

Основы радиационной безопасности в медицине Сообщение 1. Основные положения

Б.Я. Наркевич

ГУ «Российский онкологический научный центр им. Н.Н. Блохина РАМН», г. Москва
Институт медицинской физики и инженерии, г. Москва

Значительный объем представляемого материала обуславливает разделение его на 4 последовательно публикуемые сообщения:

1. Основные положения.
2. Ядерная медицина (радионуклидная диагностика и радионуклидная терапия).
3. Лучевая терапия (дистанционное и контактное облучение закрытыми источниками ионизирующих излучений).
4. Рентгенодиагностика и интервенционная радиология.

Медицинская радиология основана на широком применении различных источников ионизирующих излучений в различных технологиях диагностики и лечения. При этом воздействию излучения подвергаются не только пациенты, но и персонал, отдельно взятое население и в некоторых ситуациях — окружающая среда. Вполне очевидно, что такое применение должно обеспечивать как достижение поставленных медицинских целей для пациентов (получение достоверной диагностической информации или клинически выраженного терапевтического эффекта), так и отсутствие какого-либо ущерба для здоровья при профессиональном облучении персонала и вынужденном облучении некоторого населения. Для этого необходимо проведение целого комплекса мер по радиационной защите всех лиц, облучаемых при медицинских процедурах.

Иначе говоря, должны быть обеспечены необходимые меры *радиационной безопасности* (РБ) этих лиц. При этом под РБ понимают комплекс научно обоснованных мероприятий по обеспечению адекватной защиты от воздействия ионизирующего излучения, включа-

ющий в себя: критерии оценки опасности ионизирующего излучения для пациентов, персонала, населения и окружающей среды; способы и средства оценки радиационной обстановки, ее контроля и прогнозирования; проектные, технические санитарно-гигиенические и организационные мероприятия, обеспечивающие безопасные для здоровья условия использования ионизирующего излучения в медицине.

В основе всего комплекса мероприятий по обеспечению РБ лежит *нормирование* облучения, то есть регламентация воздействия ионизирующих излучений с целью минимизации вредных последствий облучения для здоровья человека. Во многих публикациях уже освещались радиобиологические и медицинские аспекты вредного воздействия излучения. Однако до сих пор нет единой точки зрения на безопасные для здоровья уровни облучения и тем более на положительные эффекты минимальных уровней облучения. Тем не менее указанная регламентация необходима даже в этих неоднозначных условиях. Это обусловлено, во-первых, неизбежным пребыванием всего живого мира, в том числе и человека, в условиях постоянного воздействия радиационного фона и, во-вторых, постоянным расширением радиационных контактов человека в связи с бурным техническим прогрессом, особенно в современной медицине.

Поэтому ионизирующие излучения, как и любые другие агенты внешней среды нерадиационной природы, требуют разумного нормирования и узаконенной системы регламентации. Данная система должна быть основана на научно обоснованных принципах нормирования и достоверных радиобиологических и ра-

диационно-эпидемиологических данных. К ним следует отнести, прежде всего, дозиметрические основы облучения, данные по фоновому облучению человека и основные принципы нормирования облучения.

Дозиметрические основы процессов облучения

Поглощенная доза. Основной физической величиной, определяющей степень радиационного воздействия, является поглощенная доза ионизирующего излучения D . Это есть отношение средней энергии $\Delta\bar{W}$, переданной излучением веществу в элементарном объеме массой Δm :

$$D = \frac{\Delta\bar{W}}{\Delta m} \quad (1)$$

Допускается вместо термина “поглощенная доза излучения” использовать его краткую форму “доза излучения”. При оценке уровня и эффектов радиационного воздействия на различные объекты допускается также использование термина “доза облучения”.

Единицей поглощенной дозы в международной системе единиц СИ является *грей* (Гр), который равен такой поглощенной дозе излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения, равная 1 Дж. Внесистемной единицей поглощенной дозы является *рад*, равный поглощенной дозе, при которой веществу массой 1 г передается энергия 100 эрг. Таким образом, 1 Гр = 100 рад = 100 сГр, или 1 рад = 1 сГр = 10 мГр. Хотя употребление дольной приставки *санти-* не рекомендуется, единицы сГр часто используются в дозиметрическом планировании терапевтического облучения и в клинической дозиметрии из-за устоявшейся привычки радиологов к единицам *радам*.

Уровень воздействия излучения на биологические объекты принято характеризовать максимальным значением дозы в тканях, органах и всем теле. Слово “максимальное” обычно для краткости опускают, и тогда под тканевыми дозами понимаются их максимальные значения в соответствующих тканях. Тогда *поглощенная доза в органе или ткани* (D_T) есть средняя поглощенная доза в определенном органе или ткани тела человека.

Экспозиционная доза. Для оценки полей фотонного излучения в воздухе одним из первых в дозиметрии было введено понятие “экспозиционная доза”. Она выражает энергию

фотонного излучения, преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы атмосферного воздуха. Выбор воздуха как среды для оценки уровней облучения был обусловлен доступностью воздуха для измерений в нем степени ионизации, а также близостью его эффективного атомного номера (см. ниже) к эффективному атомному номеру мягких биологических тканей.

