheskie zakonomernosti razvitiya orofaringial'noj formy lucheвого porazheniya" [Radiobiological patterns of development of oropharyngeal form of radiation injury], *Medical Radiology and Radiation Safety*, Vol. 51, No. 6, pp. 16-23.
- Darenskaya, N.G. (2004), "Reaktsiya organizma na luchevoe vozdejstvie: Tserebral'naya forma luchevoj bolezni" [Response of the body to radiation exposure: Cerebral form of radiation sickness], *Radiation medicine*, Vol. 1, pp. 551-560.
- Kutsenko, S.A., Butomo, N.V. and Grebenyuk, A.N. (2004), "Voennaya toksikologiya, radiobiologiya i meditsinskaya zashhita: uchebnyk" [Military toxicology, radiobiology and medical protection], Publishing House "Foliant", St. Petersburg, 528 p.
- Barabanov, A.V., Bushmanov, A.Y. and Solovjev, V.Y. (2011), "Analiz naibolee tyazhelykh sluchaev oblucheniya cheloveka v radiatsionnykh avariyaх, svyazannykh s razvitiem samoproizvol'noj tseпnoj reaktsii" [Analysis of the most severe cases of human irradiation in radiation accidents associated with the development of spontaneous chain reaction], *Medical-biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations*, No. 2, pp. 32-38.
- Ivanov, I.V. (2005), "Iskhodnaya reaktivnost' organizma i radiatsionnye vozdejstviya: lechebno-profilakticheskie aspekty problemy: nauchno-prakticheskoe rukovodstvo" [Initial reactivity of the organism and radiation effects: therapeutic and preventive aspects of the problem], Publishing house RMAPO, Moscow, 395 p.
- Ministry of Defense of the Russian Federation. Central Institute of Physics and Technology (1997), "Fizika yadernogo vzryva: Tom 2. Dejstvie vzryva" [Physics of the nuclear explosion: Volume 2. The effect of the explosion], Moscow, 256 p.
- Beketov, E.E. (2012), "Zavisimost' ehffektivnosti odnovremennogo vozdejstviya gamma-kvantov i nejtronov s ehnergiej 14 MeV ot vklada plotnoioniziruyushhego komponenta" [Dependence of the efficiency of simultaneous action of gamma quanta and neutrons with energy of 14 MeV on the contribution of the dense ionizing component], *Radiation and risk*, Vol. 21, No. 3, pp. 82-90.
- Pozdyshkina, O.V., Sevankaev, A.V. and Obaturov, G.M. (2000), "Sravnitel'noe izuchenie zakonomernostej obrazovaniya aberratsij khromosom v kul'ture limfotsitov cheloveka pri impul'snom i prolongirovannom nejtronnom obluchenii: nauchnoe izdanie" [Comparative study of the patterns of formation of chromosome aberrations in the culture of human lymphocytes under pulsed and prolonged neutron irradiation], *Radiation Biology. Radioecology*, Vol. 40, No. 6, pp. 651-655.
- Obaturov, G.M. (1998), "Eksperimental'noe i teoreticheskoe issledovanie dejstviya impul'snogo nejtronного izlucheniya na biologicheskie ob'ekty: nauchnoe izdanie" [Experimental and theoretical investigation of the effect of pulsed neutron radiation on biological objects], *International Congress "Energy-3000" in Obninsk*, pp. 74-75.
- Jones, S. and Von Hippel, F. (1997), The Question of Pure Fusion Explosions Under the CTBT, *Science and Global Security*, Vol. 7, pp. 129-150.
- Shigematsu, I. (1993), *A-Bomb Radiation Effects Digest*, Bubcoch Co., Ltd, Tokyo, 40 p.
- Guskova, A.K. and Yarmolenko, S.P. (1995), "Ocherk radiatsionnykh ehffektov atomnoj bombardirovki (retsenziya)" [Essay on the radiation effects of atomic bombing], *Radiology and Radiation Safety*, Vol. 40, No. 6, pp. 67-69.
- Nishiwaki, Y. (1995), Fifty years after Hiroshima and Nagasaki, *International Atomic Energy Agency, IRPA regional congress on radiation protection in Central Europe; Portoroz (Slovenia)*, pp. 17-26.
- Schmidt, D. and Stein, V. (1983), Eigenschaften von Neutronenwaffen, *Wissenschaft und Fortschritt*, No. 2, pp. 55-57.
- Tarasenko, Y.N. (2013), "Ionizatsionnye metody dozimetrii vysokointensivnogo ioniziruyushhego izlucheniya" [Ionization methods for dosimetry of high-intensity ionizing radiation], Technosphere, Moscow, 264 p.
- Vasiliev, I.O. and Lopatin, Y.V. (2014), "Issledovaniya polej nejtronного i gamma-izlucheniya reaktora s tsel'yu sozdaniya na nyom rabochikh ehtalonov edinits dozimetricheskikh velichin nejtronного i gamma-izlucheniya" [Investigations of neutron and gamma radiation fields of the reactor with the aim of creating on it working standards of dosimetric units of neutron and gamma-radiation], *Problems of metrology. Scientific and technical journal "Bulletin of Metrology"*, No. 2, pp. 12-17.
- Gosenbuk, V.L. and Keirim-Markus, I.B. (1978), "Dozovaya nagruzka na cheloveka v polyakh gamma-nejtronного izlucheniya" [Dose load per person in fields of gamma-neutron radiation], Atomizdat, Moscow, 168 p.
- Keirim-Markus, I.B. (1980), "Ekvidozimetriya" [Equidosimetry], Atomizdat, Moscow, 191 p.
- Gosenbuk, V.L. and Keirim-Markus, I.B. (1988), "Dozimetricheskie kriterii tyazhesti ostrogo oblucheniya cheloveka" [Dosimetric criteria for severity of acute human exposure], EnergoAtomizdat, Moscow, 184 p.

