

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра безопасности жизнедеятельности

658.382(07)
С50

А.И. Смагин

**БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ
И ЗАЩИТА
ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Учебное пособие

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2018

УДК 658.382(075.8) + 621.039(075.8)
С50

*Одобрено учебно-методической комиссией
механико-технологического факультета*

Рецензенты:

*Сокольников М.Э., докт. мед наук, заместитель директора по науке
Южно-Уральского института биофизики, член Международной комиссии
по радиационной защите (МКРЗ);*

*Захаров В.Д., канд. биол. наук, ст. научн. сотр. «Южно-Уральского
научного центра» УрО РАН*

Смагин, А.И.

С50 Биологическое действие и защита от ионизирующих излучений:
учебное пособие / А.И. Смагин. – Челябинск: Издательский центр
ЮУрГУ, 2018. – 117 с.

В учебном пособии приведены основы знаний, необходимые для освоения курсов «Радиационная безопасность», «Радиобиология», «Общая экология» раздела «Радиационная экология». Рассмотрены механизмы и особенности воздействия ионизирующей радиации на простейших, растения, животных, человека и факторы, влияющие на выраженность биологических эффектов после облучения. Показана роль радиопротекторов в защите человека и способы защиты от радиоактивного излучения. Приводится история развития дозиметрии, и показаны основные типы современных дозиметров и радиометров. Рассмотрено развитие принципов и подходов в вопросах радиационной защиты использованных при разработке норм радиационной безопасности (НРБ-99/2009).

После изучения курса студент должен иметь представление о негативном и положительном воздействии ионизирующих излучений, последствиях облучения простейших, растений, животных и человека, возможностях использования ионизирующей радиации в медицине, сельском хозяйстве и промышленности, развитии парадигмы радиационной безопасности, способах защиты от радиации и нормах радиационной безопасности.

Учебное пособие разработано для реализации возможности использования в построении учебного процесса блочно-модульной системы. Учебное пособие подготовлено в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования, предназначен для технических и гуманитарных направлений бакалавриата и магистратуры, соответствует ФГОС ВПО третьего поколения дисциплины «Безопасность жизнедеятельности», «Радиационная безопасность» и «Экология».

УДК 658.382(075.8) + 621.039(075.8)

ISBN 978-5-696-05056-0

© Издательский центр ЮУрГУ, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	
1.1. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом	12
1.2. Биофизические основы действия ионизирующего облучения на организм	16
1.3. Реакции биоты на воздействие ионизирующего излучения	17
1.3.1. Воздействие ионизирующей радиации на микроорганизмы ..	20
1.3.2. Радиационное поражение растений.....	22
1.3.3. Радиационное поражение человека и животных	24
1.3.3.1. Лучевое поражение кожных покровов	25
1.3.3.2. Острая лучевая болезнь человека.....	27
1.3.3.3. Гибель млекопитающих после облучения.....	29
1.3.3.4. Хроническая лучевая болезнь человека	31
1.4. Радиочувствительность и радиостойчивость	32
1.4.1. Радиостойчивость органов и систем животных и человека при внешнем облучении.....	33
1.4.2. Радиостойчивость органов и систем животных и человека при внутреннем облучении.....	36
1.5. Отдаленные последствия облучения	38
1.6. Факторы, влияющие на выраженность биологических эффектов после облучения	39
1.7. Разработка новых радиопротекторов для защиты человека	42
Вопросы для проверки знаний по главе 1.....	44
Глава 2. РАЗВИТИЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ И ПОДХОДОВ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	
2.1. Опасность воздействия ионизирующей радиации на человека	45
2.2. Практическая дозиметрия	46
2.3. Международная комиссия по радиационной защите и нормирование уровней облучения.....	48
2.4. Радиационный риск	49
2.4.1. Риск в системе нормирования и методология оценки риска ..	50
2.4.2. Проблема малых доз.....	52
2.4.3. Концепция приемлемого риска	53
2.5. Антропоцентрический и экоцентрический подход в нормировании уровней облучения.....	54
2.6. Единый подход в системе радиационной безопасности.....	63
Вопросы для проверки знаний по главе 2.....	74

Глава 3. ЗАЩИТА ОТ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ДОЗИМЕТРЫ И РАДИОМЕТРЫ, НОРМЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	
3.1. Способы защиты от радиоактивного излучения.....	75
3.2. Дозиметры и радиометры	80
3.3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)	86
Вопросы для проверки знаний по главе 3.....	97
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	98
СПИСОК ТЕРМИНОВ	102
ПРИЛОЖЕНИЕ	108

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всех сферах деятельности человека: медицине, энергетике, обороне широко используются ядерные технологии.

Эффект радиоактивности был открыт более 100 лет назад директором физического института и кафедры физики Вюрцбургского университета, профессором Вильгельм Конрадом Рентгеном. 8 ноября 1895 г. Рентген, проводя опыты с вакуумной катодной трубкой, обнаружил невидимые лучи. Исследователь назвал новое излучение X-лучами. В январе 1896 г. на русском, английском, французском и итальянском языках была издана брошюра Рентгена «Новый род лучей» – открытие быстро стало достоянием мировой общественности.

Открытие невидимых X-лучей, обладавших огромной проникающей способностью, вызвало огромный научный и общественный интерес. Ученые всего мира начали проводить опыты с ионизирующим излучением, а исследование свойств X-лучей положило начало новой науке – рентгенологии. В дальнейшем X-лучи были переименованы в рентгеновские в честь первооткрывателя.

После открытия природа X-лучей была не известна, и исследователи выдвигали различные гипотезы о происхождении неведомого явления. В январе 1896 г. на заседании Парижской Академии наук Анри Пуанкаре сделал доклад об открытии рентгеновского излучения. Пуанкаре высказал предположение, что вновь открытые лучи могут возникать в результате флюоресценции, поскольку работа вакуумных катодных трубок, генерирующих X-лучи, сопровождалась свечением, похожим на свет, испускаемый флюоресцирующими веществами. Анри Беккерель, профессор физики Парижского музея естественной истории, начал эксперименты по проверке гипотезы А. Пуанкаре. Беккерель по счастливой случайности выбрал для проведения экспериментов в качестве флюоресцирующего вещества двойную сернокислую соль урана. После серии экспериментов с различными флюоресцирующими веществами было обнаружено, что флюоресценция не имеет отношения к возникновению излучения. На фотопластинке оставляли отпечатки только те из флюоресцирующих веществ, в состав которых входили различные соли урана. Ученый выяснил, что сильнее всего засвечивал фотопластинку сам уран, испуская невидимые лучи. Весной 1896 г. Анри Беккерелем было открыто самопроизвольное излучение солей урана – естественная радиоактивность [1].

После открытия Беккереля многие ученые начали поиски веществ, обладающих свойством естественной радиоактивности. Длительный и трудоемкий процесс выделения новых веществ, обладающих способностью испускать невидимые лучи, завершился успехом в 1898 г. Марии Кюри и Пьеру Кюри удалось обнаружить радиоактивность Th (тория). Элементы U

(уран) и Th (торий) были известны давно, задолго до открытия их нового свойства – радиоактивности. Вскоре супруги Кюри выделили два новых вещества, способных излучать лучи Беккереля. Эти вещества не были известны и не имели названия. Один из вновь обнаруженных исследователями элементов был назван *полонием* (Po) в честь Польши – родины Марии Склодовской-Кюри, а второй радиоактивный элемент, сходный по химическим свойствам с барием, назвали *радием* (Ra).

Мария Кюри дала общее название новым веществам – *радиоактивные*, что означает способные испускать лучи, а само явление ионизирующего излучения получило название *радиоактивности*.

На заре ядерной эры, вскоре после открытия нового явления было обнаружено негативное воздействие радиоактивного излучения. Анри Беккерель, сотрудничавший с супругами Кюри, попросил пробирку с торием для демонстрации на публичной лекции и положил источник излучения в жилетный карман. Прочтя лекцию, ученый вернул супругам Кюри радиоактивный препарат, а на следующий день обнаружил на коже в районе расположения жилетного кармана покраснение в форме пробирки. Беккерель рассказал об этом Пьеру Кюри, тот провел опыт на себе – в течение десяти часов носил привязанную к предплечью пробирку с радием. У Кюри тоже появилось покраснение кожи в месте воздействия препарата, которое перешло в тяжелейшую язву. Язву удалось вылечить через два месяца.

В 1901 г. в совместной работе супруги Кюри не только описали патологическое влияние радия на кожу, но и высказали предположение об использовании радия для лечения опухолей. После того, как было признано значение радия для лечения злокачественных опухолей, резко поднялись цены на радиевые источники. Однако Кюри отказались патентовать процесс получения радия и использовать результаты своих исследований в любых коммерческих целях. Кюри, как и Рентген, выступали за свободный доступ к знаниям и считали понятия «коммерческая выгода» и «наука» несовместимыми.

Американский физик Томас Эдисон сразу после открытия нового явления занялся разработкой флюороскопа – аппарата для расшифровки рентгеновских снимков. Он поручил тестирование рентгеновских трубок своему ассистенту Кларенсу Делли, который для быстроты и наглядности процесса апробировал устройство на собственных кистях рук. Четыре года непрерывных исследований привели к ожогам кожных покровов, кисти рук пришлось ампутировать. Но и эта крайняя мера не спасла жизнь исследователю, вскоре помощник Эдисона скончался от рака. Сам физик, пораженный произошедшим, больше никогда не проводил исследований с X-лучами [1].

Несмотря на то, что было известно явное негативное влияние ионизирующего излучения на человека, тысячи ученых во всем мире продолжали заниматься исследованиями нового явления, проводились исследования и по изучению биологического действия ионизирующих излучений.

Среди самых ранних работ известны классические исследования нашего соотечественника И. Ф. Тарханова, в 1896 г. в опытах на лягушках и насекомых открывшего реакции на облучение ряда систем организмов и выдвинувшего предположение о возможности лечебного применения рентгеновского излучения. В первые годы после открытия Конрадом Рентгеном X-лучей было издано 49 книг и более 1000 статей об использовании ионизирующего излучения в медицине.

В 1896 г. в печати появились сообщения о поражениях кожи (эритемах¹, дерматитах², выпадении волос) у персонала, подвергавшегося частым и продолжительным воздействиям X-лучей. В 1902 г. Г. Фрибенон был описан первый случай лучевого рака кожи, хотя самые первые сведения о лучевом раке, по-видимому, восходят к XVI в. Известные ученые средневековья – Парацельс и Георгий Агрикола писали о загадочной болезни легких у горняков, работавших в рудниках, где впоследствии стали добывать уран и радий, а в 1879 г. за пятнадцать лет до открытия Рентгена заболевание горняков ряда шахт было диагностировано как рак легких.

Уже в первый год после открытия нового явления была проведена попытка использования X-лучей для лечения. К доктору Дж. Джиллиману из Чикаго обратился за помощью физик Е. Груббе, получивший сильные ожоги руки в результате проведения опытов с рентгеновскими лучами. Джиллимана поразила эффект воздействия X-лучей, и он отправил на облучение к Груббе больную с неоперабельным раком молочной железы. Вероятно, был получен хороший эффект, так как Груббе продолжил практику рентгенотерапии и получил некоторое медицинское образование. Позднее физик сам стал жертвой лучевого рака.

В ноябре 1896 г. проводились сеансы рентгенотерапии родинки (невуса³) у 5-летней девочки Л. Фройндом (L. Freund) в Вене.

¹ **Эритема** (греч. ερυθρός – красный) – сильное покраснение кожи, вызванное расширением капилляров. Один из симптомов воспаления.

² **Дерматит**. – воспалительное поражение кожи, возникающее в результате воздействия на неё повреждающих факторов химической, физической или биологической природы.

³ **Родинка, или родимое пятно** (темная родинка – невиус) – врожденное или приобретённое пигментированное образование на коже, имеющие различные цвета окраски – черный, красный, фиолетовый коричневый и другие.

Первые годы после открытия X-лучей объектом наблюдения оставалась главным образом кожа, так как никто не предполагал, что рентгеновские лучи могут влиять на глубоко расположенные ткани.

В 1903 г. немецкий рентгенолог и хирург Г. Альберс-Шонберг обнаружил дегенеративные изменения семяродного эпителия и азооспермию⁴ у морских свинок и кроликов, а в 1905 г. Л. Хальберштадтер наблюдал атрофию яичников у облученных животных. Вскоре П. Броун и Дж. Осгоуд выявили азооспермию, явившуюся причиной бесплодия у людей – молодых рабочих завода рентгеновских трубок, проработавших на производстве более трех лет.

В начале XX века в Институте экспериментальной медицины в Санкт-Петербурге радиологические исследования проводил основоположник отечественной и мировой радиобиологии Ефим Семенович Лондон. Ефим Семенович впервые установил, что под влиянием лучей радия наиболее ранние и выраженные изменения **наблюдаются в крови, половой и лимфатической системах**, а увеличение дозового воздействия **радия** может привести к **гибели животных**. Исключительное значение имеют работы Е. С. Лондона о влиянии рентгеновского излучения и излучения радия на центральную нервную систему у животных и человека. Ученым впервые были проведены исследования по распределению радиоактивных веществ в организме, а в 1904 г. разработан и внедрен в практику научных исследований метод **авторадиографии**. В 1911 г. вышла его книга «Радий в биологии и медицине». Эта работа, опубликованная на немецком языке, считается первой в мире монографией по радиобиологии [2].