Экспозиционная доза X есть количественная характеристика фотонного излучения и представляет собой отношение суммарного электрического заряда ΔQ всех ионов одного знака, образованных в объеме сухого атмосферного воздуха массой Δm :

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \quad (2)$$

Понятие “экспозиционная доза” можно применять только для фотонного излучения с энергией до 3 МэВ. В отличие от поглощенной дозы, которая в значительной степени характеризует уровень облучения данного объекта и в меньшей степени – сам источник излучения, экспозиционная доза больше используется для описания поля излучения от данного источника и лишь косвенно характеризует дозу облучения объекта, особенно при отсутствии его воздухоэквивалентности.

Единица экспозиционной дозы в СИ – *кулон на килограмм* (Кл/кг). Она соответствует такой экспозиционной дозе, при которой все вторичные электроны и позитроны, освобожденные фотонами в объеме воздуха массой 1 кг, производят ионы с электрическим зарядом 1 Кл каждого знака. Однако на практике гораздо чаще используют внесистемную единицу экспозиционной дозы – *рентген* (Р), при которой в 1 см³ воздуха образуются ионы с одной электростатической единицей количества электричества каждого знака. Отметим, что масса 1 см³ при нормальных условиях (температура 0 °С и давление 760 мм рт. ст.) составляет 0,001293 г. Эту единицу особенно часто применяют при оценке естественного радиационного фона и для описания полей излучения при радиационных авариях, тогда как в медицинской радиологии экспозиционная доза практически не используется.

В условиях электронного равновесия и пренебрежения затратами энергии на образование тормозного излучения (эта поправка не превышает 1%) энергетические эквиваленты воздушной кермы и экспозиционной дозы одинаковы. Полезно заметить, что в таких ус-

ловиях экспозиционной дозе 1 Кл/кг соответствует поглощенная доза 33,85 Гр в воздухе или 36,9 Гр в биологической ткани, а внесистемной единице 1 Р соответствует поглощенная доза 8,73 мГр (0,873 рад) в воздухе или 9,50 мГр (0,950 рад) в биологической ткани. Таким образом, с погрешностью до 5% экспозиционную дозу в рентгенах и поглощенную дозу в радах (сантигреях) можно считать совпадающими.

Эквивалентная доза. Для разных видов ионизирующего излучения биологический эффект при одинаковой поглощенной дозе оказывается различным. Например, в многочисленных экспериментах было установлено, что при одинаковой поглощенной дозе альфа-излучение гораздо опаснее, чем бета-излучение и фотоны.

Поэтому для упорядочивания оценок биологического эффекта потребовалось ввести новую характеристику дозы облучения — *относительную биологическую эффективность* (ОБЭ) излучения. При этом под ОБЭ понимают отношение поглощенной дозы образцового рентгеновского излучения (при напряжении на рентгеновской трубке 200 кВп), вызывающей определенный биологический эффект, к поглощенной дозе рассматриваемого излучения, вызывающей точно такой же биологический эффект.

Регламентированные значения ОБЭ, установленные Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) и Научной комиссией по радиационной защите России (НКРЗ РФ) и приведенные в табл. 1, ранее называли *коэффициентами качества излучения*. В настоящее время, в соответствии с рекомендациями МКРЗ, их называют *взвешивающими коэффициентами для отдельных видов излучения W_R при расчете эквивалентной дозы*.

Важно подчеркнуть, что приведенные в табл. 1 значения коэффициентов качества излучения применимы только для ситуаций, связанных с острым (радионуклидная диагностика) и хроническим (радиационная гигиена) облучением человека в так называемых малых дозах, которыми по договоренности считают поглощенные дозы, не превышающие 100 мГр. При больших дозах обычно используют поглощенную дозу, выраженную в Гр, а также соответствующие рассматриваемым видам излучения коэффициенты ОБЭ, которые существенно меньше взвешивающих коэффициентов, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Взвешивающие коэффициенты W_R для различных видов излучения

Вид излучения	W_R , Зв /Гр
Фотонное излучение любых энергий	1
Электроны, позитроны, бета-излучение	1
Нейтроны с энергией менее 10 кэВ	5
от 10 кэВ до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 МэВ до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
Альфа-излучение с энергией более 2 МэВ	20
Тяжелые ядра отдачи, осколки деления ядер	20

Эквивалентная доза ионизирующего излучения H_{TR} — произведение поглощенной дозы DTR излучения типа R в органе или ткани T на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения W_R :

$$H_{TR} = W_R D_{TR}. \quad (3)$$

При воздействии различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз этих видов излучения:

$$H_T = \sum_R H_{TR} = \sum_R W_R D_{TR}. \quad (4)$$

Единицей эквивалентной дозы в СИ является *зиверт* (Зв). 1 Зв равен эквивалентной дозе любого вида излучения в биологической ткани, которое создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр образцового рентгеновского излучения с граничной энергией 200 кэВ.

Внесистемная единица эквивалентной дозы — *бэр* (биологический эквивалент рада). При этом 1 Зв = 100 бэр.

