

# Радиационно-гигиенические аспекты

И. Я. Василенко

*доктор медицинских наук,*

*Государственный научный центр — Институт биофизики*

О. И. Василенко\*

*доктор физико-математических наук,*

*физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова*

Техногенное радиоактивное загрязнение внешней среды носит глобальный характер. Основным источником загрязнения явились испытания ядерных боеприпасов и выбросы (аварии) радионуклидов предприятиями атомной энергетики и промышленности. Последние, после прекращения испытаний ядерных боеприпасов, будут источником загрязнения в течение неопределённо продолжительного времени. Свой вклад в загрязнение вносит широкое использование источников ионизирующих излучений (ИИ) в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве, медицине, науке, технике. Источником загрязнения могут стать аварии при транспортировке и хранении отработанного ядерного топлива (ОЯТ), уничтожении гигантских запасов ядерных боеприпасов, которые проводятся в настоящее время и будут проводиться в течение многих лет, использование ядерных зарядов малой и сверхмалой мощности в антитеррористических операциях, возможность чего широко обсуждается в последнее время. Не исключается применение террористами "грязных" бомб, основанных на включении в тротиловые заряды биологически опасных радионуклидов, таких как  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ . Загрязнение ураном происходит при применении бронебойных снарядов, содержащих слабообогащённый уран. В последнее время появились сведения о работах по созданию принципиально нового ядерного оружия — гафниевой бомбы, которое не подпадает под существующие международные ограничения [1, 2, 3, 4, 5, 6].

В результате загрязнения внешней среды повысился радиационный фон Земли и, как следствие, увеличились дозы облучения всех растительных и животных организмов, включая человека. Облучение носит хронический комбинированный характер — сочетание внешнего и внутреннего облучения от поступающих в организм радионуклидов. Облучение, как правило, сочетается с действием нерадиационных факторов физической, химической и биологической природы, которые модифицируют действие радиации [1].

**Биологическое действие радиации.** В основе биологического действия ИИ лежит передача энергии, затрачиваемой на ионизацию и возбуждение атомов и молекул орга-

---

\*E-mail address: vasilenko@depni.sinp.msu.ru

нов и тканей. Излучения условно делят на непосредственно и косвенно ионизирующее. К первым относят заряженные частицы:  $\alpha$ ,  $\beta$ -частицы, протоны и более тяжёлые частицы, генерируемые на ускорителях. Вторые представлены гамма-, рентгеновским и тормозным излучением, нейтронами, нейтральными мезонами и др.

Для ионизации атомов большинства элементов, входящих в состав тканей (Н, С, О, Na, К, Р и др.) требуется около  $10 \div 15$  эВ. Если энергия, передаваемая атому, меньше, то происходит его возбуждение. В биологической ткани средние суммарные затраты энергии на один акт ионизации и предшествующие ему несколько актов возбуждения атомов и молекул среды составляют  $W \approx 34$  эВ.

В реакции организма на облучение можно выделить 4 фазы. Три первые из них измеряются ничтожно малыми долями секунд, последняя фаза — медленная. В течение трёх быстрых фаз происходят молекулярные изменения, в четвёртой фазе — реализация этих нарушений в функциональные и структурные повреждения клеток, тканей органов и организма в целом.

В первой, физической фазе поглощение энергии ИИ сопровождается процессами ионизации и возбуждения атомов и молекул. Продолжительность фазы  $\sim 10^{-18}$  с. Ионизированными могут оказаться белки, углеводы, нуклеиновые кислоты и различные низкомолекулярные органические и неорганические соединения. Водой поглощается 75 % энергии и органическими и неорганическими соединениями — 25 %.

Во-второй, физико-химической фазе энергия, поглощённая молекулами, реализуется разрывами химических связей и образованием высокоактивных в химическом отношении радикалов типа О, Н, НО и перекиси водорода  $H_2O_2$ . Высокая активность свободных радикалов связана с наличием неспаренного электрона. Поглощённая энергия может мигрировать по макромолекуле и реализоваться в её "слабом" месте или перейти на соседние клетки, вызывая их повреждение. Радикалы, взаимодействуя с различными растворёнными соединениями, дают начало **вторичным** радикалам, сроки жизни которых значительно больше. Длительность второй фазы также крайне мала ( $\sim 10^{-12}$  с).