Зная об исследованиях Е.С. Лондона, Г. Хейнеке 1903 г. в Германии провел опыты по длительному воздействию больших доз рентгеновского излучения на животных. Было установлено, что большие дозы рентгеновского излучения так же, как и радия, приводят к гибели животных. Г. Хейнеке впервые описал лучевую анемию⁵ и лейкопению⁶, а также обратил внимание на поражение органов кроветворения, видимое даже невооруженным глазом (атрофия селезенки). Детально описанные исследователем типичные изменения клеток костного мозга и лимфатических узлов при гистологическом исследовании являются классическими и по сей день.

⁴ **Азооспермия** (от др.-греч. ἀ- – отсутствие, ζῷον животное и σπέρμα – семя) – патологическое состояние, при котором в эякуляте (семенной жидкости) отсутствуют сперматозоиды.

⁵ **Анемия** или малокровие – группа клинко-гематологических синдромов со снижением концентрации гемоглобина в крови, чаще при одновременном уменьшении числа эритроцитов.

⁶ **Лейкопения (она же нейтропения)** – это снижение уровня лейкоцитов в крови человека до $1,5 \times 10^9$ /л и меньше.

В начале XX века на заре эры радиобиологии большинство работ носили описательный характер, но был обнаружен ряд ключевых радиобиологических закономерностей.

1. В 1905 г. М. Корнике было установлено, что ***воздействие ионизирующей радиации вызывает торможение клеточного деления.***

2. В 1906 г. французскими исследователями И. Бергонье и Л. Трибондо в серии экспериментов обнаружили разную чувствительность к воздействию ионизирующей радиации клеток – спермогоний⁷ на разных стадиях развития. Наиболее чувствительными оказались спермогонии, наиболее резистентными – сперматозоиды, облучение которых вообще не вызывало морфологических изменений. Была выявлена избирательность действия ионизирующих излучений, зависящая ***не только от физических характеристик самих лучей***, но и степени чувствительности самих клеток. В 1906 г. исследователи сформулировали одно из основных правил радиобиологии – ***клетки тем более радиочувствительны, чем большая у них способность к размножению и чем менее определена их морфология и функция, т.е. чем они менее дифференцированы.*** Несмотря на ряд исключений, эта закономерность не утратила своего значения и по сей день.

3. В 1903 г. Д. Бун, проводя опыты на сперматозоидах и икринках лягушек, выявил роль поражения ядра клетки в клеточной радиочувствительности. Было установлено, что ***облучение цитоплазмы яйцеклетки не играет особой роли в развитии зародыша, а к необратимым изменениям приводит радиационное воздействие на ядро клеток.***

В этот же период проводились исследования действия ионизирующей радиации на эмбриогенез, позволившие обнаружить возникновение различных аномалий при облучении на различных стадиях развития эмбриона. Исследователи воздействия ионизирующих излучений начали использовать кривые доза – эффект. Такой способ оценки результатов радиобиологических экспериментов остается актуальным и в настоящее время, хотя интерпретация самих кривых доза – эффект претерпевает изменения.

Пионер в области диагностического и лечебного применения рентгеновского излучения Фридрих Дессауэр в 1909 г. применил рентгеновский аппарат для получения рентгенокинематографии сердца человека. Для лучевой терапии опухолей ученый разработал рентгеновские аппараты, обеспечивающие фокусирование в одной точке исходящих под разными углами рентгеновских лучей, это позволило концентрировать энергию излучения на глубокорасположенную внутри тела опухоль и не повреждать окружающую нормальную ткань. Уже к 1914 г. Ф. Дессауэр опубликовал бо-

⁷ **Сперматогонии** – (от греч. spérma, родительный падеж spérmatos – семя и gónos – рождение, плод, потомок) развивающиеся мужские половые клетки в период размножения до начала периода роста.

лее 20 научных работ в этой области, а в 1922 г. Ф. Дессауэром была предложена первая теория, объяснявшая радиобиологический эффект дискретностью событий – *актов ионизации в чувствительном объеме клетки*. Теоретические разработки, сделанные Ф. Дессауэром, получили развитие в виде принципа попаданий и теории мишеней в трудах Н.В. Тимофеева-Ресовского, К. Циммера, Д. Ли и других исследователей.

В 1925 г. работавшие в СССР исследователь Г.А. Надсон и Г.Ф. Филиппов в опытах на дрожжах обнаружили воздействие ионизирующих излучений на генетический аппарат клетки, сопровождающееся наследственной передачей вновь приобретенных признаков. К сожалению, это крупнейшее открытие не получило должной оценки. Лишь после работ Г. Меллера, установившего мутагенный эффект ионизирующих излучений в экспериментах на дрозофиле, радиационно-генетические исследования стали проводиться во всем мире и во многом послужили становлению количественной радиобиологии.

Мощным импульсом к бурному развитию радиобиологии явились успехи ядерной физики в 40-е гг. XX века, обозначившие перспективу овладения энергией атомного ядра. После варварской атомной бомбардировки США японских городов Хиросимы и Нагасаки стало понятно, что в новом мире, где возможно применение ядерного оружия, неотложной задачей является разработка способов противолучевой защиты и лечения радиационных поражений. Для решения этой задачи необходимо детальное изучение механизмов радиобиологического эффекта и патогенеза лучевой болезни. В 40–50-е годы XX в. в развитых странах начали создаваться крупные исследовательские центры. Эти центры, как правило, организовывали при институтах и госпиталях. Исследования показали, что научной основой лучевых методов лечения, в том числе и злокачественных опухолей, могут являться методы, основанные на тщательном изучении тканевой радиочувствительности.

В настоящее время к проблемам биологии и радиобиологии привлечено внимание большого числа естествоиспытателей смежных специальностей, прежде всего физиков и химиков. Современный этап развития радиобиологии можно охарактеризовать как накопление разносторонней информации о реакциях на облучение отдельных биологических объектов, систем и популяций разной степени сложности. Развитие ядерной физики делает возможным изучение таких взаимодействий с помощью новых видов ионизирующих излучений, в том числе ядерных частиц высоких энергий. Это создает перспективу решения традиционных задач радиобиологии и позволяет выявить фундаментальные закономерности биологической формы существования и развития материи.

Радиоактивные излучения являются неотъемлемой частью окружающей человека природной среды. В первой половине XX века гипотезу о необходимости радиационного фактора для запуска *митотического цикла*⁸ выдвигал А.Г. Гурвич (1923 г.). Постоянное очень слабое воздействие радиации на многочисленные регуляторные системы организма выполняет функции слабого раздражителя, поддерживающего все системы, включая и защитные, в должном тонусе.

Эксперименты А. Планеля, Т.Д. Лаки, А.М. Кузина и ряда других ученых показали, что искусственное **снижение интенсивности естественного радиационного фона, действующего на живые организмы, оказывает явно выраженное отрицательное влияние** на протекание *метаболических процессов*, рост и развитие живых организмов.

Развитие жизни на земле **невозможно** в отсутствии радиационного фона. Прежнее представление о *естественном радиационном фоне*⁹ как о **наименьшем пределе вредного воздействия** ионизирующей радиации оказалось несостоятельным. Большинство радиобиологов считают, что за многие миллионы лет развития жизни на нашей планете существующий радиационный фон стал одним из неотъемлемых физических факторов среды обитания живых существ [3]. Это подтверждается эффектом радиационного *гормезиса*¹⁰ или стимулирования организма небольшими дозами ионизирующей радиации.

Радиационные мутации, вызванные воздействием естественного фона ионизирующей радиации, играют роль исходного толчка для эволюционного отбора. Ионизирующая радиация, вероятно, является одним из наиболее значимых, если не единственным, фактором в мутагенезе и образовании видов растений и животных. Известно, что в природе удается обнаружить только выраженные эффекты, частота которых, по крайней мере, в 2–3 раза превышает спонтанный уровень. Эту точку зрения поддерживал академик Лев Александрович Булдаков [4], считавший, что ни на одной территории с повышенным природным или *техногенно-измененным*¹¹ радиационным фоном пока не найдено никаких заметных негативных или позитивных (стимулирующих) проявлений действия ионизирующей радиации.

⁸ **Митоз** – обычное деление соматических клеток.

⁹ **Естественный усредненный радиационный фон** обычно лежит в пределах 0,10–0,16 мкЗв/час.

¹⁰ **Гормезис** (иногда гермезис) (от греч. *Hórmēsis* – быстрое движение, стремление) – стимулирующее действие умеренных доз стрессоров.

¹¹ **Техногенно – измененный радиационный фон** – естественный радиационный фон, измененный человеком.

Глава 1. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1.1. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом

Заряженные частицы и γ -фотоны, распространяясь в веществе, взаимодействуют с ядрами химических веществ и входящими в состав ядер электронами. В результате взаимодействий изменяется состояние как вещества, так и частиц. Основным механизмом потерь энергии заряженной частицы (α и β) при прохождении через вещество является *ионизационное торможение*. При этом кинетическая энергия заряженной частицы расходуется на возбуждение и ионизацию атомов среды.

Взаимодействие частицы с веществом количественно оценивается *линейной плотностью ионизации* (ЛПИ) – числом пар ионов, образующихся в месте прохождения заряженной частицы из расчета на единицу ее пробега в среде; используется для характеристики ионизирующего излучения.

ЛПИ обозначается символом i и рассчитывается как отношение числа пар ионов dn , образованных заряженной ионизирующей частицей на элементарном пути dl , к этому пути:

$$i = dn/dl . \quad (1.1)$$

Проникающая способность и плотность ионизации основных видов излучений приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Проникающая способность и плотность ионизации различных видов излучений с энергией 2 МэВ

Тип излучения	Длина пробега в воздухе, м	Плотность ионизации (число ионов мм ²)
α -частицы	0,01	6 000,0
β -частицы	10,00	6,0
γ -кванты	Около 600,00	0,1

Линейной тормозной способностью вещества S называют отношение энергии dE , теряемой заряженной ионизирующей частицей при прохождении элементарного пути dl в веществе, к длине этого пути:

$$S = dE/dl, \text{ Дж/м.} \quad (1.2)$$

Средним линейным пробегом заряженной ионизирующей частицы R является среднее значение расстояния, проходимого частицей в данном веществе до потери ионизирующей способности.

По мере движения частицы в среде уменьшаются ее энергия и скорость, линейная плотность ионизации при этом возрастает и только при завершении пробега частицы резко убывает. Возрастание i обусловлено тем, что при уменьшении скорости α -частицы возрастает вероятность ионизации атома.

График зависимости линейной плотности ионизации от пути x , проходимого α -частицей в среде (воздух), показан на рис. 1.1.

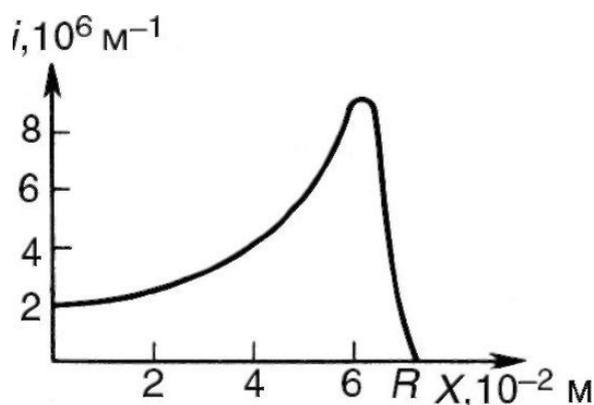


Рис. 1.1. Зависимости линейной плотности ионизации от пути x , проходимого α -частицей в среде (воздух)

Как видно из рис. 1.1, линейная плотность ионизации α -частиц естественно-радиоактивных изотопов в воздухе при нормальном давлении составляет $i = (2-8) \times 10^6$ пар ионов/м.

Так как для ионизации одной молекулы требуется энергия около 34 эВ, то значения линейной тормозной способности вещества (воздуха) лежат в интервале 70–270 МэВ/м.

Средний линейный пробег α -частицы зависит *от ее энергии*. В воздухе он равен нескольким сантиметрам, в жидкостях и в живом организме – нескольким миллиметрам. После того как скорость α -частицы замедляется до скорости молекулярно-теплового движения, она, захватив два электрона в веществе, превращается в атом гелия.

Ионизация и возбуждение являются первичными процессами. Вторичными процессами могут быть увеличение скорости молекулярно-теплового движения, характеристическое рентгеновское излучение, радиолюминесценция, химические процессы.

Взаимодействие α -частиц с ядрами является значительно более редким процессом, чем ионизация. При этом возможны ядерные реакции, а также рассеяние α -частиц.

β -излучение так же, как и α -излучение вызывает ионизацию вещества. Средний линейный пробег β -частицы зависит *от ее энергии*. В воздухе он равен нескольким метрам (до 10 метров), в жидкостях и в живом организме – от нескольким миллиметром до 2,5 см.

В воздухе линейная плотность ионизации β -частиц может быть вычислена по формуле

$$i = k (c / v^2), \quad (1.3)$$

где $k \approx 4600$ пар ионов /м, c – скорость света, v^2 – скорость β -частиц.

Кроме ионизации и возбуждения β -частицы могут вызывать и другие процессы. Так, например, при торможении электронов возникает тормозное рентгеновское излучение. β -частицы рассеиваются на электронах вещества, и их пути сильно искривляются в нем. Если электрон движется в среде со скоростью, превышающей скорость распространения света в этой среде, то возникает характерное черенковское излучение (излучение Черенкова–Вавилова).