Эффективная доза. Разные органы и ткани имеют различную чувствительность к излучению. Известно, например, что при одинаковой эквивалентной дозе облучения риск возникновения рака легких более высок, чем риск возникновения рака щитовидной железы. Поэтому для учета различий в вероятности возникновения подобных отдаленных последствий облучения была введена в практику рентгенодиагностики, ядерной медицины и радиационной безопасности еще одна дозовая характеристика — *эффективная доза* облучения.

Эффективная доза E представляет собой сумму произведений эквивалентных доз в жизненно важных органах и тканях на взвешивающие коэффициенты, но уже не для вида излучения, а для вида облучаемой ткани:

$$E = \sum_T W_T H_T = \sum_{T,R} W_T W_R D_{TR}, \quad (5)$$

где W_T – взвешивающий коэффициент для органа или ткани T , а W_R – взвешивающий коэффициент для излучения R . Эти коэффициенты определяют весовые вклады каждого органа или ткани в риск неблагоприятных последствий при равномерном облучении, то есть, когда эквивалентная доза в каждом органе или ткани одна и та же: $H_T = H$ и, следовательно, $H = E$. Установленные МКРЗ взвешивающие коэффициенты W_T для тканей и органов при расчете эффективной дозы E приведены в табл. 2. Единицы эффективной дозы (системная и внесистемная) совпадают с единицами эквивалентной дозы, так как взвешивающие коэффициенты W_T безразмерны.

Из табл. 2 видно, что наибольшим взвешивающим коэффициентом риска отдаленных последствий обладают гонады. Это связано с тем, что при их облучении в половых клетках могут возникнуть не только соматические, но и генетические эффекты, то есть возрастает вероятность наследственных заболеваний при больших дозах воздействия.

В формулах (4) и (5) коэффициенты W_R и W_T нормированы на 1:

$$\sum_R W_R = \sum_T W_T = 1. \quad (6)$$

Фоновое облучение человека

Каждый человек постоянно подвергается воздействию радиационного фона от окружающей среды и антропогенных источников излучения. К этому воздействию человечество за миллионы лет своего существования полностью адаптировалось, в связи с чем при регламентации облучения человека разумно исходить именно из уровня фонового радиационного воздействия. При этом под радиационным фоном понимают ионизирующее излучение земного и космического происхождения, постоянно воздействующее на человека. Различают естественный, технологически измененный естественный и искусственный радиационный фоны.

Естественный радиационный фон обусловлен излучением природных радионуклидов Земли и космическим излучением.

Таблица 2. Взвешивающие коэффициенты W_T для различных биологических тканей и органов

Тип тканей	W_T
Гонады	0,20
Красный костный мозг	0,12
Толстая кишка	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Молочная железа	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Остальное (еще 10 органов и тканей)	0,05

Технологически измененный естественный радиационный фон формируется за счет природных источников ионизирующего излучения, прежде всего излучения естественных радионуклидов, извлеченных из недр Земли вместе с полезными ископаемыми или содержащихся в строительных материалах.

Искусственный радиационный фон обусловлен глобальным загрязнением окружающей среды искусственными радионуклидами после испытаний ядерного оружия в 50-е – 60-е годы, частично за счет выбросов предприятиями ядерного цикла (в том числе атомными электростанциями) радиоактивных благородных газов, углерода и трития, а также локальными радиоактивными загрязнениями окружающей среды в результате крупных радиационных аварий, особенно от аварии на Чернобыльской АЭС.

Основная часть воздействия ионизирующего излучения на население Земли приходится на естественные источники радиации. При этом полностью избежать облучения большинства из них принципиально невозможно, и лишь в некоторых случаях уровень фонового облучения можно несколько снизить.

Естественный радиационный фон. Более 80% годовой эффективной дозы, получаемой населением от естественных источников, приходится на внутреннее облучение от естественных радионуклидов, попадающих в организм человека с пищей, водой и воздухом. Остальные 20% обусловлены космическим излучением.

ем, главным образом, посредством внешнего облучения человека.

Основные естественные радионуклиды, встречающиеся на Земле, — ^{40}K , ^{87}Rb и члены 2 радиоактивных семейств, берущих начало от ^{238}U и ^{232}Th и находящихся в составе Земли с самого ее образования. Из них наибольший вклад во внутреннее облучение вносит газ радон ^{222}Rn (период полураспада 3,8 суток, испускает альфа-частицы с энергией 5,5 МэВ), возникающий в цепочке распада ^{238}U . При распаде ^{232}Th возникает газ торон ^{220}Rn (Tn) (период полураспада 55 с, энергия альфа-частиц 6,3 МэВ), доза внутреннего облучения от которого примерно в 20 раз меньше, чем от радона. Газы радон и торон относятся к благородным, которые удаляются из легких с такой же скоростью, с какой они туда и поступают, поэтому уровень облучения от собственно радона и торона незначителен. Однако дочерние продукты распада радона и торона осаждаются на находящиеся в атмосфере аэрозольные пылевые частицы, которые, в свою очередь, оседают на слизистых оболочках респираторных путей человека. Таким образом, когда говорят об облучении человека газом радоном, на самом деле имеют в виду облучение альфа- и бета-частицами от сравнительно короткоживущих аэрозольных продуктов его радиоактивного распада ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi .

Согласно международным оценкам, радон обуславливает 75% годовой индивидуальной эффективной дозы, получаемой каждым человеком от земных источников излучения, и примерно половину этой дозы от всех естественных источников.

Основную часть дозы фонового облучения от радона человек получает, находясь в закрытом, непроветриваемом помещении. В него радон поступает, просачиваясь через фундамент и пол из грунта и, в меньшей степени, высвобождаясь из строительных материалов, использованных в конструкции дома. В результате в помещении могут возникать довольно высокие уровни внутреннего облучения, особенно если дом стоит на грунте с повышенным содержанием радионуклидов (граниты, базальты, гнейсы) или при его постройке были использованы материалы с повышенной радиоактивностью, например фосфогипс. Герметизация помещений с целью утепления, особенно зимой, усугубляет ситуацию, так как из-за сниженной вентиляции выход газа из помещения затрудняется.

Доля домов с высокой концентрацией радона и, следовательно, его дочерних продуктов (от 1 до 10 кБк/м³) лежит в пределах 0,001–0,1% в разных странах. Однако 75% коллективной эффективной дозы, получаемой населением за счет радона, складывается из доз облучения в домах с объемной активностью менее 0,1 кБк/м³. Это обуславливает эффективную дозу облучения от радона около 1 мЗв/г, то есть около половины всей фоновой годовой дозы, получаемой человеком в среднем от всех естественных источников излучения.

По своему вкладу в фоновое облучение человека космическое излучение занимает 3-е место после продуктов распада уранового и ториевого рядов. Население, постоянно проживающее в местностях на уровне моря или несколько выше, получает в среднем годовую эффективную дозу космического излучения около 0,3 мЗв. Для людей, живущих на высоте выше 2 км над уровнем моря, это значение в несколько раз больше. В частности, мощность эквивалентной дозы на высоте 2 км составляет 0,1 мкЗв/ч, на высоте 4 км — 0,2 мкЗв/ч, а при полетах на пассажирских самолетах магистральных авиалиний (высота 10–12 км) она достигает 5 мкЗв/ч. При трансатлантических перелетах экипаж и пассажиры получают в среднем дозу до 50 мкЗв за один полет.

Далее, по своему вкладу в фоновое облучение, находятся ^{40}K и в меньшей степени — ^{87}Rb . Калий очень широко распространен в природе. Содержание радиоактивного изотопа ^{40}K в природной смеси изотопов калия составляет всего 0,0118% по массе. Всего в организме человека со стандартной массой тела 70 кг содержится в среднем около 4 кБк ^{40}K , что обуславливает дозу примерно 0,3 мЗв/г.

В табл. 3 приведены усредненные значения годовых эффективных доз от природных источников излучения. Можно видеть, что годовая эффективная доза фонового облучения от естественных источников составляет в среднем 2 мЗв.

Некоторые группы населения (около 3%) получают дозы 1 мЗв/г, а 1,5% более 1,4 мЗв/г. Есть, однако, территории, где уровни естественной земной радиации намного больше, достигая нескольких десятков мЗв/г, вплоть до 200–400 мЗв/г.

При этом необходимо отметить, что у населения этих районов достоверно отсутствует какое-либо превышение показателей онколо-

Таблица 3. Годовые эффективные дозы от природных источников излучения в регионах с нормальным радиационным фоном, мкЗв

Источник излучения	Внешнее	Внутреннее	Всего
Космическое излучение:			
прямо ионизирующая компонента	280	—	280
косвенно ионизирующая компонента (нейтроны)	21	—	21
Космогенные радионуклиды ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na	—	15	15
Естественные земные радионуклиды:			
^{40}K	120	180	300
^{87}Rb	—	6	6
Ряд радиоактивного распада ^{238}U :			
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U}$	—	10	10
^{230}Th	—	7	7
^{226}Ra	90	7	97
$^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{214}\text{Po}$	—	800	800
$^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Po}$	—	130	130
Ряд радиоактивного распада ^{232}Th :			
^{232}Th	—	3	3
$^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{224}\text{Ra}$	140	13	153
$^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$	—	170	170
Сумма (округленно), мкЗв	650	1340	2000

гической заболеваемости по сравнению с населением регионов с нормальным естественным радиационным фоном. Мало того, в последнее время были опубликованы статистически достоверные результаты массовых радиационно-эпидемиологических исследований в разных странах, согласно которым заболеваемость раком легкого у жителей домов с повышенным содержанием радона в воздухе помещений была существенно ниже таковой у обитателей домов с нормальным содержанием радона. Дополнительным доказательством благотворного воздействия радона на организм человека является успешное функционирование целого ряда курортов с радоновыми источниками минеральной воды, целебное действие которых объясняется стимуляцией центров неспецифического иммунитета, расположенных на коже.