В третьей, химической фазе продолжительностью  $\sim 10^{-9}$  с продукты предшествующих реакций, особенно свободные радикалы, вступают в реакции между собой и с органическими молекулами клеток. В результате возникают разнообразные повреждения. Большое значение имеет реакция с белками ДНК в ядрах клеток. Химическое действие радикалов проявляется на всех уровнях организма, включая разрывы нитей ДНК, торможение синтеза белков, инактивацию ферментов, повреждение мембран и ядер клеток. Активность радикалов различна и не отличается от активности радикалов, спонтанно образующихся в процессе жизнедеятельности организма.

Процессы, происходящие на начальных физико-химических этапах, являются пусковыми, ибо они определяют дальнейший ход лучевого поражения. Молекулярные изменения трансформируются в клеточные изменения. Наиболее чувствительными к облучению являются ядро, митохондрии, мембраны, клетки и особенно ДНК. В результате в зависимости от дозы облучения может наступить гибель клетки, потеря или замедление клеточного деления (митозов). Причиной гибели клеток в большинстве случаев является непосредственное их облучение. Опосредованные, в том числе гуморальные эффекты, играют значительно меньшую роль. Различают две основные формы гибели клеток: **репродуктивную** (митотическую, постмитотическую), связанную с процесса-

ми клеточного деления, и **интерфазную**, не зависящую от фазы клеточного цикла и наблюдаемую как в делящихся, так и в не делящихся клетках. При сохранении клеточного деления повреждения передаются дочерним клеткам, а в случае нарушений в половых клетках — потомству.

Эта фаза наиболее вариабельна по временным масштабам. Общебиологические изменения в клетках и органах характеризуются биохимическими, физиологическими и морфологическими изменениями, нарушениями генетического кода, транслокации и трансляции.

## Дозы излучения и единицы измерения

Эффект облучения зависит от величины поглощённой дозы, её мощности, объёма облучённых тканей и органов, вида излучения, физиологического состояния организма. Биологическое действие ИИ зависит также от пространственного распределения поглощённой энергии, которое характеризуется линейной передачей энергии (ЛПЭ). В зависимости от ЛПЭ ИИ подразделяются на редкоионизирующие и плотноионизирующие. Для последних, в отличие от первых, характерны высокая вероятность образования двухнитевых разрывов ДНК и низкий уровень восстановительных процессов даже при малых дозах. Это учитывается при оценке различных видов излучений. При этом ОБЭ рентгеновского и гамма-излучений принимается равным 1.

$$\text{ОБЭ} = \frac{\text{Доза рентгеновского излучения (180 ÷ 250 кэВ), вызывающая данный эффект.}}{\text{Поглощённая доза любого другого излучения, вызывающая такой же эффект.}}$$

ОБЭ зависит не только от ЛПЭ излучения, но и от ряда физических и биологических факторов, например от величины дозы, кратности облучения и др. По предложению Международной комиссии по радиологическим единицам, показатели ОБЭ для оценки различных видов излучения используют только в радиобиологии. Для решения задач радиационной защиты предложен **коэффициент качества излучения (КК)**. КК зависит от ЛПЭ.

Таблица 1

### Коэффициенты качества излучения (КК) для воды

ЛПЭ, кэВ/мкм	<3.5	7.0	23	53	>175
КК	1	2	5	10	20

Снижение мощности дозы излучения уменьшает биологический эффект, что связано с восстановлением облучённого организма. В организме в процессе филогенеза выработались мощные системы защиты не только от радиации, но и других повреждающих агентов нерадиационной природы. С увеличением мощности дозы значимость восстановительных процессов снижается.

**Поглощённая доза излучения.** В качестве величины, характеризующей воздействие ИИ на облучение органов и тканей принята поглощённая доза, представляющая

отношение средней энергии  $dE$ , переданной ИИ веществу в элементарном объёме, к массе вещества в этом объёме  $dm$

$$D = \frac{dE}{dm} .$$

В качестве единицы поглощённой дозы в Международной системе единиц СИ принят грей (Гр), соответствующий поглощению 1 Дж ( $= 10^7$  эрг) энергии в 1 кг вещества (1 Гр = 1 Дж/кг). В практике ранее использовали внесистемную единицу — рад: (1 рад = 100 эрг/г =  $10^{-2}$  Дж/кг =  $10^{-2}$  Гр). Единица поглощённой мощности дозы равна (1 Гр/с = 1 Дж/(кг·с) = 1 Вт/кг). Внесистемная единица поглощённой мощности дозы — рад/с.