При попадании β -частицы в вещество с большой вероятностью происходит такое взаимодействие ее с электроном, в результате которого вместо пары электрон-позитрон образуются два γ -фотона. Этот процесс, схема которого показана на рис. 1.2, называют аннигиляцией.

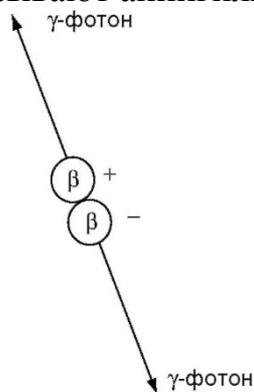


Рис. 1.2. Процесс аннигиляции

Энергия каждого γ -фотона, возникающего при аннигиляции, должна быть не меньше энергии покоя электрона или позитрона, т.е. не менее 0,51 МэВ.

Несмотря на разнообразие процессов, приводящих к ослаблению β -излучения, можно приближенно считать, что интенсивность его изменяется по экспоненциальному закону. В качестве одной из характеристик поглощения β -излучения веществом используют слой половинного поглощения, при прохождении через который интенсивность излучения уменьша-

ется вдвое. *Можно считать, что в ткани организма β -частицы в среднем проникают на глубину 10–15 мм.*

Защитой от β -излучения служат тонкие алюминиевые, плексигласовые и другие экраны. Так, например, слой алюминия толщиной 0,4 мм или воды толщиной 1,1 мм уменьшает вдвое β -излучение от радиоактивного изотопа фосфора ^{15}P .

Средний линейный пробег γ -кванта в воздухе составляет десятки–сотни метров, а в жидкостях и в живом организме 10 и более сантиметров.

При попадании γ -излучения в вещество наряду с процессами, характерными для рентгеновского излучения (когерентное рассеяние, эффект Комптона, фотоэффект), возникают и такие, которые неспецифичны для взаимодействия рентгеновского излучения с веществом. К этим процессам следует отнести образование пары электрон-позитрон, происходящее при энергии γ -фотона, не меньшей суммарной энергии покоя электрона и позитрона (1,02 МэВ), и фотоядерные реакции, которые возникают при взаимодействии γ -фотонов больших энергий с атомными ядрами. Для возникновения фотоядерной реакции необходимо, чтобы энергия γ -фотона была не меньше энергии связи, приходящейся на нуклон. В результате различных процессов под действием γ -излучения образуются заряженные частицы; следовательно, γ -излучение также является ионизирующим.

Ослабление пучка γ -излучения в веществе обычно описывают экспоненциальным законом. Линейный (или массовый) коэффициент поглощения можно представить как сумму соответствующих коэффициентов поглощения, учитывающих три основных процесса взаимодействия – фотоэффект, Комптон-эффект и образование электрон-позитронных пар:

$$\mu = \mu_{\text{ф}} + \mu_{\text{нк}} + \mu_{\text{п}}. \quad (1.4)$$

Эти основные процессы взаимодействия происходят с разной вероятностью, которая зависит от энергии γ -фотона (рис. 3.3; кривая получена для свинца).

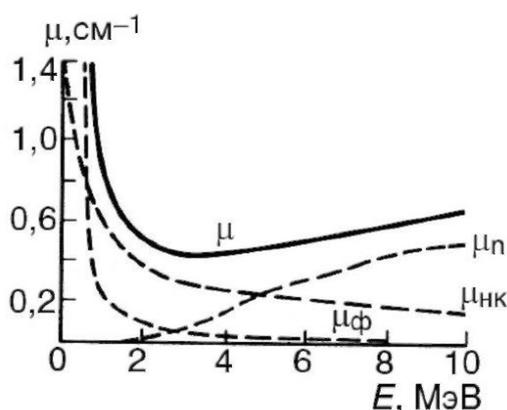


Рис. 1.3. Линейный коэффициент поглощения пучка γ -излучения различных энергий в пластине свинца

Как следует из представленных на рисунке данных, при малых энергиях основную роль играет фотоэффект, при средних – Комpton-эффект и при энергиях, больших 10 МэВ, – процесс образования пары электрон-позитрон.

Экспоненциальный закон ослабления пучка γ -фотонов выполняется приближенно, особенно при больших энергиях. Это обусловлено вторичными процессами, возникающими при взаимодействии γ -излучения с веществом. Так, например, электроны и позитроны обладают энергией, достаточной для образования новых γ -фотонов в результате торможения и аннигиляции.

Поток нейтронов тоже является ионизирующим излучением, так как в результате взаимодействия нейтронов с ядрами атомов образуются заряженные частицы и γ -излучение [3, 5].

Эти процессы можно проиллюстрировать несколькими примерами:

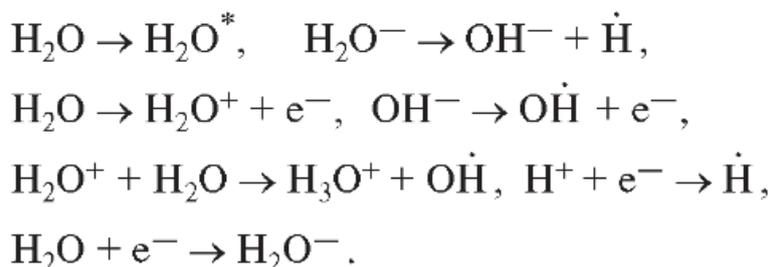
- деление ядер при захвате ими нейтронов – образуются радиоактивные осколки, γ -излучение и заряженные частицы;
- образование α -частиц ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_0^1\text{n} = {}_{11}^{24}\text{Na} + {}_2^4\alpha$;
- образование протонов ${}_{7}^{14}\text{N} + {}_0^1\text{n} = {}_6^{14}\text{C} + {}_1^1\text{p}$

1.2. Биофизические основы действия ионизирующего облучения на организм

Рассматривая первичные физико-химические процессы в организме при действии ионизирующих излучений, следует учитывать две принципиально разные возможности взаимодействия: с молекулами воды и с молекулами органических соединений.

Под действием ионизирующих излучений происходят химические превращения вещества, получившие название радиолиза.

Возможные механизмы радиолиза воды:



Реакция с кислородом может привести к образованию гидроперекиси и перекиси водорода:



Взаимодействие молекул органических соединений с ионизирующими излучениями приводит к образованию возбужденных молекул, ионов, радикалов и перекисей. Высокоактивные в химическом отношении соединения могут взаимодействовать с остальными молекулами биологической системы, что может привести к нарушению мембран, клеток и функций всего организма [6].

Значительные биологические нарушения вызываются ничтожно малыми количествами поглощаемой энергии излучения. Ионизирующее излучение действует не только на биологический объект, подвергнутый облучению, но и на последующие поколения через наследственный аппарат клеток. Это обстоятельство, а также его условное прогнозирование особо остро ставят вопрос о защите организмов от излучения.

Для биологического действия ионизирующего излучения специфичен ***скрытый (латентный) период***.

Разные части клеток по-разному чувствительны к одной и той же дозе ионизирующего излучения. Наиболее ***чувствительным к действию излучения является ядро клетки***.

Способность к делению – наиболее уязвимая функция клетки, поэтому при облучении прежде всего поражаются растущие ткани. Это делает ионизирующее излучение особенно опасным ***для детского организма***, включая период, когда он находится в утробе матери. Губительно действует излучение и на ткани взрослого организма, в которых происходит постоянное или периодическое ***деление клеток: слизистую оболочку желудка и кишечника, кроветворную ткань, половые клетки и т.д.*** Действия ионизирующего излучения на быстрорастущие ткани используют также при терапевтическом воздействии на ткани опухоли.

При больших дозах может наступить «смерть под лучом», при меньших – возникают различные заболевания (лучевая болезнь и др.) [7, 8].

1.3. Реакции биоты на воздействие ионизирующего излучения

Изучение причин несоответствия между ничтожным количеством поглощенной энергии от воздействия ионизирующей радиации и крайней степенью реакции биологического объекта на облучение является основной целью исследований в современной радиобиологии, радиотоксикологии, радиоэкологии, сельскохозяйственной и ветеринарной радиобиологии и других научных направлениях. По выражению основоположника отечественной и мировой радиобиологии, биофизики, радиоэкологии ***Н.В. Тимофеева-Ресовского, «основной задачей радиобиологии является попытка понять и преодолеть основной радиобиологический парадокс, состоящий в большом несоответствии между ничтожной величиной поглощенной энергии и крайней степенью выраженности реакций био-***

логического объекта на воздействие ионизирующего излучения, вплоть до летального эффекта».

Радиобиологический парадокс – несоответствие между количеством энергии, выделившейся в органе или ткани живого организма при получении определенной дозы радиоактивного излучения, и биологическим эффектом. Это обусловлено тем, что косвенное действие ионизирующей радиации на организм значительно больше, чем ее прямое действие, связанное с воздействием определенного количества энергии.

Несмотря на существующие в природе колоссальные видовые и индивидуальные различия в чувствительности к ионизирующим излучениям отдельных организмов, облучение в дозе более 10 Гр убивает всех млекопитающих (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Значения LD 50 для некоторых видов биоты

Биологический вид	Доза Гр	Биологический вид	Доза Гр
Человек	2,5–4	Мышь	4,6–7
Обезьяна	2,5–6	Крыса	7–9
Овца	1,5–3	Птицы	8–20
Собака	2,5–3	Рыбы	8–20
Осел	2,0–4	Змеи	80–200
Кролик	9,0–10	Насекомые	10–100
Хомяк	9,0–10	Растения	10–1500

При общем облучении человека массой 70 кг в этой смертельной дозе поглощается всего 167 калорий (рис. 1.4).

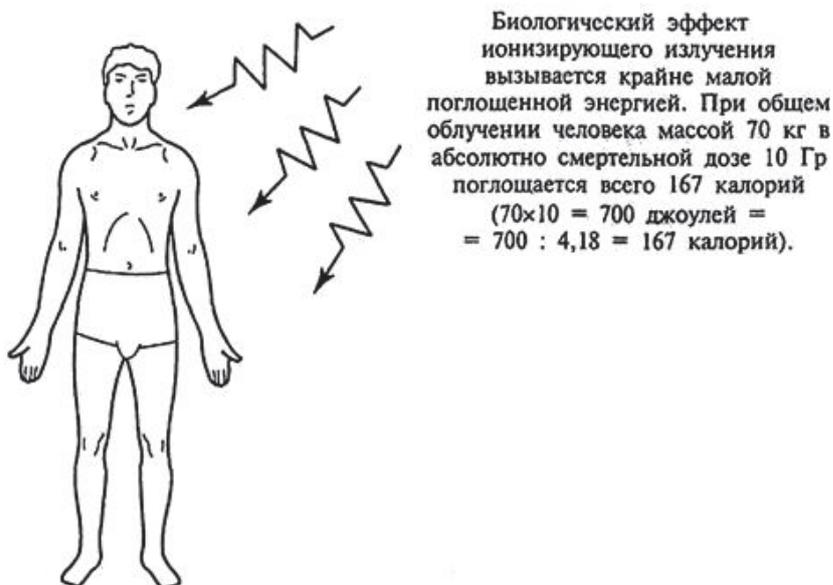


Рис. 1.4. Энергия, получаемая человеком при воздействии летальной дозы ионизирующего излучения

Такая смертельная доза облучения по суммарной энергии, поглощенной в организме в результате воздействия ионизирующего излучения, если условно перевести ее без потерь в тепловую энергию, крайне мала: она способна нагреть организм человека только лишь на $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$, то есть организм человека при воздействии смертельной дозы ионизирующего излучения получит меньшую энергию, чем от стакана выпитого горячего чая.

Радиочувствительность – степень реакции клеток, тканей, органов или организмов на воздействие ионизирующей радиации.

Одним из критериев оценки биологической радиочувствительности тех или иных биологических видов является определение дозы ионизирующего излучения, достаточной для гибели живого организма. Доза ионизирующего излучения может быть летальной (LD 100), при которой гибнут все облученные организмы, а может быть полуметальной (LD 50), в этом случае погибает половина облученных живых объектов (см. табл. 1.2).

Одинаковые дозы, полученные человеком от внешнего и от внутреннего облучения, а также дозы, полученные от разных видов ионизирующего излучения, от разных радионуклидов (при попадании их в организм) вызывают различные эффекты. Поглощенная доза не учитывает того, что при одинаковом ее значении α -излучение гораздо опаснее β - или γ -излучений из-за своей различной ионизирующей способности. На рис 1.5. показано повреждающее действие различных видов излучений.

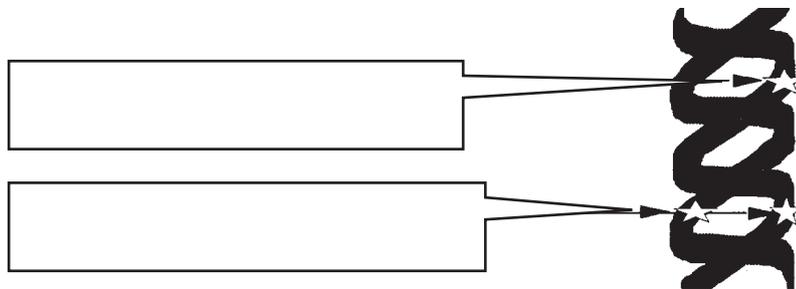


Рис 1.5. Повреждающее действие двойной спирали хромосом различными видами излучения

Понятно, что α -излучение, имеющее высокую плотность ионизации, наносит биологическим структурам большой ущерб. Для того чтобы оценить повреждающее действие разных видов излучения, поглощенную дозу необходимо умножить на коэффициент, отражающий способность излучения данного вида повреждать ткани организма (т.е. вызывать ионизирующий эффект в тканях): α -излучение считается при этом в 20 раз опаснее других видов излучений. Для того чтобы адекватно оценить ущерб организму от воздействия различных видов излучения, используют коэффициенты пересчета: для нейтронного излучения – 10, для β - и γ -излучений = 1.