Технологически измененный естественный радиационный фон. Одним из наиболее важных источников подобного фонового облучения является сжигание каменного угля с целью получения электроэнергии, а также обогрева жилых и промышленных помещений. При сжигании угля в атмосферу выбрасывается большое количество аэрозольных частиц, в которых содержатся природные радионуклиды, особенно ^{40}K , ^{238}U (и, следовательно, не улавливаемый очистными устрой-

ствами радон), а также ^{232}Th . Радионуклиды, содержащиеся в несгоревшей минеральной фракции, распределяются между шлаком и летучей золой. Так как органическая компонента угля выгорает, концентрация природных радионуклидов в золе и шлаке становится выше, чем в самом угле. В частности, выброс радона составляет около 60 ГБк на каждый гигаваатт произведенной на ТЭЦ электроэнергии. При этом эквивалентные дозы облучения костных тканей у людей, которые проживают в районах расположения теплоэлектростанций, работающих на сжигании угля, составляют в среднем 1,2 мЗв на 1 ГВт выработанной электроэнергии, а эффективная доза около 5,3 мкЗв, что в 5–40 раз выше, чем для людей, проживающих в непосредственной близости к АЭС.

Фосфатные руды широко используют для производства фосфорных удобрений, а побочные продукты фосфатной промышленности применяют для производства строительных материалов. В фосфорных удобрениях содержатся в разной концентрации (от 30 до 5900 Бк/кг) те же радионуклиды, что и в продуктах сгорания угля.

В строительных материалах как природного происхождения (гранит, туф, бетон с глинистыми сланцами и т. п.), так и промышленного производства (фосфогипс, шлак силиката

кальция, шлаковый наполнитель и т. д.) содержатся ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th и другие природные радионуклиды в концентрациях от 5 до 2200 Бк/кг. Заметные уровни фонового облучения имеют место при полетах на самолетах и в космическом пространстве, о чем уже говорилось выше.

Среди предметов широкого потребления часто встречаются изделия либо содержащие радиоактивные вещества, либо генерирующие ионизирующее излучение. Все эти товары могут быть условно разделены на 5 больших категорий: изделия с радиолюминесцентными составами (часы со светящимся циферблатом, люминесцирующие индикаторы и указатели и т.д.); электронная аппаратура (телевизоры, компьютерные мониторы с электронно-лучевыми трубками, ртутные лампы высокого давления, экраны радиолокаторов и т. д.); антистатические устройства; детекторы дыма и противопожарные сигнализаторы; изделия из стекла или керамики, содержащие уран или торий.

Основной вклад в облучение от технологически измененного естественного радиационного фона приходится на строительные материалы в домостроении, и он составляет среднегодовую эффективную дозу 1,05 мЗв, то есть примерно половину дозы от естественного фона.

Искусственный радиационный фон. Испытания ядерного оружия в атмосфере являются источником дополнительного облучения всего населения земного шара. Они были начаты в 1945 г., а наиболее интенсивные испытания проводились в 1954–1958 и 1961–1962 гг. При этих взрывах образовалось большое количество радионуклидов, которые обусловили выпадение радиоактивных осадков, главным образом, в полярных и экваториальных районах Северного полушария Земли. Вклад в ожидаемую коллективную эффективную дозу облучения населения от ядерных взрывов в атмосфере, превышающий 1%, дают только каждый из 4 радионуклидов: ^{14}C , ^{137}Cs , ^{95}Zr и ^{90}Sr . При этом дозы от 3 последних радионуклидов фактически уже сформированы, тогда как доза от ^{14}C продолжает еще формироваться из-за очень продолжительного периода полураспада (5730 лет). В целом средняя годовая индивидуальная эффективная доза, обусловленная глобальными радиоактивными выпадениями от испытаний ядерного оружия, составляет всего 230 мкЗв/г, то есть около 2% от всей дозы фонового облучения.

Источником облучения, вокруг которого ведутся интенсивные дискуссии, особенно в средствах массовой информации, являются атомные электростанции (АЭС). В настоящее время их вклад в суммарное облучение населения пренебрежимо мал, так как при нормальной работе ядерных установок выбросы радионуклидов в окружающую среду незначительны. Однако печальный опыт крупных радиационных аварий показывает, что при таких авариях в атмосферу поступает значительная радиоактивность. Поэтому теперь особое внимание уделяется максимальному обеспечению радиационной безопасности на действующих реакторах, а также при проектировании и строительстве новых АЭС. Самые большие дозы облучения на объектах атомной промышленности получают работающие на них люди. Наиболее типичное значение среднегодовой коллективной эффективной дозы профессионального облучения составляет 10 человек \times 3зв на 1 ГВт произведенной электроэнергии в год. Среднегодовая индивидуальная эффективная доза, обусловленная выбросами АЭС в штатном режиме работы, равна примерно 0,5 мкЗв/г. Такая величина значительно меньше территориальных и сезонных флюктуаций естественного радиационного фона.