**Эквивалентная доза излучения.** Воздействие радиации на человека в большинстве случаев характеризуется пролонгированным облучением в малых дозах с низкой мощностью дозы. Для оценки ущерба здоровью человека введена величина **эквивалентной дозы** ( $H_T$ ), равная произведению средней поглощённой дозы данного вида излучения в органе на взвешивающий коэффициент для конкретного вида излучения ( $W_R$ )

$$H_T = \sum_R W_R D_{TR} ,$$

где  $D_{TR}$  — средняя поглощённая доза в органе или ткани  $T$ ;  $W_R$  — взвешивающий коэффициент для излучения  $R$ . Величины взвешивающих коэффициентов  $W_R$  для разных видов излучения приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Взвешивающие коэффициенты  $W_R$   
для различных видов излучения**

Вид и энергия излучения	Весовой множитель излучения $W_R$
Фотоны, все энергии	1
Электроны и мюоны, все энергии	1
нейтроны с энергией	
< 10 кэВ	5
10 ÷ 100 кэВ	10
100 кэВ ÷ 2 МэВ	20
2 ÷ 20 МэВ	10
> 20 МэВ	5
протоны с энергией > 2 МэВ (кроме протонов отдачи)	5
$\alpha$ -частицы, осколки деления, тяжёлые ядра	20

Из таблицы 2 следует, что значение  $W_R$  для разных видов излучения существенно различаются. Биологический эффект при поглощённых дозах, например равных 1 Гр, разумеется будет зависеть от дозы излучения. Единицей эквивалентной дозы является зиверт (Зв). Внесистемная единица — бэр (1 бэр = 0,01 Зв).

**Эффективная доза излучения.** Во многих случаях облучению подвергается не всё тело, а отдельные органы или же распределение поглощённой дозы носит крайне неравномерный характер. Чаще всего это наблюдается при поступлении в организм радионуклидов, особенно продуктов деления (ПЯД) урана и плутония, которые представляют собой сложную смесь свыше 200 радиоизотопов. Вследствие различной тропности радионуклидов различия облучения отдельных органов достигают 3 ÷ 4 порядков величин. Подробно вопросы ПЯД изложены в разделе справочника "Продукты ядерного деления урана и плутония".

Поскольку органы и ткани человека обладают различной радиочувствительностью к радиационному воздействию, то для оценки облучения всего организма или отдельных его органов введено понятие **эффективная доза**. Вместе с величиной эквивалентной дозы она применяется при оценке хронического облучения в относительно малых дозах и является мерой риска отдалённых последствий облучения.

Эффективная доза равна сумме произведений эквивалентной дозы в органе или ткани на соответствующие весовые множители  $W_T$  для данного органа или ткани

$$E = \sum_T W_T H_T ,$$

где  $W_T$  — взвешенный коэффициент для ткани  $T$ ;  $H_T$  — эквивалентная доза в органе или ткани  $T$ . Величины взвешивающих коэффициентов  $W_T$  для разных органов и тканей приведены в таблице 3.

Таблица 3

### Взвешивающие коэффициенты для различных органов и тканей

Ткань или орган	$W_T$	Ткань или орган	$W_T$
Половые железы	0,20	Печень	0,05
Красный костный мозг	0,12	Пищевод	0,05
Толстый кишечник	0,12	Щитовидная железа	0,05
Лёгкие	0,12	Кожа	0,01
Желудок	0,12	Поверхность костей	0,01
Мочевой пузырь	0,05	Остальные органы	0,05
Молочная железа	0,05		

Весовые множители эквивалентной дозы используются для учёта различной радиочувствительности отдельных органов и тканей при возникновении стохастических эффектов. Единица эффективной дозы — зиверт (Зв). Внесистемная единица — бэр (1 бэр = 0,01 Зв).

**Коллективная доза излучения.** При широкомасштабном использовании ИИ значительные контингенты людей могут подвергнуться воздействию радиации (персонал, отдельные группы населения). В этих условиях важно оценить степень риска, обусловленного всеми источниками радиации, и вклад каждого из них. Для такой оценки используют **коллективную дозу**, представляющую сумму индивидуальных эффективных доз у каждого контингента за данные промежутки времени. Единицей измерения коллективной эффективной дозы в СИ является чел.·Зв. Оценка риска с использованием коллективной дозы позволяет оптимально решать многие вопросы радиационной безопасности (ликвидация последствий аварии, ремонтные и регламентные работы, внедрение новых технологий).