Пересчитанная таким образом доза называется *эквивалентной или биологической дозой* [8].

Ряд причин и механизмов, определяющих естественную радиочувствительность биологических объектов, известны, в то же время многие аспекты до настоящего времени полностью не изучены. Это связано с тем, что реакции живых организмов на ионизирующее излучение крайне многообразны и определяются совместным воздействием множества факторов: параметрами излучения, радиочувствительностью и индивидуальными особенностями организма и др.

Отношение организма к ионизирующему излучению характеризуется **радиочувствительностью** и **радиоустойчивостью** (радиорезистентностью). Эти два термина взаимосвязаны и с разных сторон отражают одно и то же явление – если организм обладает высокой радиочувствительностью, то он характеризуется низкой радиоустойчивостью, и наоборот [8, 9].

1.3.1. Воздействие ионизирующей радиации на микроорганизмы

Радиационная микробиология – отрасль микробиологии, изучающая действие ультрафиолетового и ионизирующего излучений на микроорганизмы. Основной целью микробиологических исследований является – изучение механизмов биологического действия ультрафиолетового и ионизирующих излучений на микроорганизмы и воздействия радиации как фактора, вызывающего наследственную изменчивость или гибель бактерий.

Микроорганизмы широко используются в радиобиологических экспериментах для исследования общих закономерностей действия излучений на клетку. В этой области радиационная микробиология непосредственно смыкается с радиобиологией. Радиационная микробиология решает важные практические задачи, имеющие народнохозяйственное значение, например, применение излучений как фактора, стимулирующего больший выход биологически ценных веществ (антибиотиков, витаминов, гормонов, аминокислот). На стерилизующем эффекте излучений основан метод **«холодной» стерилизации**, которая часто имеет преимущества перед стерилизацией теплом или антисептиками, а иногда оказывается единственно возможной.

Впервые действие ионизирующей радиации на наследственность микроорганизмов было обнаружено в 1925 г. Г.А. Надсоном и Г.С. Филипповым. Ученые доказали, что под влиянием рентгеновского излучения у микроорганизмов возникают изменения, стойко сохраняющиеся в последующих поколениях (мутации). Это открытие дало начало развитию новой отрасли знаний – **радиационной генетике**.

Радиационными микробиологами было установлено, что в определенном диапазоне доз излучения количество мутантных форм увеличивается пропорционально дозе. *При помощи ионизирующей радиации естественная частота мутационного процесса может быть увеличена в десятки раз.* При этом увеличивается выход самых разнообразных наследственно измененных вариантов, затрагивающих различные наследуемые признаки микроорганизмов. Именно поэтому само по себе облучение без последующей селекции не может служить способом получения измененных в желаемом направлении форм микроорганизмов. Облучение обеспечивает появление в микробной популяции *большого числа вариантов* с наследственными изменениями. Последующая селекция по интересующему признаку позволяет быстрее и с большей вероятностью успеха отобрать необходимый для тех или иных нужд вариант. Так, например, селекция штаммов – продуцентов пенициллина *Penicillium chrysogenum* с предварительным воздействием рентгеновского и ультрафиолетового излучений позволила американским микробиологам отобрать варианты с **продуктивностью, более чем в 100 раз** превышающей выработку пенициллина исходным штаммом. Использование мутантов, полученных при нейтронном, рентгеновском и ультрафиолетовом облучении либо при воздействии химических мутагенных веществ, в 15–30 раз повышало продуктивность штаммов – продуцентов таких антибиотиков, как стрептомицин, хлортетрациклин, окситетрациклин. Ведутся работы по радиационной селекции других важных в производственном отношении штаммов микроорганизмов (вакцинных, токсигенных, продуцентов аминокислот и т. п.).

Проблемы радиационной микробиологии, относящиеся к использованию *стерилизующего действия радиации*, связаны с определением доз радиации и условий облучения, обеспечивающих гибель микроорганизмов. Бактерицидное действие рентгеновых лучей было известно уже в конце прошлого столетия. Однако практическое использование ионизирующих излучений для целей стерилизации стало возможным только в последние десятилетия благодаря созданию мощных облучателей, в частности γ -облучателей, заряженных радиоактивным кобальтом (^{60}Co). Современные γ -облучатели дают возможность обеспечивать огромные дозы радиации в короткое время и в больших объемах облучаемого объекта. Необходимость в создании установок большой мощности для целей стерилизации объясняется относительно высокой радиорезистентностью микроорганизмов. Если для млекопитающих летальные дозы облучения колеблются в пределах 4–10 Гр, то *инактивация*¹² микробов в зависимости от условий

¹² **Инактивация** – (ин- + лат. *activus* действенный) частичная или полная потеря активности биологически активным веществом или агентом.

облучения происходит только при использовании доз порядка 100 или 10 000 Гр.

Бактерицидное действие ионизирующих излучений зависит от ряда факторов. Высушивание микроорганизмов приводит к повышению радиорезистентности. Аналогичное действие оказывают уменьшение парциального давления кислорода в облучаемом объекте, понижение температуры во время облучения, а также условия, создаваемые после облучения. В случаях облучения микробных культур чувствительность микроорганизмов меняется в зависимости от цикла развития культуры.

Различные микроорганизмы обладают различной радиорезистентностью. Так, например, для достижения стерилизующего эффекта при облучении взвесей неспорообразующих бактерий (*Bact. coli*, *Proteus vulgaris*) необходимо облучение в дозах 1 000–5 000 Гр. Для инактивации спор спорообразующих микроорганизмов необходимы большие дозы – 15 000–25 000 Гр. Еще более устойчивы вирусы: стерилизующий эффект наступает только при облучениях в дозах 30 000–50 000 Гр [10].

1.3.2. Радиационное поражение растений

Радиационное поражение растений происходит, в основном, в результате загрязнения растений радионуклидами, оседающими из атмосферы непосредственно на растения и усвоения растениями радионуклидов из почвы. В вегетационный период¹³ загрязнение растений радионуклидами может происходить одновременно этими двумя путями.

Уровень загрязнения сельскохозяйственных растений при внекорневом поступлении радионуклидов определяется особенностями различных изотопов, их физико-химическими свойствами, условиями внешней среды, биологическими особенностями различных видов растений.

Уровни радиоактивного загрязнения растений зависят от концентрации радионуклидов в атмосфере и интенсивности их выпадения на земную поверхность и растительный покров. Процессы поглощения радиоактивных веществ растениями во многом определяются ***степенью дисперсности*** радиоактивных веществ. Чем крупнее частицы, тем меньше их задерживается на растениях. На степень фиксации растениями радионуклидов влияют химические свойства загрязняющих веществ. В клетки растений быстрее проникают наиболее подвижные радионуклиды, в первую очередь, йод и цезий.

На степень радиоактивного загрязнения влияют и морфологические особенности различных видов растений. Задержка растениями радиоак-

¹³ **Вегетационный период** – период года, в который возможны рост и развитие (вегетация) растений.

тивных веществ тем больше, чем выше развитие вегетативной массы, количество горизонтально размещенных листовых пластин и стеблей, наличие складок, морщинистости, опушенности, а также смолистых отложений.

На уровень радиоактивного загрязнения существенно влияют условия внешней среды. Повышенная влажность воздуха увеличивает степень задержки радиоактивных веществ на листьях и стеблях растений. Облучение растений происходит за счет излучения радионуклидов, находящихся на листьях, стеблях и стволах растений и на поверхности почвы.

Снижение внешнего загрязнения и, следовательно, снижение поступления радиоактивных веществ в растения происходит благодаря действию различных факторов внешней среды: сильный дождь смывает радиоактивные частицы и прерывает поступление радионуклидов, в сухую погоду ветер сдувает радиоактивные частицы с листовых пластин, стволов и стеблей растений, листопад также может прервать поступление радионуклидов.

При одинаковой дозе облучения растений α - и β -частицами радиационное поражение растений в основном происходит вследствие действия β -излучателей. β -излучающие радионуклиды вызывают более значимые поражающие эффекты, чем γ -излучатели.

При поражении радиоактивными веществами растений весной и летом в момент их активного роста содержание радионуклидов оказывается наиболее высоким в вегетативных органах – листьях и стеблях. Зерно загрязняется меньше. У различных культур и сортов загрязнение неодинаково, больше радиоактивных веществ задерживается в колосовых культурах за счет непосредственного попадания на них радионуклидов, меньше – в бобовых и початках кукурузы.

Лучевое поражение у растений проявляется в торможении и задержке роста, снижении урожайности, уменьшении репродуктивных свойств семян, клубней и корнеплодов. Тяжелое поражение приводит к полной остановке роста и гибели растений через несколько дней или недель после облучения. Облучение растений может быть внешним, внутренним и смешанным. При внешнем облучении растений β -частицы равномерно облучают все органы. Внутреннее облучение растений происходит при поступлении радионуклидов через корневую систему и листья.

Наличие источников внешнего и внутреннего излучения дает смешанное облучение.

Радиочувствительность растений количественно характеризуется величиной дозы, которая вызывает определенный эффект – угнетение роста, снижение урожайности, частичную или полную гибель.

Различные виды растений значительно различаются по устойчивости к ионизирующему излучению (табл. 3.3).

Степень радиационного поражения (от едва заметного подавления роста до полной потери урожая и даже гибели всех растений) зависит в основном от: полученной дозы облучения и радиочувствительности данного вида растений, во многом определяющейся фазой развития организма. На разных этапах развития растения проявляют неодинаковую чувствительность к радиации. Наиболее устойчивы сухие семена и почки в состоянии покоя, а наиболее чувствительны – проростки и вегетирующие растения.

Таблица 1.3

Летальные дозы однократного кратковременного γ -облучения для различных растений

Вид растений	Доза облучения, Р	Вид растений	Доза облучения, Р
Овес	330	Картофель, капуста	1260
Кукуруза	420	Свекла сахарная	1300
Рожь, ячмень	435	Естественные травы	1200
Пшеница	450	Тис	80
Горох	400	Сосна веймутова	100
Томат	1420	Ель сизая	102
Рис	1960	Лиственница японская	125
Лен	2070	Дуб красный, береза	800
Хлопчатник	1010	Клен красный	1000

Радиочувствительность деревьев зимой в состоянии покоя в три раза ниже, чем при облучении летом.

Из тканей растения наиболее чувствительны к воздействию облучения меристемы¹⁴.

На ранних этапах развития жизни на Земле естественный радиоактивный фон был намного выше современного и постоянно уменьшался из-за распада многих радиоактивных элементов земной коры. Возможно, по этой причине организмы более древнего происхождения (мхи и лишайники) отличаются более высокой радиоустойчивостью [8, 11].

1.3.3. Радиационное поражение человека и животных

Поражающее действие ионизирующих излучений на человека и животных может проявляться как локализованное повреждение тканей, органов

¹⁴ **Меристемы** (с др.-греч. $\mu\epsilon\rho\iota\sigma\tau\acute{o}\varsigma$ – делимый), или образовательные ткани, или меристематические ткани – обобщающее название для тканей растений, состоящих из интенсивно делящихся и сохраняющих физиологическую активность на протяжении всей жизни клеток.

и систем организма, так и всего организма. Облучение человека и животных в дозах, превышающих уровни индивидуальной устойчивости, приводят к развитию лучевой болезни. Степень лучевого поражения в значительной мере определяется физическими характеристиками ионизирующей радиации.

В пораженных клетках, тканях, органах под действием ионизирующих излучений развиваются дистрофические, *некробиотические*¹⁵ процессы, расстройства *гемодинамики*¹⁶, может развиваться поражение и всех тканей организма. Воздействие облучения вызывает изменения, в первую очередь, в наиболее радиочувствительных структурах, системах и органах:

- а) в костном мозге;
- б) лимфоидной ткани;
- в) слизистых оболочках желудочного и кишечного тракта.

Тяжесть лучевого поражения тканей и органов зависит от величины поглощенной энергии – мощности дозы излучения, продолжительности и кратности облучения, определяющих степень радиационного поражения тканей и клеток, а также *резистентности*¹⁷ организма и его отдельных органов и систем.

1.3.3.1. Лучевое поражение кожных покровов

Согласно классификации лучевых поражений кожи различают острую и хроническую форму. Острые лучевые поражения кожи могут проявляться в виде ранней лучевой реакции (эритемы, сопровождающейся зудом и развивающейся на протяжении первых – вторых суток после облучения при дозе не менее 3 Гр), а также лучевой алопеции, которая характеризуется выпадением волос по истечении двух-четырёх недель после облучения дозой не менее 3,75 Гр. Лучевое повреждение кожи может проявиться также в виде острого лучевого дерматита, основные симптомы которого появляются в течение двух месяцев после облучения. От других дерматитов *эритематозную форму* поражения отличает багрово-синюшный цвет кожи, выпадение волос, боль и зуд. Данная форма облучения наступает при дозе 8 – 12 Гр. Острый болезненный дерматит – еще одно проявление лучевого поражения кожи, которое сопровождается повышенной температурой тела, жжением, а также ярко выраженными болевыми ощущениями.