Особое место в формировании коллективной дозы техногенного облучения населения занимают крупные радиационные аварии. В России произошло 3 подобные аварии:

1) регулярные сбросы жидких радиоактивных отходов в р. Теча с крупнейшего радиохимического комбината “Маяк” (Челябинская обл.) в 40-х – 50-х годах прошлого века;

2) взрыв емкости-хранилища радиоактивных отходов на том же комбинате в 1957 г. с радиоактивным загрязнением большой территории Уральского региона (Восточно-уральский радиоактивный след – ВУРС);

3) авария на Чернобыльской АЭС с массивным загрязнением больших территорий Белоруссии, Украины и России.

Международной шкалой комплексных оценок, учитывающих количество выброшенных в атмосферу радионуклидов, предусмотрено 7 категорий радиационных аварий. В соответствии с этой шкалой 2 и 3 из этих российских аварий относятся к 7, наиболее тяжелой, категории, а 1 авария – к 6 категории. Соответственно, при этих авариях было сброшено 1017 “долгоживущих” радионуклидов в воду, а также 7×10^{17} и 10^{19} Бк – в атмосферу. Меди-

цинские последствия всех 3 аварий существенно различаются, так как их проявление зависит, кроме суммарного количества выброшенных в окружающую среду радионуклидов, от продолжительности выбросов и численности населения, которая, в свою очередь, пропорциональна площади загрязнения. Поэтому с увеличением территории загрязнения и, соответственно, численности проживающего на ней населения сильно возрастает коллективная эффективная доза.

Однако индивидуальные дозы, получаемые населением, следуют другой, противоположной закономерности, так как уровни радиационного воздействия обратно пропорциональны площади загрязнения и численности затронутого им населения. Действительно, в результате загрязнения р. Теча индивидуальные дозы у жителей прибрежных сел достигали 5 Зв, после взрыва емкости с радиоактивными отходами в 7 раз большей активности дозы облучения населения в ВУРСе оказались в 10 раз меньшими – 0,5 Зв, а после взрыва чернобыльского реактора при выбросе на 2 порядка большей активности средние индивидуальные дозы были еще меньше – 0,2 Зв.

Особенность реакторных аварий состоит в выбросе короткоживущих радионуклидов, в частности большого количества радиоизотопов йода. Отсюда и массивное локальное внутреннее облучение щитовидной железы, и, как следствие, рак этого органа.

Принято различать 3 категории лиц, подвергшихся аварийному облучению:

1) “аварийный” персонал, работавший в первый день аварии (ликвидаторы первой волны), и лица, участвовавшие в дальнейшей ликвидации последствий аварии (ликвидаторы второй волны);

2) жители, эвакуированные из значительно загрязненных районов;

3) население, проживающее на остальных загрязненных территориях.

Из общего числа сотрудников Чернобыльской АЭС 237 прошли первоначальное обследование с целью диагностирования острой лучевой болезни. В последующем данный диагноз был подтвержден у 134 пациентов, получивших большие дозы облучения – от 1 до 16 Гр. Из них 28 наиболее тяжелых, страдавших комбинированными радиационными и ожоговыми поражениями, несмотря на активное лечение, умерло в первые 4 мес после аварии; впоследствии от разных причин умерло еще 15 человек.

Средние эффективные дозы гамма-облучения ликвидаторов в 1986–1989 гг. составили 100 мЗв при разбросе индивидуальных доз от 10 мЗв до 500 мЗв, а для населения загрязненных районов они составили около 10 мЗв.

Наиболее серьезным последствием Чернобыльской аварии является рак щитовидной железы у детей, обусловленный выброшенными в атмосферу радиоактивными изотопами йода. К настоящему времени среди лиц, которым во время аварийного облучения не исполнилось 18 лет, зарегистрировано более 1800 случаев рака щитовидной железы. Это число касается популяции 9 млн человек в Украине, 1,3 млн – в Белоруссии и 0,3 млн – в России. Данное увеличение заболеваемости по сравнению с доаварийным показателем во всех 3 странах было примерно четырехкратным. В подавляющем большинстве случаев имел место папиллярный рак щитовидной железы, который в прогностическом отношении относится к наиболее благоприятным. Повышение заболеваемости раком щитовидной железы было обусловлено такими факторами, как детский возраст на момент облучения, дефицит йода в пищевом рационе, а также (и может быть, главным образом) отсутствие или запоздалая и плохо организованная йодная профилактика вследствие низкой радиологической подготовки местных медицинских работников.

После тщательных радиационно-эпидемиологических исследований, проведенных на международном уровне, было достоверно установлено, что хотя лейкозы являются наиболее ранним радиационно-индуцированным канцерогенным эффектом и их роста не обнаружено ни у ликвидаторов, ни среди жителей загрязненных местностей. Тот же вывод был сделан и относительно сфидных форм опухолей, в том числе рака молочной железы, легких, желудка, толстой кишки и миеломной болезни.