## Источники воздействия ионизирующих излучений на человека

Радиационное воздействие на человека обусловлено:

- естественным радиационным фоном (ЕРФ) от источников космического и земного происхождения;
- техногенно изменённым естественным радиационным фоном (ТИЕРФ) от природных источников, претерпевших изменения в результате деятельности человека;
- искусственным радиационным фоном (ИРФ) от продуктов ядерного деления, образовавшихся при ядерных взрывах, выбросов и отходов ядерной энергетики и промышленности;
- медицинским облучением;
- широким использованием ИИ в промышленности, сельском хозяйстве, науке, медицине и других отраслях хозяйства;
- облучением при радиационных авариях.

Кратко остановимся на каждом из них.

**Естественный радиационный фон.** Облучение от ЕРФ подразделяется на внешнее внеземного происхождения (космическое излучение — частицы, захваченные магнитным полем Земли; галактические космические лучи; корпускулярное излучение Солнца), земного происхождения (радионуклиды, присутствующие в земной коре, воздухе, воде), радионуклиды, содержащиеся в организме человека.

В результате взаимодействия космических лучей с ядрами атомов окружающей среды образуются космогенные радионуклиды (изотопы Н, Ве, С, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, Kг и др.). Наибольшее значение имеют  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^7\text{B}$ ,  $^{22}\text{Na}$ , особенно  $^{14}\text{C}$ .

Компонентом ЕРФ является радиоактивность горных пород Земли и почвы, образовавшейся в результате разрушения горных пород. Активность представлена радионуклидами семейств  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , а также радионуклидами рядов  $^{235}\text{U}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{138}\text{La}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,

$^{176}\text{Lu}$ , а также  $^{40}\text{K}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  и др., не входящими в эти семейства. В далёком прошлом на Земле содержались радионуклиды всех элементов. По мере их физического распада остались только долгоживущие, сроки жизни которых измеряются миллиардами лет, и продукты их распада. Из радионуклидов рядов  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  особое место занимают радиоактивные газы радон и торон, поступающие из почвы и строительных материалов в атмосферу, жилые дома и производственные помещения.

Вследствие непрерывных деструктивных процессов вулканического характера радионуклиды подвергаются широкому рассеянию. Важную роль в этих процессах играет вода, как универсальный растворитель. Уровень загрязнения речной воды определяется типом питания рек, озёр — питающими реками и подземными источниками, морей и океанов — солевым составом.

В процессах миграции радионуклидов значительное место занимает животный мир — растения и животные. Их радиоактивность обусловлена теми же радионуклидами, которые встречаются в природе. Радионуклиды в месте со стабильными изотопами поступают в организм по пищевым цепочкам и с водой. В организме человека содержатся в тех или иных количествах все элементы и их сохранившиеся радиоактивные изотопы, поступающие перорально и ингаляционно [1, 2].

**Техногенно изменённый естественный радиационный фон.** В результате деятельности человека изменяется природный естественный фон Земли. Из недр Земли извлекается огромное количество полезных ископаемых, вместе с которыми на поверхность поступают и естественные радионуклиды, что приводит к повышению радиационного фона на поверхности Земли и увеличению доз внешнего и внутреннего облучения всех организмов, включая человека. Для гражданского и промышленного строительства широко используют отходы (золу, шлаки чёрной и цветной металлургии). Внутри помещений дозы в значительной мере формируются за счёт радона, торона и продуктов из распада.

**Облучение населения, обусловленное испытаниями ядерного оружия.** Испытания ядерных боеприпасов и выбросы (аварии) предприятий атомной энергетики и промышленности привели к глобальному загрязнению внешней среды и, как следствие, к повышению внешнего и внутреннего облучения населения. Подробно эти вопросы изложены в разделе "Продукты ядерного деления" справочника.

**Облучение населения, обусловленное использованием ИИ в медицине.** Облучение населения при медицинских процедурах вносит существенный вклад в интегральную дозу от естественных и искусственных источников. Широко применяют рентгено- и радиоизотопную диагностику, лучевую терапию с использованием открытых и закрытых источников. Дозы при рентгенологических исследованиях в значительной мере зависят от технического состояния используемой аппаратуры, квалификации медиков, числа снимков и времени исследования. В последнее время для диагностики стали использовать компьютерную томографию и ультразвуковые методики. Последняя не связана с риском облучения. Дозы при флюорографии разных органов составляют для взрослых  $0,03 \div 3,6$  мЗв/процедура, рентгенографии —  $0,1 \div$

4,6 мЗв/процедура, для детей — 0,1 ÷ 1,7 мЗв/процедура, компьютерная томография — 2 ÷ 14 мЗв/процедура для взрослых и 3,2 ÷ 4,3 мЗв/процедура для детей.