22. Myasnikov, V.V. (1989), "Zashhita ot oruzhiya massovogo porazheniya" [Protection against weapons of mass destruction], Voenizdat, Moscow, 389 p.

Поступила в редколлегию 15.08.2018

Одобрена к печати 11.09.2018

Відомості про автора:

Чернявський Ігор Юрійович

кандидат технічних наук доцент
доцент кафедри
Військового інституту танкових військ НТУ «ХПІ»,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2785-0617>

Information about the author:

Igor Cherniavskiy

Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Lecturer of Department of Military Institute
of Tank Forces the National Technical University "KhPI",
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2785-0617>

**ОЦІНКА ВАЖКОСТІ РАДІАЦІЙНОГО УРАЖЕННЯ
НА ОСНОВІ ВРАХУВАННЯ СПІВВІДНОШЕННЯ ГАММА-НЕЙТРОННИХ КОМПОНЕНТ
ПРОНИКАЮЧОЇ РАДІАЦІЇ ТА ЇХ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

І.Ю. Чернявський

У роботі передбачається, що «стандартизовані» ефекти ураження організму, що призводять до ранньої минущої неієздатності людини, будуть спостерігатися на різних відстанях від центру вибуху для різних типів і потужностей ядерних боєприпасів в залежності від спектра нейтронного випромінювання і співвідношення гамма нейтронного випромінювання в сумарній дозі опромінення. Відсутність даних про спектральні характеристики нейтронної компоненти, що визначають тип ядерного боєприпасу, має помітно позначатися на достовірності оцінки ступеня тяжкості радіаційного ураження.

Виявляються закономірності в методології оцінки уражаючої дози гамма-нейтронного випромінювання для боєприпасів різного типу. На підставі існуючих моделей і аналітичних виразів, що дозволяють розрахувати γ/n – співвідношення компонент проникаючої радіації для боєприпасів різного типу, отримані розподіли уражаючої дози з відстанню від центру вибуху. Це дозволяє більш коректно оцінювати райони з заданим біологічним ефектом в розроблених системах радіаційного моніторингу надзвичайних ситуацій військового характеру.

Ключові слова: співвідношення гамма-нейтронних компонент, проникаюча радіація, уражаюча доза, тип ядерного боєприпасу.

**ASSESSMENT OF SEVERITY OF RADIATION ON THE BASIS OF ACCOUNTING RELATIONS
GAMMA-NEUTRON COMPONENT OF IONIZING RADIATION AND THEIR SPECTRAL CHARACTERISTICS**

I. Cherniavskiy

With instantaneous general gamma-neutron irradiation in doses (34-60 Gy and more), causing acute radiation sickness of an extremely severe degree with overexposure of the head, neck and chest, acute damage to the nervous system develops, which in the literature was termed the effect of an early passing incapacity of a person. The recommended criteria for assessing such radiation damage are currently very uncertain due to the lack of data on the balance of gamma-neutron radiation in the cumulative effect and can be based only on experimental radiobiology data, studies related to the most severe cases of human irradiation, as a result of spontaneous chain reactions in nuclear incidents.

In most cases, nuclear tests also lacked reliable information about dose loads for individual components of radiation and spectral characteristics of the neutron component. In addition, the irradiation was, as a rule, uneven in the human body (due to the peculiarities of γ/n ratios at a given distance), which should significantly influence the effects of irradiation. Therefore, the information in the literature on the dose-effect dependencies for such scenarios of radiation damage can not be reliably established.

The paper assumes that the "standardized" effects of an organism's damage leading to an early transient incapacity of a person will be observed at different distances from the center of the explosion for different types and capacities of nuclear munitions, depending on the spectrum of neutron radiation and the ratio of gamma-neutron radiation in the total dose of irradiation. The lack of data on the spectral characteristics of the neutron component determining the type of nuclear munitions should significantly affect the reliability of assessing the severity of radiation damage.

Regularities are revealed in the methodology for estimating the damaging dose of gamma-neutron radiation for munitions of various types. Based on the existing models and analytical expressions allowing to calculate γ/n - the ratio of penetrating radiation components for munitions of various types, the distribution of the damaging dose with distance from the center of the explosion was obtained. This makes it possible more correctly to estimate areas with a given biological effect in the developed systems of radiation monitoring of military emergencies.

Keywords: ratio of gamma-neutron components, penetrating radiation, damaging dose, type of nuclear munition.