¹⁵ **Некроз** (от греческого nekrosis – омертвление) – омертвление ткани под влиянием нарушения кровообращения, необратимый процесс омертвления пораженных тканей живого организма.

¹⁶ **Гемодинамика** – движение крови по сосудам, возникающее вследствие разности гидростатического давления в различных участках кровеносной системы.

¹⁷ **Резистентность** – устойчивость различных организмов к тем либо иным неблагоприятным воздействиям.

Данная форма облучения проявляется при дозе не менее 12 – 20 Гр. Эрозия после вскрытия пузырей заживает медленно, отмечается развитие атрофии, а также происходит нарушение пигментации кожи. Острый некротический дерматит развивается в результате лучевого поражения кожи в размере свыше 25 Гр. При этом у больного отмечаются сильный озноб, мучительные головные боли, высокая температура тела, слабость. На коже проявляются отеки, эритемы и пузыри, после вскрытия которых образуются медленно заживающие язвы. Незначительное повреждение рубцов, остающихся после заживления ран, может спровоцировать развитие некроза тканей. Согласно классификации лучевых поражений выделяют две основные формы хронического поражения кожи. Хронический лучевой дерматит – форма поражения, при которой развивается атрофия кожи и сухость. На фоне болезненных трещин могут развиваться утолщения кожного покрова в месте облучения – гиперкератоз, которые также образуются на кожном покрове в результате острого лучевого поражения кожи. Поздний лучевой дерматоз – форма поражения, проявляющаяся в виде *индуративного отека*¹⁸, лучевого рака или поздней лучевой язвы. Индуративный отек является следствием повреждения мелких лимфатических сосудов и нарушения оттока лимфы. Возникает плотный отек, при рассасывании которого может развиваться атрофия тканей.

Клинически радиационные поражения можно идентифицировать по изменениям в кожных покровах и видимых слизистых оболочках. Повреждения появляются при внешнем воздействии β - частиц и γ -излучений с малой энергией. β -частицы проникают в кожу на глубину нескольких миллиметров, воздействуют на верхние – эпидермальный и сосочковый слой кожного покрова.

Прогноз благоприятный при лучевых ожогах легкой и средней степени тяжести с поражением до 5 % поверхности тела. Неблагоприятный прогноз при поражениях более 10 % поверхности тела.

Лечение. Начинают с возможно ранней обработки кожи и волосяного покрова с целью удаления радиоактивных веществ. Для предупреждения болей и трофических расстройств применяют новокаиновые блокады и нейроплегические препараты. Местно применяют препараты, стимулирующие регенеративные процессы и угнетающие развитие инфекции. Антибиотики применяют и против развития сепсиса внутримышечно или внутривенно. В лечении для снятия болей применяют новокаин. В целях снижения воспалительных процессов, предупреждения развития инфекции

¹⁸ **Индуративный отек** развивается в результате поражения не только кровеносных, но и лимфатических сосудов, что ведет к нарушению оттока лимфы, отеку и склерозу кожи и подкожной клетчатки.

и ускорения регенерации местно применяют эмульсию Вишневого, синтомициновую или стрептоцидную эмульсии и др.

1.3.3.2. Острая лучевая болезнь человека

При сочетанном β - и γ -облучении лучевые ожоги, как правило, протекают на фоне лучевой болезни.

Лучевая болезнь (*morbus radiatus*) – характеризуется нарушением функциональной и морфологической деятельности организма в ответ на воздействие ионизирующего излучения. Лучевая болезнь человека может протекать в острой и хронической формах.

Симптомы. **Острая лучевая болезнь** развивается в течение 3–10 суток после воздействия внешнего γ - или γ - – нейтронного облучения; общего фракционированного внешнего γ - β -облучения; сочетанного внешнего γ -облучения и поступления радиоактивных веществ внутрь организма. Тяжесть течения острой лучевой болезни определяется величиной и мощностью дозы:

а) при внешнем облучении или поступивших внутрь организма радионуклидах, обуславливающих **поглощенную дозу** 1–2 Гр, развивается легкая степень острой лучевой болезни. Отчетливых проявлений патологии у человека не наблюдается;

б) в диапазоне поглощенных доз от 2 до 10 Гр развивается **костно-мозговой синдром**¹⁹, острая лучевая болезнь протекает в средней и тяжелой формах;

в) при облучении с поглощенной дозой свыше 10 Гр развивается лучевая болезнь крайней степени тяжести с поражением органов пищеварения (желудочно-кишечный синдром) и центральной нервной системы (церебральный синдром).

В развитии острого течения лучевой болезни выделяют четыре периода:

- **Первый период** первичных реакций на облучение продолжается от 1 до 3 суток. Характеризуется нарушением функций нервной системы. Развивается статическая и динамическая атаксия, судороги, кратковременное возбуждение, сменяющееся угнетением. Аппетит ухудшается или отсутствует. Возможна рвота, жажда, наблюдается гиперемия слизистых оболочек иногда с кровоизлияниями. Усиление перистальтики кишечника сопровождается диареей. В тяжелых случаях повышается температура тела. Изменяется сердечная деятельность (тахикардия), появляется одышка. Работоспособность снижается.

¹⁹ **Костно-мозговой синдром** – развивается при облучении в диапазоне доз 1–10 Гр, средняя продолжительность жизни – не более 40 суток; на первый план выступают нарушения гемопоэза – процесса образования форменных элементов крови.

- При исследовании крови выявляют нестойкий эритроцитоз²⁰ и лейкоцитоз²¹, к третьим суткам – лейкопению (см введение);

- Второй, латентный (скрытый) или период внешнего благополучия длится от 3 до 14 дней. Состояние человека улучшается, клинические признаки болезни исчезают. По внешнему виду больные не отличаются от здоровых. В то же время в организме происходит ряд патологических изменений: продолжается угнетение лимфопоэза – формирование лимфоидных клеток и образование лимфоцитов, в лейкограмме – в процентном соотношении различных видов лейкоцитов наблюдается сдвиг ядра нейтрофилов вправо, уменьшается число эритроцитов и тромбоцитов. К концу периода состояние человека ухудшается. Нарушается функциональное состояние желудочно-кишечного тракта с проявляющейся диареей с примесью крови в фекалиях. Кровотечение из ануса, ноздрей, кровоизлияния на слизистых оболочках. Появляются хрипы, одышка, кашель. У некоторых пациентов начинается выпадение волос;

- Третий период или период выраженных клинических признаков лучевого поражения продолжается в среднем 1,5–2 месяца. В это время наблюдается острый период лучевой болезни, повышается температура тела, снижается аппетит, проявляется жажда. Кожа теряет эластичность, становится сухой, появляются отеки в области конечностей. Нарушается координация движений. Дыхание затруднено, одышка, тахикардия. Появляется слюнотечение, рвота, диарея с примесью крови. Прогрессирующее поражение костно-мозгового кроветворения, возникшее в латентный период, достигает крайней степени выраженности. Наблюдаются множественные кровоизлияния в видимые слизистые оболочки, кожу. Изменяется состав крови – уменьшается количество лейкоцитов и лимфоцитов, медленно снижается число эритроцитов и резко число тромбоцитов.

Глубокая *цитопения*²² составляет основу нарушений иммунитета с последующим снижением защитных свойств организма и формированием инфекционных осложнений экзогенной и эндогенной природы. Нарушение трофики тканей и особенно кожи, слизистых оболочек желудка и кишечника ведут к повышению проницаемости физиологических барьеров, поступлению в кровь токсических продуктов и микробов, развитию *токсемии*²³ и *сепсиса*²⁴.

²⁰ **Эритроцитоз** – патологическое состояние, при котором количество эритроцитов и гемоглобина в крови увеличивается

²¹ **Лейкоцитоз** – изменение клеточного состава крови, характеризующееся повышением числа лейкоцитов. Норма лейкоцитов в крови – $5,5-8,8 \cdot 10^9/\text{л}$, но этот показатель может отличаться в большую или меньшую сторону...

²² **Цитопения** – дефицит одного или нескольких различных видов клеток крови.

²³ **Токсемия** (от др.- греч. *τοξικός* – ядовитый и *αἷμα* – кровь) – отравление организма.

В разгар болезни наблюдаются тяжелые расстройства функций желудочно-кишечного тракта, сопровождающиеся *профузными*²⁵ кровавыми поносами; как правило, наблюдается слюнотечение, быстро наступает истощение, нарушается сердечно-сосудистая деятельность;

- Четвертый период, это период восстановления или исхода болезни. При легкой степени острой лучевой болезни восстановление происходит достаточно быстро и полно. В случае средней тяжести болезни у выживших постепенно от 3 до 6 месяцев восстанавливаются физиологические функции, частично или полностью восстанавливается работоспособность. Возможен переход патологии в хроническую форму течения.

При тяжело протекающей болезни, когда развивается желудочно-кишечный синдром, восстановительный период длится 8–9 месяцев и полного выздоровления не наступает. Снижается иммунитет, ослабляется воспроизводительная способность, сокращается продолжительность жизни. Развитие *церебрального синдрома*²⁶ приводит к смертельному исходу [12].

В табл. 1.4 приводится классификация степени тяжести костномозговой формы острой лучевой болезни.

1.3.3.3. Гибель млекопитающих после облучения

После облучения в дозах более 10 Гр наблюдается гибель млекопитающих в первые трое суток. Патологоанатомические изменения погибших животных в разгар острой лучевой болезни варьируют в зависимости от вида, тяжести поражения и времени после облучения. Гибель животных наблюдается в основном в период первичных реакций «смерть под лучом» и в период разгара болезни. Причины смерти животных – гипоксия, возникающая вследствие нарушения ферментативной деятельности и развития отека легких. После облучения в дозах от 50 до 100 Гр патологоанатомические изменения касаются центральной нервной системы, кровотока и лимфообращения.

При микроскопическом исследовании обнаруживаются изменения в костном мозге, селезенке, лимфоузлах, в стенках капилляров, соединительной ткани [11, 12].

24 **Сепсис** – тяжелое инфекционное заболевание, развивающееся при прогрессировании и распространении инфекционного процесса в организме через кровь.

²⁵ **Профузное кровотечение** – быстрая потеря крови или любое острое кровотечение.

²⁶ **Церебральный синдром** проявляется набором клинических признаков – головной боли, ухудшения речи, памяти, эпилептиформных судорог, потери сознания и комы. Наблюдается при острых и хронических патологиях и воспалительных процессах.

Таблица 1.4

Классификация лучевых поражений человека при кратковременном однократном общем облучении фотонами в зависимости от тканевых поглощенных доз

Доза, Гр	Заболевание	Проявления	Последствия облучения
> 0,25	Симптомы отсутствуют	Отсутствуют	–
0,25–0,5	Реакции отдельных систем организма	Временное изменение состава крови	Состав крови быстро нормализуется. Благополучный прогноз лечения
0,5–0,1		Чувство усталости, иногда рвота, умеренное изменение состава крови	Состав крови нормализуется. Благополучный прогноз лечения
1–2	Острая лучевая болезнь I степени. Легкое течение заболевания	Чувство усталости, иногда рвота, умеренное изменение состава крови	Состав крови нормализуется. Благополучный прогноз лечения
2–4	Острая лучевая болезнь II степени. Заболевание средней тяжести	В первые сутки тошнота, рвота, лейкопения	В 20% случаев возможен смертельный исход через 2–6 недель после облучения
4–6	Острая лучевая болезнь III степени. Тяжелое течение	Тошнота, рвота, лейкопения, подкожные изъязвления	В 50% случаев возможен смертельный исход в течение месяца после облучения
< 6	Острая лучевая болезнь III степени. Крайне тяжелое течение	Рвота через 1–2 часа после облучения. В крови почти исчезают лейкоциты. Подкожные изъязвления, кровоизлияния. Кровавый понос	В 100% случаев наступает смерть от инфекционных заболеваний или кровоизлияний

1.3.3.4. Хроническая лучевая болезнь человека

Хроническая лучевая болезнь может быть следствием острой лучевой болезни.

Симптомы. Хроническая лучевая болезнь протекает в три периода: а) период формирования заболевания; б) период восстановления; в) период последствий и исхода болезни:

а) период формирования заболевания соответствует времени накопления основной доли суммарной лучевой нагрузки. В этот период формируются клинические признаки хронической лучевой болезни с характерными для нее проявлениями. Данному периоду предшествует так называемая доклиническая стадия в виде неспецифических, адаптивных реакций. При снижении уровня облучения эти реакции могут исчезать, и тогда типичные признаки хронической лучевой болезни не проявляются. Возрастание интенсивности или накопление определенной суммарной дозы облучения ведет к появлению признаков поражения в наиболее радиочувствительных органах и системах, в первую очередь, в кроветворной;

б) период восстановления наступает при прекращении облучения, он характеризуется преобладанием репаративных процессов в наиболее радиопоражаемых тканях, а также нормализацией функциональных нарушений в других системах;

в) период последствий хронической лучевой болезни длится наиболее долго. В эти сроки может развиваться ряд патологических состояний и заболеваний: лейкоз, опухоли и т.п.

Диагноз. При диагностике хронической лучевой болезни анализируют клинические симптомы и учитывают данные дозиметрии и радиометрии.