Однако при практическом отсутствии радиологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС реально существуют соматические расстройства здоровья нерадиационной природы. Авария привела к долговременным изменениям в образе жизни людей, проживавших в загрязненных районах, поскольку предпринятые властями меры по снижению уровней облучения включали переселение, изменения в поставках продовольствия и ограничения в трудовой деятельности и бытовых условиях населения. Социальные и

экономические лишения людей, как оставшихся в загрязненных районах, так и переселенных в незагрязненные местности, усиливали их реакцию на стрессорные факторы, связанные с аварией. И среди ликвидаторов имеется повышение частоты как соматических заболеваний, так и частоты несчастных случаев (травм, дорожных происшествий, самоубийств, алкогольных отравлений, потребления наркотиков).

Но при этом нарастание психосоматических заболеваний никак не коррелировало с уровнем загрязнения и полученными дозами облучения. В частности, гематологическое исследование 120 тыс. детей, проведенное по специальной международной программе в 5 научных центрах Белоруссии, России и Украины, показало, что частота гематологических нарушений не зависела от уровня загрязнения местности ^{137}Cs и ^{90}Sr . Авторитетные международные эксперты пришли к выводу, что совокупный вред от изменения условий труда и быта для населения, проживавшего на загрязненных территориях и переселенного оттуда вскоре после аварии, заведомо превысил прогнозируемый уровень радиационного ущерба, который имел бы место при дальнейшем проживании на этих территориях, при полной неэффективности огромных материальных и финансовых затрат на переселение и трудоустройство.

Наконец, особым видом искусственного фонового облучения населения являются медицинские радиологические процедуры — рентгенодиагностика, ядерная медицина и лучевая терапия. Лучевая нагрузка здесь сопряжена либо с получением ценной для здоровья пациента диагностической информации, либо с непосредственным лечебным воздействием в отличие от других видов радиационного фонового облучения. Конкретные дозы медицинского облучения существенно зависят от типа проводимой радиологической процедуры, типа и рабочих характеристик используемых аппаратов, оборудования и радиофармпрепаратов, применяемых средств и технологий радиационной защиты, квалификации персонала и других факторов. Если рассчитывать дозы облучения на все население, то необходимо также учитывать частоту выполнения тех или иных радиологических процедур. Для всего населения России среднегодовая эффективная доза, получаемая при рентгенодиагностических исследованиях, составляет 1,4 мЗв, при ядерно-медицинских процедурах — 0,2 мЗв и

при лучевой терапии — 0,1 мЗв. Безусловно, реальные дозы локального и общего облучения каждого конкретного пациента существенно выше этих значений, особенно при лучевой терапии, но при усреднении по всему населению получаются именно такие показатели.

Таким образом, средняя для населения России годовая индивидуальная эффективная доза за счет всех источников фонового облучения составляет примерно 4,5 мЗв, из них за счет естественного фона 2 мЗв, за счет технологически измененного естественного фона 1 мЗв и за счет искусственного радиационного фона, включая аварийное и медицинское облучение, примерно 1,5 мЗв.

Основные принципы нормирования облучения

Как уже отмечалось, в основе нормирования радиационного воздействия лежит концепция ограничения дозы облучения человека, базирующаяся на приемлемом радиационном риске и на данных по фоновому облучению человека. При этом исходят из того, что меры радиационной безопасности, необходимые для обеспечения защиты как персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения, так и населения в целом, будут достаточны, чтобы одновременно защитить и все другие виды живых организмов. Иначе говоря, предполагается, что надежная защита человека от облучения гарантирует такую же защиту для отдельных биосфер и биосферы в целом. В настоящее время эта концепция уточняется в соответствии с новыми рекомендациями МКРЗ. Тем не менее в рамках действующей версии концепции нормирование облучения человека осуществляется в нашей стране по следующим 3 основным принципам:

Принцип нормирования — непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения человека от всех источников излучения.

Принцип обоснования — запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества в целом польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением.

Принцип оптимизации — поддержание на возможно низком и достижимом уровне, с учетом экономических и социальных факторов, индивидуальных доз облучения и количества облучаемых людей.

Все эти принципы распространяются на любое облучение человека, но их практическая реализация имеет свою специфику для каждого из следующих видов облучения:

- в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников излучения;
- при радиационных авариях;
- при облучении от природных источников излучения;
- при облучении в медицинских целях.

В официальных рекомендациях МКРЗ (Публикация 60) установлены следующие, во многом сходные с принятыми в нашей стране, 3 основных принципа регламентации лучевых нагрузок:

1. Эффективная доза облучения отдельных лиц не должна превышать предела, рекомендованного МКРЗ для конкретных условий облучения.

2. Никакой вид использования источников ионизирующих излучений не должен вводиться в практику, если оно не приносит реальной пользы, то есть необходима оправданность практической деятельности с этими источниками.

3. Все дозы облучения должны поддерживаться на таких низких уровнях, какие только можно разумно достигнуть с учетом экономических и социальных факторов, то есть необходима оптимизация радиационной защиты.

Третий принцип в зарубежной литературе и практике известен как принцип *as low as reasonable achievable (ALARA)*. Он следует из признания беспороговой зависимости дозы – эффект в области малых доз, характерных для реальных уровней облучения персонала и населения. Фактически он означает приемлемость оправданного риска от облучения в малых дозах.