Для радиационно-диагностических целей в зависимости от метода и целей используют большое число препаратов с относительно коротким периодом полураспада, обеспечивающим небольшую лучевую нагрузку ( $^{99m}\text{Fe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{127}\text{Xe}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{81}\text{Kr}$ ,  $^{81m}\text{Kr}$  и др.). Ориентировочные дозы на пациента составляют 0,2 ÷ 8,0 мГр. Более высокие дозы могут быть при диагностике и особенно лечении опухолей.

Таблица 4

**Среднегодовые эквивалентные дозы  
облучения населения России**

Источник ионизирующего излучения	Вид облучения	Доза, мкЗв/чел	
Естественный радиоактивный фон	внешнее	650	
	внутреннее	1600	
	всего	2250	
Технологически изменённый естественный радиационный фон:			
	естественные радионуклиды, содержащиеся в стройматериалах и воздухе помещений	внешнее внутреннее всего	100 1300 1400
	минеральные удобрения	всего	0,15
	угольные электростанции	всего	2
	Искусственный радиационный фон:		
АЭС	всего	0,17	
глобальные выпадения вследствие испытаний ядерного оружия	внешнее	10	
	внутреннее	15	
	всего	25	
Рентгенодиагностика и радиоизотопная терапия	всего	1400	
Суммарная доза от всех источников		≈ 5080	

Приведённые выше данные позволяют оценить полную индивидуальную и коллективную дозы от всех основных источников облучения. Полная годовая индивидуальная

доза в среднем составляет  $\sim 0,5$  мЗв (таблица 4). Основной вклад вносит естественный радиационный фон и медицинское облучение — 50 и 30 %. Следует отметить, что вклад естественного фона в отдельных регионах существенно различается и разница достигает примерно порядка величин. При испытаниях ядерных боеприпасов и радиационных авариях в зонах ближних выпадений радионуклидов дозы облучения в отдельных случаях достигали поражающих. Повышенные дозы облучения были у ликвидаторов последствий радиационных аварий и населения в зонах радионуклидного загрязнения [6].

## Радиочувствительность животных и растений

Радиочувствительность животных и растительных организмы различна, причина этого полностью не выяснена. Как правило, наименее чувствительны одноклеточные растения, животные и бактерии, а наиболее чувствительны млекопитающие животные (таблица 5).

Таблица 5

**Ориентировочная радиочувствительность  
разных видов животных и растений (СД<sub>50/30</sub>)**

Объект	Доза, Гр	Объект	Доза, Гр
Морская свинка	2 ÷ 3	Кролик	8 ÷ 9
Человек	4	Хомяк	9
Собака	3 ÷ 4	Лягушка	10
Овца	4 ÷ 5	Черепаша	15
Коза	4	Карась	15
Свинья	4 ÷ 5	Тритон	30
Обезьяна (мартышка)	4 ÷ 5	Кишечная палочка	60
Осёл	6	Змея	100 ÷ 120
Корова	6 ÷ 7	Улитка	200
Мул	6 ÷ 7	Хлорелла	200
Верблюд	7	Дрожжи	300
Мышь (разных видов)	6 ÷ 10	Амёба	1000
Крыса (разных видов)	7 ÷ 9	Инфузория	1500
Золотая рыбка	7	Растения	10 ÷ 150
Курица	7 ÷ 8	Насекомые	10 ÷ 100
Сурок	8	Простейшие	1000 ÷ 3000

Чувствительность к радиации различается у отдельных особей одного и того же ви-

да. Она зависит от физиологического состояния организма, условий его существования и индивидуальных особенностей. Более чувствительны к облучению новорождённые и старые особи. Различного рода заболевания, воздействие других нерадиационных вредных факторов модифицирует действие радиации и отрицательно сказывается на течении радиационных поражений.

В зависимости от дозы облучения различают **детерминированные** и **стохастические** эффекты.