Лечение. Лечение проводят с учетом степени и периодов течения лучевой болезни. С целью профилактики осложнений инфекционной патологией назначают антибиотики и *нитрофурановые*²⁷ препараты. Сульфаниламиды из-за лейкопенического действия (см. стр. 8, сноска б) не применяют. Для нормализации функции нервной системы показаны препараты брома, аминазин, димедрол, при ослаблении сердечной деятельности вводят кофеин и другие средства. Проводят заместительную терапию по восполнению клеток крови (переливание крови, введение кровезаменителей). Развитию геморрагического синдрома препятствует применение кальция хлорида, витаминов Р (рутин), С (аскорбиновая кислота) и витамина К.

Профилактика. Профилактика лучевой болезни сводится к защите от воздействия ионизирующих излучений. К основным методам профилактики относят: физический, фармакологический и биологический.

²⁷ **Нитрофураны** – группа антибактериальных средств. Например, фурацилин – лекарственный препарат из группы нитрофуранов.

Противолучевая или фармакохимическая защита осуществляется за 10–60 минут до облучения путем введения радиопротекторов. Известно более трех тысяч химических соединений, оказывающих защитное действие от радиации. Наиболее эффективно применение серосодержащих веществ: цистамина, цистеамина, гаммафоса, а также производных индомелалкиламинов: серотонина и мексамина. Эффективность радиопротекторов усиливается с повышением иммунной реактивности организма, что достигается применением вакцин и сывороток [12].

Биологическая защита сводится к применению адаптогенов – веществ, повышающих общую сопротивляемость организма к радиации (препаратов элеутерококка, женьшеня, китайского лимонника, а также прополиса, *сальмозана*²⁸).

1.4. Радиочувствительность и радиоустойчивость

Причины и механизмы, определяющие естественную радиочувствительность биологических объектов, до настоящего времени полностью не раскрыты, но многие аспекты хорошо изучены. Например, факторы, влияющие на радиоустойчивость растений по классификации Д. М. Гродзинского разделяются на 3 группы:

а) к первой группе отнесены факторы, обусловленные филогенезом вида, которые нельзя модифицировать: анатомическое строение растений, размер семян, объем клеточных ядер и хромосом, число хромосом и плоидность;

б) во вторую группу входят факторы, характеризующие функциональное состояние отдельных структур клетки и физиологическое состояние генома: этап онтогенеза, наличие антиоксидантов и макроэргов²⁹ содержание сульфгидрильных групп (SH-групп), способность к пострadiационному восстановлению;

в) в третью группу факторов входят факторы внешней среды, такие как погоднo-климатические условия и условия минерального питания растений.

Радиобиологические эффекты у растений и животных имеют ряд сходных реакций, таких как наличие критических (наиболее радиочувствительных) клеток, тканей и органов, одинаковые типы хромосомных аберраций, потеря контроля над обменом веществ, образование соматических и гене-

²⁸ **Сальмозан** – иммуномодулятор бактериального происхождения (полисахарид из 0-соматического антигена сальмонелл).

²⁹ **Макроэрги** (макроэргические молекулы) – биологические молекулы способные накапливать и передавать энергию в ходе реакции, это ангидриды фосфорной и карбоновых кислот, а также слабых кислот, тиолов и енолов.

тических мутаций, трансформация клеток, радиационный канцерогенез (опухоли органов).

Реакции живых организмов на ядерное излучение весьма многообразны и определяются параметрами излучения и особенностями организма. Отношение организма к ионизирующему излучению характеризуется радиочувствительностью и радиоустойчивостью (радиорезистентностью). Эти два термина взаимосвязаны и с разных сторон отражают одно и то же явление – если организм обладает высокой радиочувствительностью, то он характеризуется низкой радиоустойчивостью, и наоборот [8].

1.4.1. Радиоустойчивость органов и систем животных и человека при внешнем облучении

На уровне отдельных органов радиочувствительность зависит не только от радиочувствительности тканей, составляющих данный орган, но и от его функций. При внешнем облучении от источников, находящихся вне организма, облучение обусловлено в основном источниками: γ - и β -излучения, рентгеновского и нейтронного. Повреждающая способность внешнего облучения зависит от энергии излучения, продолжительности непрерывного либо фракционированного облучения, защитных мероприятий и др.

Органы и ткани организмов отличаются по уровню радиочувствительности, следовательно, и последствия внешнего облучения органов и тканей будут различаться.

1. **Кожа** и ее производные. Это активно обновляющиеся клеточные системы, поэтому в целом кожа весьма радиочувствительна. Количественное определение радиочувствительности стволовых клеток эпидермиса показало, что эпидермальные клетки хорошо восстанавливают сублетальные повреждения. Доза, вызывающая радиационное поражение клеток кожных покровов, составляет ~ 5 Гр, в то время как для кроветворных клеток в десять раз меньше $\sim 0,5$ Гр.

Принято считать, что максимально переносимая кожей доза рентгеновского излучения при однократном внешнем воздействии составляет около 10 Гр. При больших дозах возникают дерматиты, а затем и язвенные поражения.

2. **Семенники.** Повышенная радиочувствительность мужских половых желез известна очень давно. Еще в 1903 г. Г. Альберс-Шонберг показал возможность радиационной стерилизации яичек кроликов и морских свинок, а И. Бергонье и Л. Трибондо, изучая радиационные повреждения семенников, смогли сформулировать упоминавшуюся выше зависимость радиочувствительности клеток от интенсивности деления и степени дифференцировки.

Источником самообновления зародышевых клеток при сперматогенезе служит размножение спермогониев. Одни из них (тип Б), по аналогии со стволовыми клетками костного мозга, путем ряда последовательных актов деления и созревания служат родоначальниками функциональных клеток – сперматозоидов, другие (тип А) – источником новых («стволовых») спермогониев.

Вследствие крайне высокой радиочувствительности половых клеток на ранних стадиях развития уже при дозах 0,5–1 Гр у млекопитающих происходит массивное клеточное опустошение семенников, а выше 2–4 Гр наступает стерильность. Зрелые клетки – сперматозоиды, – напротив, крайне радиорезистентны.

3. **Яичники.** В яичниках взрослых животных содержится популяция незаменимых *ооцитов*.³⁰ Воздействие однократного облучения в дозе 1–2 Гр на оба яичника вызывает временное бесплодие, а увеличение дозы до 3–6 Гр приводит к развитию стойкого бесплодия.

4. **Органы зрения.** Известны два типа поражения глаз – воспалительные процессы в конъюнктиве и склере при дозах, близких к вызывающим поражение кожи, и катаракта – при поглощенных дозах излучения 3–10 Гр в зависимости от вида животных. Особенно опасны в этом отношении нейтроны, эффективность которых в 3–9 раз выше, чем γ - и рентгеновского излучения. Причины образования катаракты полностью не выяснены. Наиболее убедительна точка зрения о ведущем значении первичного поражения клеток ростковой зоны хрусталика и относительно меньшей роли нарушения его питания.

5. **Органы пищеварения.** Наибольшей радиочувствительностью обладает тонкий кишечник. Далее по снижению радиочувствительности следуют полость рта, язык, слюнные железы, пищевод, желудок, прямая и ободочная кишки, поджелудочная железа, печень.

6. **Сердечно-сосудистая система.** В сосудах большей радиочувствительностью обладает наружный слой сосудистой стенки, что объясняется высоким содержанием коллагена. Сердце считается радиоустойчивым органом, однако при локальном облучении в дозах 5–10 Гр можно обнаружить изменения миокарда³¹. При дозе 20 Гр отмечается поражение эндокарда³².

³⁰ **Яйцеклетка** (науч. ооцит, реже. овоцит) – женская гамета животных, высших растений, а также многих водорослей и других протистов, которым свойственна оогамия.

³¹ **Миокард** – средней слой сердечной мышцы. Составляющего основную часть массы сердца.

³² **Эндокард** – внутренний слой оболочки стенки сердца позвоночных; представляется в виде довольно тонкой соединительнотканной оболочки.

7. **Органы дыхания.** Легкие взрослого животного – стабильный орган с низкой пролиферативной активностью³³. Последствия облучения легких проявляются не сразу. При локальном облучении может развиваться радиационный пневмонит³⁴, воспаление дыхательных путей, приводящих к фиброзу³⁵. Это часто лимитирует лучевую терапию. При однократном воздействии γ -излучения LD50 для человека составляет 8–10 Гр, а при фракционировании в течение 6–8 недель – 30–50 Гр.

8. **Органы выделения.** Почки достаточно радиоустойчивы. Однако облучение почек в дозах более 30 Гр за 5 недель может привести к развитию хронического нефрита.

9. **Центральная нервная система.** Это высокоспециализированная ткань человека радиоустойчива. Клеточная гибель наблюдается при дозах свыше 100 Гр.

10. **Эндокринная система.** Она обладает относительной радиоустойчивостью.

11. **Кости, сухожилия.** У взрослых они радиоустойчивы, в детском возрасте или при заживлении переломов радиочувствительность повышается. Наибольшая радиочувствительность скелетной ткани характерна для эмбрионального периода.

12. **Мышцы.** Мышечная ткань животных высоко радиоустойчива.

Таким образом, при внешнем облучении степень поражения органов можно расположить в следующей последовательности (от большего к меньшему поражению):

органы кроветворения, костный мозг, селезенка, лимфатические железы → половые железы → желудочно-кишечный тракт → печень, органы дыхания → железы внутренней секреции (надпочечники, гипофиз, щитовидная железа, островки поджелудочной железы, парашитовидная железа) → органы выделения, мышечная и соединительная ткань, хрящи, нервная ткань [8].

³³ **Пролиферация** – это процесс размножения клеток, приумножающий объем тканей. Интенсивно протекает в период эмбрионального развития.

³⁴ **Пневмонит**, или пульмонит – интерстициальное воспаление сосудистой стенки альвеол, сопровождающееся их рубцеванием.

³⁵ **Фиброз** (лат. fibrosis) – разрастание соединительной ткани с появлением рубцовых изменений в различных органах, возникающее, как правило, в результате хронического воспаления.

1.4.2. Радиоустойчивость органов и систем животных и человека при внутреннем облучении

Внутреннее облучение развивается при поступлении радионуклидов в организм. Попадать в организм животных и человека радионуклиды могут в виде аэрозолей, атомов, молекул вместе с продуктами питания (90 %), с питьевой водой (5–8 %), с вдыхаемым воздухом (2–5 %). Поступая в организм, радионуклиды накапливаются в отдельных органах и тканях в зависимости от типа радиоактивного изотопа. Например, равномерно по всему телу распределяются: тритий, углерод, железо; в костях накапливаются: кальций, стронций, барий независимо от того, радиоактивны они или нет; в щитовидной железе йод и технеций.

При внутреннем облучении степень поражения организма зависит от:

- а) количества поступивших в организм радионуклидов,
- б) распределения их по органам и системам,
- в) от скорости их выведения.

Обменные процессы в организме приводят к выведению радионуклидов. Скорость выведения различных радионуклидов из различных органов не одинакова.

Для оценки скорости выведения радионуклидов из организма человека и животных используют характеристику – **период биологического полувыведения** – время, в течение которого количество данного радионуклида в органе или организме уменьшится вдвое.

Известно, что выводящими системами из организма являются желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), легкие, кожа и почки. Установлено, что при внутреннем облучении относительно активно противостоять воздействию ионизирующих излучений могут печень, почки, иммунная и кровеносная системы.

Почки. Почки играют основную роль в ускорении вывода радионуклидов из организма, являясь прекрасным пассивным фильтром, очищающим кровь от токсинов и продуктов распада. Они вырабатывают мочу для ускорения вывода ядов из организма, в том числе и радионуклидов, регулируют состав жидкостей организма, поддерживают кислотно-щелочной баланс крови, влияющий на чувствительность к радиации. Факторами, перегружающими почки, являются стресс, повышенное содержание мяса в рационе питания, зашлакованность организма и др. Нарушение работы почек повышает нагрузку на другие органы выделения. ***Если шлаки и продукты распада не удаляются с мочой, то они выделяются через поры кожи с потом.*** Вещества, улучшающие работу почек: магний, кальций, витамин С. Самым уникальным продуктом, дающим почкам практически все необходимые вещества, является гречиха. Зашлакованность почек удаляют по специальной методике. ***Нормальная работа почек способствует выведе-***

нию радионуклидов из организма. Для ускорения выведения радионуклидов из организма иногда целесообразно применять мочегонные средства, занятия спортом, массаж и др.

Печень. Печень задерживает радиоактивные вещества, пытается их «разрушить» и обеспечивает выведение из организма естественным путем. Работу печени ухудшают повышенное содержание в рационе питания жиров, углеводов, переизбыток и злоупотребление алкоголем, зашлакованность. Чтобы печень выполняла свои функции, в том числе связанные и с выведением радионуклидов из организма, она должна быть здоровой. Улучшают работу печени витамины групп В, С, аминокислоты, содержащие серу, пониженное содержание жиров в рационе питания, соблюдение режима труда и отдыха, периодическое очищение печени от шлаков по специальным методикам.

Иммунная система. Иммунная система защищает человека от вирусов, бактерий, аллергенов, токсинов и от роста злокачественных клеток. В состав иммунной системы входят: селезенка, вилочковая железа (тимус), костный мозг, кровь, лимфоциты. Сущность защиты от инородных включений заключается в следующем. Вилочковая железа, селезенка, костный мозг, лимфоузлы могут отличать клетки «свои» от «чужих», т.е. любое инородное образование (вирус, раковая клетка, радиоактивное вещество и др.) выявляются и окружаются *В-клетками*³⁶, затем атакуются и уничтожаются *Т-клетками*³⁷. Хотя радиоактивные вещества Т-клетками не разрушаются, но после этого инородные тела попадают в лимфу и выводятся из тела [8, 12]. В организмах животных действуют механизмы, защищающие от различных негативных воздействий.