Для количественной реализации второго и третьего принципов МКРЗ рекомендует использовать концепцию максимизации отношения *польза/затраты*. Согласно этой концепции, принимаемые меры радиационной безопасности следует считать оптимальными, если они приводят к максимальному значению чистой пользы. Однако практическое применение этой концепции очень часто наталкивается на значительные, а иногда – принципиально непреодолимые, трудности. Если затраты можно достаточно легко просчитать в денежном эквиваленте, то реальная польза часто не может быть оценена в тех же единицах. Это особенно относится к медицинскому облучению, непосредственно воздействующему на состояние здо-

ровья облучаемого пациента или позволяющему получить необходимую для лечения диагностическую информацию.

Нормы радиационной безопасности

В 1953 г. в Советском Союзе были опубликованы первые “Санитарные правила и нормы при работе с радиоактивными изотопами”, которые, с учетом достижений науки и практики, постоянно дополнялись и совершенствовались. К 2006 г. действуют следующие основные регламентирующие документы федерального уровня:

1. Федеральный закон “О радиационной безопасности населения” – ФЗ № 3 от 09.01.1996 г.

2. Федеральный закон “О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения” – ФЗ № 52 от 30.03.1999 г.

3. “Нормы радиационной безопасности” – НРБ-99.

4. “Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности” – ОС-ПОРБ-99.

Наиболее важным и основополагающим для теории и практики РБ документом являются НРБ-99, где регламентируются требования ФЗ “О радиационной безопасности населения” в формате основных пределов доз, допустимых уровней воздействия излучения и других требований по ограничению облучения человека и окружающей среды. Требования и нормативы, установленные в НРБ-99, обязательны для исполнения всеми органами власти, учреждениями и гражданами России. В свою очередь, в ОСПОРБ-99 установлены такие же обязательные требования по организации, средствам и технологиям защиты персонала и населения от вредных воздействий источников ионизирующего излучения, уровни которых регламентируются в НРБ-99. Список других нормативных документов по радиационной безопасности с меньшим юридическим статусом приведен в Приложении.

Для нормальных условий эксплуатации источников излучения в НРБ-99 установлены следующие категории облучаемых лиц:

- персонал – группы А и Б. К группе А относятся лица, непосредственно работающие с техногенными источниками ионизирующего излучения, к группе Б – лица, находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия, но не работающие с этими источниками;

Таблица 4. Основные пределы доз для персонала и населения, мЗв

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

– все население, включая лиц из персонала, но вне сферы их производственной деятельности.

Для этих категорий устанавливаются следующие 3 класса нормативов:

- *основные пределы доз* для персонала и населения. При этом основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни облучения, для персонала группы Б равны одной четвертой значений для персонала группы А. Пределы годовой эффективной дозы, приведенные в табл. 4, не должны быть превышены и в ситуациях одновременного внешнего и внутреннего облучения человека;

- *допустимые уровни монофакторного воздействия* для единственного радионуклида, единственного пути его поступления или единственного вида внешнего

облучения. Эти уровни приведены в НРБ-99 и являются производными от основных пределов доз: пределы годового поступления (ПГП) радионуклидов в организм; допустимые среднегодовые активности (ДООА) во вдыхаемом воздухе; среднегодовые удельные активности (ДУА); уровни вмешательства (УВ) и т. д.

- *контрольные уровни* (дозы, уровни, активности, плотности потоков частиц и т. д.). Их значения должны выбираться с учетом достигнутого в данном учреждении уровня радиационной безопасности и тем самым обеспечивать условия, при которых радиационное воздействие будет заведомо ниже предельно допустимого.

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

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками излучения, вводятся дополнительные ограничения: эквивалентная

доза на поверхности нижней части живота не должна превышать 1 мЗв/мес, а поступление радионуклидов в год не должно быть более одной двадцатой предела годового поступления для персонала. В этих условиях эквивалентная доза облучения плода за 2 мес не выявленной беременности не превысит 1 мЗв. Администрация учреждения обязана перевести женщину с установленной беременностью на работу, не связанную с источниками ионизирующего излучения на весь период беременности и грудного вскармливания ребенка.

Для студентов и учащихся старше 16 лет, проходящих профессиональное обучение с использованием источников ионизирующего излучения, годовые дозы не должны превышать значений, установленных для персонала группы Б.

Важно отметить, что основные пределы доз, указанные в табл. 4, не включают в себя дозы, обусловленные излучением естественного радиационного фона, а также дозы вследствие радиационных аварий и от медицинского облучения. На эти виды облучения устанавливаются уже не пределы дозы, а специальные дозовые ограничения, приведенные в НРБ-99.

Что касается естественного радиационного фона, то соответствующие уровни облучения населения и персонала уже были рассмотрены выше и они не могут быть регламентированы в принципе. Однако в производственных условиях эффективная доза облучения персонала природными источниками излучения не должна превышать 5 мЗв/год. В частности, воздействие космического излучения на экипажи самолетов нормируется как природное облучение в производственных условиях и поэтому попадает под указанное ограничение 5 мЗв/год.

(Продолжение см. в № 1, 2009 г.)