**Детерминированные эффекты.** Для детерминированных эффектов существует дозовый порог (таблица 6).

Таблица 6

**Дозовые пороги детерминированных эффектов от внешнего облучения  
[МКРЗ, Публикация № 60]**

Органы и ткани	Эффект	Порог, Зв
Красный костный мозг	Кратковременное угнетение кроветворения	0,5
Лёгкие	Лучевой пульмонит, фиброз	5
Хрусталик глаза	Помутнение Катаракта	0,5 ÷ 2 5
Семенники	Временная олигоспермия	0,15 ÷ 0,5
Яичники	Постоянная стерильность	2,5 ÷ 6
Кожа	Лёгкий ожог	6
	Временное выпадение волос	3
	Облысение	7
Эмбрион, плод	Пороки развития	0,1 у живых
	Умственная отсталость	0,2 ÷ 0,8
	у родившегося ребёнка	

С увеличением дозы тяжесть болезни быстро нарастает. Так, острое облучение человека

- в дозе  $< 0,25$  Гр не приводит к заметным изменениям в организме,
- в дозе  $0,25 \div 0,5$  Гр наблюдаются изменения показателей крови и другие незначительные нарушения,
- в дозе  $0,5 \div 1$  Гр вызывает более значительные изменения показателей крови (снижение числа лейкоцитов, тромбоцитов), изменение показателей обмена, иммунитета, вегетативные нарушения.

Пороговой дозой, вызывающей ОЛБ, принято считать 1 Гр. ОЛБ I, II и III степени тяжести развивается при облучении в дозе  $1 \div 2$  Гр,  $2 \div 4$  Гр и  $4 \div 6$  Гр соответственно.

Радиационные поражения кожи лёгкой, средней и тяжёлой степени тяжести развиваются при местном облучении в дозах  $8 \div 10$  Гр,  $10 \div 20$  Гр и более 20 Гр соответственно.

Эффективность хронического облучения ниже острого и в этих случаях клинические проявления повреждений зависят от мощности дозы. Облучение персонала в дозе 0,05 Зв/год не позволило выявить повреждения с помощью современных методов исследования. Хроническое облучение в дозе 0,1 Зв/год вызывает снижение неспецифической резистентности организма, а в дозе 0,5 Зв/год может привести к развитию хронической лучевой болезни. Биологическая оценка малых доз облучения на фоне действия других вредных факторов встречает большие трудности, ибо биологический эффект облучения не носит специфического характера и может быть приписан действию других агентов.

Биологическое действие радионуклидов зависит от их тропности. По своей токсичности они резко различаются. Особенно высокой токсичностью отличаются альфа-излучающие радионуклиды (таблица 7).

Таблица 7

**Количество радионуклидов, вызывающее 50 % гибель крыс  
в течение 30 суток ( $СД_{50/30}$ )**

Радионуклид	Количество, кБк/г	Радионуклид	Количество, кБк/г
$^{89}\text{Sr}$	166	$^{140}\text{La}$	526
$^{90}\text{Sr}$	55	$^{144}\text{Ce}$	126
$^{90}\text{Y}$	259	$^{147}\text{Pm}$	259
$^{91}\text{Y}$	136	$^{237}\text{Np}$	0,01
$^{95}\text{Nb}$	311	$^{239}\text{Pu}$	2,18
$^{106}\text{Ru}$	136	$^{241}\text{Am}$	4,07
$^{131}\text{I}$	148	$^{244}\text{Cm}$	4,07
$^{137}\text{Cs}$	80	$^{252}\text{Cf}$	0,44
$^{140}\text{Ba}$	74		

Молодые ПЯД характеризуются сравнительно невысокой токсичностью. При поступлении продуктов 2–х-суточного возраста радиационные поражения лёгкой, средней и тяжёлой степени можно ожидать при поступлении мышам — 370, 740, 1500; крысам — 300, 740, 1400; собакам — 100, 200, 300 МБк/кг соответственно. С увеличением возраста ПЯД их токсичность повышается в 2 ÷ 4 раза, что связано с относительным увеличением в их составе долгоживущих радионуклидов. У человека радиационные поражения лёгкой, средней и тяжёлой степени можно ожидать при поступлении ПЯД суточного возраста в количестве 0,05 ÷ 0,2, 0,2 ÷ 0,4 и 0,4 ÷ 0,8 · 10<sup>10</sup> Бк соответственно.

**Стохастические эффекты.** По современным представлениям однократное острое, пролонгированное, дробное, хроническое облучение в дозе, отличной от нуля, может увеличить риск отдалённых стохастических эффектов — рака и генетических нарушений. Из соображений осторожности и радиационной безопасности концепции беспорогового действия радиации и линейной зависимости доза-эффект придерживаются НКРЗ, НКДАР при ООН, МАГАТЭ и НКРЗ РФ. Риск и ожидаемое число смертей от опухолей

и наследственных дефектов в результате облучения приведен в (таблице 8).