Ухудшают работу иммунной системы:

- а) дефектные белки, возникшие за счет воздействия радиации на соматические клетки;
- б) перегрузка лимфатических узлов (фильтров) иммунной системы продуктами распада, микробами и раковыми клетками;
- в) недостаток в рационе питания витаминов А, Е, С, группы В, микроэлементов селена и цинка;
- г) подавленные функции почек и печени за счет их зашлакованности;
- д) стрессы, повлекшие расстройства обмена веществ;

³⁶ **В-лимфоциты** (В-клетки, от bursa fabricii птиц, где впервые были обнаружены) – функциональный тип лимфоцитов, играющих важную роль в обеспечении гуморального иммунитета, осуществляемого белками – антигенами, растворимыми в крови и других жидкостях организма.

³⁷ **Цитотоксические Т-клетки** способны непосредственно атаковать и уничтожать микроорганизмы, а иногда даже собственные клетки организма. По этой причине их называют клетками-киллерами.

ж) нарушения в рационе питания и некачественная питьевая вода.

Для поддержания работы иммунной системы необходимо устранить причины, ухудшающие ее работу, и стимулировать работу печени и почек путем введения в рацион повышенных количеств витаминов В₆ и С, продуктов кормления животных, богатых микроэлементами кальция и магния.

Кроветворная система защищает живые организмы от воздействия ионизирующих излучений за счет поддержки кислотно-щелочного равновесия. Этот баланс важен, так как обеспечивает транспортировку как питательных веществ, так и токсинов. Здоровая кроветворная система животных способна поддерживать работоспособность организма при облучении.

Негативные воздействия на кровеносную систему оказывают:

- а) облучение кроветворной системы ионизирующими излучениями;
- б) неоптимальное соотношение натрия и калия в крови (должно быть от 7 до 1 – тогда условия для размножения бактерий наименее благоприятны);
- в) заболевания печени, желудка, почек, легких;
- г) дефицит в крови железа, фолиевой кислоты, витаминов С, В₁₂, микроэлемента магния.

Улучшает состав крови сбалансированный рацион питания.

1.5. Отдаленные последствия облучения

Отдаленные последствия облучения имеют очень сложный характер и могут проявиться через несколько десятилетий после воздействия. Существенное влияние на проявление отдаленных последствий оказывают физиологические особенности организма человека и животных, доза, мощность дозы, вид излучения. Различают опухолевые и неопухолевые формы отдаленных последствий.

Опухолевые эффекты – последнее звено длинной цепи изменений, которые предшествуют развитию злокачественных образований. Ионизирующее излучение может приводить к появлению опухолей почти во всех тканях – как непосредственно подвергнутых облучению, так и в некоторых случаях в тех, которые не подвергались облучению. Сочетанное действие радиационных и других биохимических факторов увеличивает частоту появления опухолей у млекопитающих, включая человека.

Неопухолевые формы включают гипопластические³⁸ состояния, выражающиеся в поражении функций костного мозга в области кроветворения, склеротические процессы и дисгормональные состояния.

³⁸ **Гипопластическая** анемия (греч. hupo- + plasis формирование, образование) – заболевание системы крови, характеризующееся угнетением кроветворной функции костного мозга и проявляющееся недостаточным образованием эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов или только одних эритроцитов.

1.6. Факторы, влияющие на выраженность биологических эффектов после облучения

Факторы, способные изменять (ослаблять или усиливать) радиочувствительность клеток, тканей и организма в целом, называются радиомодифицирующими агентами.

Радиомодификация – искусственное ослабление или усиление реакций биологических объектов на действие ионизирующих излучений; способ управления радиочувствительностью с помощью изменения условий, в которых происходит облучение того или иного организма. Радиобиологическим эффектом можно управлять двумя способами: введением в организм чуждых ему веществ (например, *радиопротекторов*) и направленным стимулированием защитных функций организма – введением веществ, свойственных данному организму.

Радиозащитные средства – средства защиты от поражающего действия ионизирующего излучения – могут быть химическими, биологическими или физическими.

Радиопротекторы. В настоящее время *вещества, способные полностью защитить человека и животных от действия ионизирующего излучения не известны*, но открыто множество веществ, способных снизить негативное воздействие радиации. К таким препаратам относятся, например, азид и цианид натрия, вещества, содержащие сульфгидрильные группы³⁹ и т.д. Эти вещества входят в состав радиопротекторов.

Введение радиопротекторов перед облучением в среду с биологическими объектами или в организм животных и человека снижает поражающее действие ионизирующего излучения. Радиопротекторы частично предотвращают возникновение химически активных радикалов, которые образуются под воздействием излучения. Механизмы действия радиопротекторов различны. Одни из них вступают в химическую реакцию с попадающими в организм радиоактивными изотопами и нейтрализуют их, образуя нейтральные вещества, легко выводимые из организма. Время действия радиопротекторов различно. Существует несколько разновидностей радиопротекторов: таблетки, порошки и растворы.

Радиопротекторы – достаточно вредные для организма вещества, поэтому им ищут замену, в частности, замену на вещества, свойственные организму, или на пищевые добавки.

Некоторые пищевые вещества обладают профилактическим радиозащитным действием или способностью связывать и выводить из организма

³⁹ *Сульфгидрильные группы* ферментов микроорганизмов входят в состав антисептических и дезинфицирующих средств. Блокируют окислители, красители, соединения металлов, галогенсодержащие соединения.

радионуклиды. К ним относятся полисахариды (пектин, декстрин, липополисахариды, находящиеся в листьях винограда и чая), этиловый спирт, фенольные и фитиновые соединения, галлаты, серотанин, некоторые жирные кислоты, микроэлементы, витамины, ферменты, гормоны. Радиоустойчивость организмов повышают некоторые антибиотики (биомицин, стрептоцин), наркотики (нембутал, барбамил).

К очень важным радиозащитным соединениям относятся «витамины противодействия». В первую очередь это витамины группы В и С. Известно, что одна аскорбиновая кислота не обладает защитным действием, но она усиливает действие витаминов В и Р. Ионизирующие излучения разрушают стенки кровеносных сосудов, совместное действие витаминов Р и С восстанавливает их нормальную эластичность и проницаемость. Воздействие ионизирующей радиации изменяет состав крови, снижает количество эритроцитов и активность лейкоцитов, а витамины В₁, В₃, В₆, В₁₂ улучшают регенерацию кроветворения, стимулируют ускорение восстановления эритроцитов и лейкоцитов. Воздействие ионизирующей радиации снижает свертываемость крови, а витамины Р и К₁ нормализуют протромбиновый индекс⁴⁰. Несколько повышает устойчивость организма к развитию лучевой болезни парааминобензойная кислота (витамин В₁₀), улучшает показатели крови, способствует восстановлению веса биотин (витамин В₇).

Наиболее перспективными источниками потенциально активных противолучевых средств являются фенольные соединения – это биологически активные вещества лечебно-профилактического действия, необходимые для поддержания жизни и сохранения здоровья. Они повышают прочность кровеносных сосудов, регулируют работу желез внутренней секреции. Например, хорошо лечит местные лучевые повреждения кожи прополис (пчелиный клей), что, главным образом, связано с его фенольными компонентами. Из многочисленного ряда фенольных веществ наибольший интерес вызывают флавоноиды, способствующие удалению радиоактивных элементов из организма. Источниками флавоноидов являются мандарины, черноплодная рябина, облепиха, боярышник, пустырник, бессмертник, солодка. ***Этиловый спирт обладает выраженным профилактическим радиозащитным действием на разнообразные организмы:*** человека, животных, бактерий. При введении в питательную смесь этилового спирта выживаемость бактерий повышается на 11–18 %, спирт защищает от гибели почти всех мышей, облученных дозой рентгеновских лучей 6 Гр. Необ-

⁴⁰ ***Протромбиновый индекс*** (ПТИ). Протромбин – главный фактор коагуляции крови. Является процентным выражением соотношения между временем свертывания контрольной плазмы (выделена из крови здорового человека, имеет стандартное значение) и исследуемой плазмы данного пациента. Норма ПТИ лежит в диапазоне 93-104%.

ходимо отметить, что ЛД₅₀ для мышей составляет в среднем 4,6 – 7,0 Гр (см. таб. 1.2), а ЛД₁₀₀ – 7,0 – 15 Гр.

Угнетенное кроветворение – одно из наиболее серьезных последствий радиационного облучения человека. Поэтому в терапии лучевых поражений чрезвычайно важную роль играют процедуры и лекарственные средства, способные восстановить кроветворные функции организма. Для этого применяют пересадку костного мозга, переливание крови, а также препараты, приготовленные на основе экстрактов разных органов и тканей животных: тимуса, селезенки, печени, костного мозга. В попытках получить наиболее эффективные средства для радиотерапии исследователи обратили внимание на животных, чей организм особенно устойчив к облучению. Обнаружены корреляции между этим свойством и терапевтической эффективностью препаратов, полученных из органов и тканей таких малочувствительных к радиации животных. В этом отношении интересна среднеазиатская черепаха (*Testudo horsfieldi*) с ее феноменальной радиорезистентностью (ЛД₅₀ – 500 Гр). Оказалось, что терапевтическим действием обладают экстракты эмбриональной печени, селезенки и клеток крови черепахи. Их инъекции облученным мышам стимулируют рост численности стволовых клеток, что способствует восстановлению кроветворных функций организма. Они обладают также иммуностимулирующим эффектом.

Существуют вещества, внутриклеточное содержание которых усиливает радиобиологический эффект. Это кислород, гидроперекиси липидов, группа хинонов, известная под названием **радиотоксинов**. Другие эндогенные вещества – тиолы, амины, липофильные антиоксиданты – напротив, проявляют радиозащитные свойства. Идея о зависимости лучевого эффекта от соотношения концентрации некоторых из этих веществ легла в основу концепции «эндогенного⁴¹ фона радиорезистентности». Целенаправленное изменение эндогенного фона радиорезистентности важно в условиях длительного облучения организма, когда предъявляются повышенные требования к длительности воздействия применяемых радиозащитных средств.

Ферментативное восстановление кислорода дает организму более 90 % энергии, поэтому оно не может не влиять на исход радиационного поражения. Присутствие во всех биосредах делает **кислород важнейшим фактором радиочувствительности организма человека**. Из многообразных проявлений радиомодифицирующих свойств кислорода первым было обнаружено ослабление поражения биообъекта при снижении концентрации кислорода в окружающей среде во время облучения. Сейчас радиозащитное действие гипоксии широко известно [11].

⁴¹ **Эндогенный** – внутреннего происхождения.

1.7. Разработка новых радиопротекторов для защиты человека

В настоящее время учеными активно продолжают поиски и разработки новых соединений и веществ, снижающих поражающее воздействие ионизирующей радиации. События на японской атомной станции «Фукусима» послужили толчком к расширению исследований. Проводимые в последние годы эксперименты показали, что введение в кровь пострадавших от сильного радиационного облучения *белка BPI*⁴² (bactericidal/permeability-increasing protein) в 83 случаев из ста помогает избежать фатального исхода.

В Университете медицины Бостона (столица штата Массачусетс США) разработали новый, ранее не применяемый метод защиты от переоблучения организма путем введения естественного белка BPI. Этот белок естественного происхождения подавляет развитие болезнетворных бактерий в кишечнике. Для эксперимента отобрали 50 человек, получивших поглощенную дозу ионизирующего излучения, вызывающую гибель костного мозга. Пострадавшим требовалась пересадка костного мозга. При обследовании выяснилось, что у 23 переоблученных пациентов уровень белка BPI упал в среднем в 71 раз, а у 37 обследованных белок BPI обнаружено не было. Результат обследования был ожидаем, поскольку при повреждении костного мозга снижается продуцирование белых кровяных телец до критического уровня, а те, в свою очередь, как раз и способствуют выработке белка в организме.

Дальнейшие эксперименты проводились на грызунах. Облученных смертельной дозой ионизирующей радиации животных разделили на 3 группы. Первой группе спустя сутки после облучения вводили антибиотик «флюорокинолон» – один из антибиотиков, разработанный в последние десятилетия и применяющийся в стандартной схеме противолучевой терапии; второй группе вводили этот же антибиотик, но параллельно с белком BPI, над третьей – контрольной группой не проводили никаких операций.

Практически все мыши контрольной группы погибли течение 30–40 суток. Введение животным «флюорокинолона» повысило выживаемость на 40 %. Сочетанное воздействие «флюорокинолона» и белка BPI повысило выживаемость животных до 80%. Важно, что оба вещества, «флюорокинолон» и белок BPI, *не дают никаких побочных действий как для здоровых людей, так и для больных* и не наносят никакого ущерба здоровью при лечении. Офер Леви, руководитель исследования, утверждает, что оба медикамента хранятся очень длительное время и вполне пригодны для за-

⁴² *Белок BPI* – бактерицидный белок, увеличивающий проницаемость мембран клеток.

пасания на случай катастроф и аварий, подобных аварии на АЭС «Фукусима».