Таблица 8

**Риск злокачественных новообразований  
и наследственных дефектов [МКРЗ, Публикация 26]**

<b>Критический орган</b>	<b>Заболевание</b>	<b>Риск, <math>10^{-2} \text{Зв}^{-1}</math></b>	<b>Число случаев, <math>10^{-4} \text{чел.} \cdot \text{Зв}</math></b>
Всё тело, красный костный мозг	Лейкемии	0,2	20
Щитовидная железа	Рак щитовидной железы	0,05	5
Молочная железа	Рак молочной железы	0,25	25
Скелет	Опухоли костной ткани	0,05	5
Лёгкие	Опухоли лёгких	0,2	20
Всё остальные органы и ткани	Опухоли других органов	0,5	50
Все органы и ткани	Все злокачественные опухоли	1,25	125
Половые органы	Наследственные дефекты	0,4	40
Всего		1,65	165

Прямых доказательств справедливости такого подхода нет. Не исключается, что и для стохастических эффектов существует порог и выход опухолей в области малых доз имеет не прямолинейную зависимость, а более сложный вид.

Злокачественные новообразования и генетическая наследственная патология неспецифичны и широко распространены. От спонтанного рака в популяции в 1 млн. человек умирает около 250 тыс. человек с тенденцией дальнейшего роста, а генетические нарушения разной степени выраженности встречаются у 6 ÷ 10 % новорождённых.

Промежуточное положение между соматическими и генетическими повреждениями занимают эмбриотоксические эффекты — пороки развития — последствия облучения плода. Плод весьма чувствителен к облучению в период органогенеза (на 4–12 неделе беременности у человека). Особенно чувствительным является мозг плода (в этот период происходит формирование коры).

## **Гигиеническая регламентация облучения человека**

Главной целью радиационной безопасности является охрана здоровья населения и персонала от вредного действия ИИ путём соблюдения основных принципов и норм радиационной безопасности.

Основные принципы предусматривают:

- не превышение установленного основного дозового предела для всех источников ИИ (принцип нормирования);
- исключение всякого необоснованного облучения (принцип обоснования);

- снижение дозы до возможно низкого уровня (принцип оптимизации).

Дозовые пределы не включают дозу, полученную населением от медицинских обследований и лечения, а также обусловленную естественным фоном. Установлены следующие категории облучаемых лиц (НРБ-99)

- персонал (группы А и Б);
- всё население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Для категории облучаемых лиц установлены три класса нормативов. Основные пределы доз (ПД) приведены в таблице 9

Таблица 9

### Основные пределы доз [НРБ-99]

Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал (группа А)*	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в		
хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв
коже	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

\* Основные пределы доз, как и все остальные уровни облучения персонала группы Б, равны 1/4 значений для персонала группы А. (Группа Б — студенты и учащиеся старше 16 лет, проходящие профессиональное обучение с использованием источников излучения).

Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) — 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) — 70 мЗв.

Допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего облучения), являющиеся производными от основного предела годового поступления (ППП), допустимые среднегодовые объёмные

активности (ДОО), среднегодовые удельные активности (ДУА) приведены для основных радионуклидов в соответствующих разделах справочника.

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками ИИ, вводятся дополнительные ограничения: эквивалентная доза на поверхности нижней части живота не должна превышать 1 мЗв в месяц, а поступление радионуклидов в организм не должно быть более 1/20 предела годового поступления для персонала. В этих условиях эквивалентная доза облучения плода за 2 месяца не выявленной беременности не превысит 1 мЗв.

При хроническом облучении в течение жизни защитные мероприятия становятся обязательными, если годовая поглощённая доза превышает значение, приведённое в таблице 10.

Таблица 10

### Уровни вмешательства при хроническом облучении (НРБ-99)

Орган или ткань	Годовая поглощённая доза, Гр
Гонады	0,3
Хрусталик глаза	0,1
Красный костный мозг	0,4

**Планируемое повышение доз облучения.** Планируемое облучение персонала А выше установленных пределов доз допустимо при ликвидации или предотвращении аварий и может быть разрешено только в случае необходимости спасения людей или предотвращения их облучения. К таким работам допускаются мужчины старше 30 лет при добровольном письменном согласии и информации о возможном риске для здоровья. Облучение в дозе до 100 мЗв/год допускается с разрешения территориальных органов Госсанэпиднадзора, а облучение в эффективной дозе до 200 мЗв/год только с разрешения Федеральных органов Госсанэпиднадзора.

#### Планируемое облучение не допускается

- для лиц, подвергшихся облучению в эффективной дозе 200 мЗв;
- для лиц, имеющих медицинские противопоказания к работам с источниками ИИ.

Лица, подвергшиеся облучению в эффективной дозе, превышающей 100 мЗв в течение года при дальнейшей работе не должны подвергаться облучению в дозе свыше 20 мЗв/год. Облучение в дозе свыше 200 мЗв/год должно рассматриваться как потенциально опасное (НРБ-99).

В случае возникновения радиационной аварии должны быть приняты все меры для восстановления контроля над источниками излучения, максимального снижения доз облучения и количества облучённых лиц населения, ограничения радиоактивного загрязнения окружающей среды, экономических и социальных потерь. Вмешательства должны принести обществу и облучённым лицам больше пользы, чем вреда. Форма вмешательства определяется масштабами аварии. Если дозы облучения за первые 2

суток достигнут возможных детерминированных эффектов (таблица 11), необходимо срочное вмешательство (укрытие, эвакуация).

Таблица 11

**Прогнозируемые уровни облучения, при которых необходимо срочное вмешательство (НРБ-99)**

Орган или ткань	Поглощённая доза в органе или ткани за 2 суток, Гр
Всё тело	1
Лёгкие	6
Кожа	3
Щитовидная железа	5
Хрусталик глаза	2
Гонады	3
Плод	0,1

Для персонала значения дозовых коэффициентов (Зв/Бк), предела годового поступления поступления с воздухом (ППП Бк/год) и допустимой среднегодовой объёмной активности в воздухе отдельных радионуклидов (ДОО Бк/м<sup>3</sup>) приведены в НРБ-99 [7] (Приложение П-1). Минимально значимая удельная активность (МЗУА) и активность в помещении или на рабочем месте (МЗА) для радионуклидов приведены в Приложении П-4 НРБ-99.

Для населения значения дозовых коэффициентов (Зв/Бк), предела годового поступления поступления с воздухом и пищей (ППП Бк/год) и допустимой среднегодовой объёмной активности во вдыхаемом воздухе (ДОО Бк/м<sup>3</sup>) и уровни вмешательства (УА Бк/кг) для отдельных радионуклидов приведены в Приложение П-2 НРБ-99. Значения, соответствующие рекомендациям МКРЗ [8, 9, 10], для отдельных радионуклидов приведены в данном Справочнике на с. ....

## Список литературы

- [1] Василенко И. Я. *Токсикология продуктов ядерного деления*. — М.: Медицина, 1999, 200 с.
- [2] О. И. Василенко. *“Радиационная экология.”* — М.: Медицина, 2004 — 216 с.
- [3] Collins C. B. et al.  *$\gamma$ -emission from the 31-yr Isomer of <sup>178</sup>Hf Induced by X-Ray Irradiation.* // Phys. Rev. C. **61**, 5, 054305/1-6 (2000); Collins C. B. et al. *Tunable synchrotron radiation used to induce  $\gamma$ -emission from the 31 year isomer of <sup>178</sup>Hf.* // Europhys. Lett., **57**, 5, 677-682 (2002).
- [4] Ahmad I. et al. *Search for X-ray Induced Acceleration of the Decay of the 31-yr Isomer of <sup>178</sup>Hf Using Synchrotron Radiation.* // Phys. Rev. Lett. **87**, 072503/1-4 (2001).

- [5] Василенко И. Я., Василенко О. И. *“Гафниева бомба — ядерное оружие нового поколения (радиационно-гигиенические аспекты).”* // Проблемы глобальной безопасности. 2003, N 14, С. 12–14.
- [6] *“Радионуклидное загрязнение окружающей среды и здоровье населения.”* Под ред. Василенко И. Я., Булдакова Л. А. М.: Медицина, 2004 — 400 с.
- [7] *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы.* — М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999, 116 с.
- [8] *Пределы поступления радионуклидов для работающих с радиоактивными излучениями.* Публикация № 30 МКРЗ. — М.: Энергоатомиздат, 1984, 94 с.
- [9] *Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите, основанные на рекомендациях 1990.* Публикации N 60. Ч. 1. — МКРЗ. Публикация N 61 — М.: Энергоатомиздат, 1994. 192 с.
- [10] *Радиационная защита.* Публикация № 26 МКРЗ. — М.: Атомиздат, 1978, 88 с.