Вещество, предохраняющее живые организмы от сильного облучения, разработали ученые *Питтсбургского университета*⁴³ в штате Пенсильвания, США. Известно, что в первую очередь радиация повреждает органеллы клеток – митохондрии. Команда специалистов под руководством Валериана Кагана выяснила, что ионизирующее излучение проникая в клетку разрушает мембраны митохондрий и часть внутренних белков *органелл*⁴⁴. Один из митохондриальных белков – «цитохром С» – запускает процесс самоуничтожения клеток. Ученые проанализировали структуру белка и обнаружили участок Met-80, который разворачивается под действием радиации. В итоге цитохром «забывает» о своем первоначальном назначении и разрушает изнутри митохондрию, а потом и всю клетку. Исследователи собрали молекулу поврежденного Met-80 в виртуальной компьютерной «лаборатории» и начали просчитывать ее взаимодействие с различными соединениями. Математическое моделирование показало, что наиболее эффективными блокаторами белка-убийцы являются комбинации *гетероцикла*⁴⁵ имидазола и жирных кислот – олеиновой и стеариновой. Эксперименты в реальной химической лаборатории подтвердили теоретические расчеты. При высокой концентрации нейтрализатора (20:1) окислительный процесс, запущенный поврежденным Met-80, прекращался. В конце исследования ученые проверили свои разработки на популяции живых мышей. Все животные за 11 минут получили дозу облучения в 9,25 Гр. Для мышей LD₅₀ составляет 4,6 – 7 Гр (см. табл. 1.2), а для человека смертельной считается доза ~ 5 Гр.

Первой группе мышей за 10 минут до облучения ввели вещества-нейтрализаторы. Вторая группа получила инъекцию уже после облучения. В контрольной группе грызунов лечение не проводилось. Наблюдения за животными в течение месяца позволили установить, что в первой группе смертность составила всего 5%, во второй – 40 %, а в контрольной третьей – 80 %. Причем в третьей группе более 50 % особей умерли через две недели после облучения. Таким образом, эффективность соединений имидазола с олеиновой и стеариновой кислотой была доказана. Исследователи считают, что их открытие можно использовать в медицине для защиты органов пациентов во время рентгенографии и радиотерапии. А в случае катастрофы на атомных объектах разработка поможет в спасении пострадавших от переобучения людей.

⁴³ *Питтсбургский университет* – старейший мировой медицинский центр.

⁴⁴ *Органеллы* (от орган и др.-греч. ἔδος – вид) – постоянные компоненты клетки, жизненно необходимые для ее существования.

⁴⁵ *Гетероциклические соединения* (гетероциклы) – органические соединения, содержащие циклы, состоящие из углерода и других веществ.

Вопросы для проверки знаний по главе 1

1. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом α -частиц.
2. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом β -частиц.
3. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом γ -квантов.
4. Что такое линейная плотность ионизации? Как плотность ионизации зависит от энергии излучения и плотности вещества?
5. Особенности линейной плотности ионизации α - частиц, β -частиц и γ -квантов.
6. Биофизические основы действия ионизирующего облучения на организм.
7. Реакция радиолита при воздействии ионизирующего излучения.
8. Реакции биоты на воздействие ионизирующего излучения.
9. Радиобиологический парадокс.
10. Что такое LD 50 и значения LD 50 бактерий, растений, млекопитающих, человека?
11. Как различается действие одинаковых доз радиации, полученных человеком от внешнего и от внутреннего облучения?
12. Как различается действие доз радиации, полученное от разных видов ионизирующего излучения α -частиц, β -частиц и γ -квантов?
13. Радиационная микробиология.
14. Облучение растений (стимуляция, стерилизация, выведение новых сортов, угнетение развития, гибель).
15. Радиоактивное загрязнение сельскохозяйственных растений.
16. Острая лучевая болезнь человека, симптомы.
17. Хроническая лучевая болезнь человека, симптомы.
18. Периоды течения острой лучевой болезни человека.
19. Радиочувствительность и радиостойчивость.
20. Радиочувствительность и радиостойчивость органов и тканей.
21. Радиостойчивость органов и систем при внешнем облучении.
22. Радиочувствительность органов и систем при внешнем облучении.
23. Отдаленные последствия облучения.
24. Факторы, влияющие на выраженность биологических эффектов после облучения.
25. Разработка новых радиопротекторов для защиты человека.

Глава 2. РАЗВИТИЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ И ПОДХОДОВ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

2.1. Опасность воздействия ионизирующей радиации на человека

Несмотря на очевидность вредного воздействия ионизирующей радиации на здоровье людей, сотни ученых во всем мире продолжали работать с источниками, исследуя свойства и физические особенности недавно обнаруженного явления. В начале XX века медицинская статистика только зарождалась и анализа частоты заболеваний исследователей, работающих с радиоактивными излучениями, никто не проводил. Исследователи работали с источниками ионизирующего излучения и подвергались облучению в таких высоких дозах, с которыми человек никогда не сталкивался. В самом начале XX века стали появляться статьи о вредном действии радиоактивного излучения на животных, но полученные экспериментальные данные не были оценены должным образом. Пострадавшие от переобучения ионизирующей радиацией врачи рентгенологи и ученые, работавшие с источниками радиоактивности, недооценивали вред, наносимый облучением, приписывая возникающие заболевания чему угодно, но не действию невидимых лучей.

В 1929 г. у нескольких работниц одной из фабрик в г. Амбир (США) были обнаружены остеогенные саркомы. Во время первой мировой войны заболевшие женщины работали на предприятии, где раскрашивали циферблаты часов и военных приборов люминесцентной краской, содержащей радий. Для удобства работы они периодически брали кисточку в рот и, истончив таким образом ее кончик, обмакивали в краску. Радиоактивные изотопы инкорпорировались⁴⁶ и накапливались в костях. Через 25 лет более 40 женщин погибли от саркомы.

В начале XX века наблюдалось широкое распространение «рака рентгенологов», обусловленное недооценкой канцерогенных свойств рентгеновских лучей. Не редко можно было встретить рентгенолога с ампутированными из – за развития рака кожи кистями рук.

В 1936 г. в память о погибших исследователях, изучавших ионизирующую радиацию, на территории больницы Св. Георга в Гамбурге воздвигли монумент, на котором были высечены 110 имен. Затем список погибших врачей рентгенологов и исследователей эффектов и свойств ионизирующего излучения пришлось расширить до 186. Надпись гласила: «Рентгенологам и радиологам всех наций, врачам, физикам, химикам, техникам, лаборантам и сестрам, пожертвовавшим своей жизнью в борьбе против страда-

⁴⁶ *Инкорпорирование радиоактивных веществ* – поступление радионуклидов в организм человека в процессе жизнедеятельности с пищей и водой через желудочно-кишечный тракт, легкие при дыхании, кожу и др.

ний их ближних. Благодаря им возможно безопасное применение рентгеновских лучей и радия в медицине. Слава их бессмертна».

Больница Св. Георга, на территории которой установлен этот памятник, в настоящее время носит имя Эрнста Генриха Альберс-Шенберга, посвятившего жизнь изучению рентгеновских лучей. Активная работа с ионизирующей радиацией привела к появлению рака кожи руки исследователя, руку пришлось ампутировать. Э. Г. Альберс-Шенберг умер в 1921 г. от метастаз злокачественной опухоли в возрасте 56 лет.

В 1944 г. под руководством итальянского физика Энрико Ферми в университете Чикаго был построен первый в мире атомный реактор. Большинство физиков и инженеров, участвовавших в этом проекте, погибли от рака. Одним из последних был Лео Сциллард. Когда у него диагностировали рак мочевого пузыря, он отказался от операции, выбрал лучевую терапию. «От лучей заболел, лучами исцелюсь» – говорил он. Лео Сциллард самостоятельно рассчитал дозы облучения. Ученому удалось добиться ремиссии⁴⁷ и он прожил еще более пяти лет от начала заболевания. Сциллард умер от инфаркта миокарда [13].

В 1981 г. известные американские эпидемиологи Р. Долла и Р. Пито [14] пришли к заключению, что с действием ионизирующей радиации связано около 2 % всех смертей от злокачественных опухолей, причем три четверти этого количества падает на естественный радиационный фон, четверть – на лечебно-диагностические процедуры и лишь сотая часть – на профессиональное облучение. С этим мнением трудно согласиться в плане столь значительной канцерогенной роли, которую Р. Долл и Р. Пито отводят влиянию естественного радиационного фона Земли.

В настоящее время известно, что низкие дозы ионизирующей радиации (в пределах до 0,1—0,3 Гр), наоборот, обладают антиканцерогенным и общим биостимулирующим действием (гормезис). Эффект гормезиса доказан тысячами экспериментов и практикой применения радоновых ванн в лечебных целях на протяжении нескольких столетий, поэтому стимулирующее действие малых доз радиации не вызывает сомнений.

2.2. Практическая дозиметрия

Для оценки степени негативного воздействия ионизирующего излучения необходимо установить физические характеристики (состав и интенсивность потока частиц и квантов энергии от различных источников радиации), определяющие дозовые нагрузки на облучаемый объект. В конце XIX - начале XX века дозиметрические приборы отсутствовали, поэтому точно оценить уровни доз при воздействии ионизирующей радиации на исследователей радио-

⁴⁷ *Ремиссия в онкологии* – это период, на протяжении которого новообразование значительно уменьшается в размерах или наблюдается полное его исчезновение

логов и врачей рентгенологов было достаточно сложно. Можно было рассчитать полученную дозу, зная основные характеристики источника излучения либо измерить интенсивность излучения с помощью экспозиции фотопленки, использовать электроскоп, определить количество треков в камере Вильсона (она же туманная камера).

Один из первых в истории приборов, позволяющих достаточно точно оценить дозу излучения по количеству следов (треков) заряженных частиц, – камера Вильсона, названная в честь изобретателя, была сконструирована шотландским физиком Чарлзом Вильсоном между 1910 и 1912 г. и сыграла огромную роль в изучении строения вещества.

В 1908 году немецкий физик Ганс Гейгер, работавший в лаборатории Эрнста Резерфорда, предложил принцип работы счетчика «заряженных частиц» как дальнейшее развитие уже известной ионизационной камеры, представлявшей стеклянную колбу с разреженным газом, внутри которой располагались катод и анод. До практической реализации идеи прошло 20 лет и только в 1928 году Вальтер Мюллер под началом Гейгера создает несколько типов счетчиков радиации, предназначенных для регистрации различных ионизирующих частиц.

В этот период создание счетчиков становится острой необходимостью, без которой невозможно было продолжать исследование радиоактивных материалов, поскольку опасность радиоактивного облучения становится абсолютно очевидной. Гейгер и Мюллер разрабатывали несколько моделей счетчиков, чувствительных к каждому виду известных к тому времени излучений: α , β и γ (нейтроны были открыты позже в 1932 году) рис. 2.1.



Рис. 2.1. Схема счетчика Гейгера-Мюллера

Счетчик Гейгера-Мюллера простой, надежный, дешевый и практичный прибор для измерения радиоактивности. Хотя этот прибор и не является самым точным инструментом для изучения отдельных видов частиц или излучений, но хорошо подходит для общего измерения интенсивности ионизирующих излучений, а в сочетании с другими детекторами используется физиками и для точнейших измерений в современных исследованиях.

Приборы, разработанные по принципу оценки ионизирующих излучений в счетчиках Гейгера-Мюллера, широко используются в современных радиологических лабораториях, производствах делящихся материалов, АЭС и центрах ядерной медицины.

2.3. Международная комиссия по радиационной защите и нормирование уровней облучения

Понимание значения проблемы защиты человека от ионизирующего излучения начало формироваться только через несколько десятилетий после открытия явления радиоактивности и широкого применения рентгеновских лучей в медицине. Идея об установлении безвредного для человека количества излучения появилась в 1925 году (Mutscheller, 1925) [15].

Через три года в 1928 г. на втором международном конгрессе по радиологии в Стокгольме (Швеция) была создана неправительственная организация *Международная комиссия по радиационной защите* (МКРЗ). Основной задачей МКРЗ является обоснование и разработка применяемых для всех стран рекомендаций по различным аспектам противолучевой защиты, обеспечивающей предотвращение или сведение к минимуму соматических и генетических последствий воздействия ионизирующего излучения [13].

На первом заседании МКРЗ в 1928 г. были обоснованы, одобрены и приняты временные правила защиты организма человека от действия ионизирующего излучения, которые состояли из 5 разделов и включали рекомендации по *продолжительности рабочего дня* и мерам защиты от действия рентгеновского излучения и излучения радия. МКРЗ тесно сотрудничает с Международной комиссией по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ), Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), научным комитетом ООН по действию атомной радиации, Международной электротехнической комиссией, Международной организацией труда, Международной организацией питания и сельского хозяйства (ФАО - продовольственная сельскохозяйственная организация ООН).

В этот период считалось, что негативное влияние ионизирующих излучений на живые организмы, включая и человека, ограничивается величиной дозового воздействия. Такой подход предполагал, что эффекты воздействия излучений на человека имеют порог, а степень поражения ионизирующей радиацией подчиняется *линейной зависимости – чем больше доза – тем больше эффект*. Исходя из этих положений в 1934 году впервые в истории радиационной защиты МКРЗ для работающих с радиоактивными веществами принимает в качестве предельно допустимой экспозиционной дозы значение **0,2 Р/день**.

По результатам радиобиологических исследований, одновременно проводившихся в США, Японии, Англии, Франции, СССР и других странах, было установлено, что некоторые органы тела человека (кожа, кроветворные органы, хрусталик глаза и половые железы) являются критическими для выбора допустимых уровней облучения.

В 1953 г. на совещании в Копенгагене МКРЗ вводит новую единицу поглощенной дозы – рад, рекомендованы величины предельно допустимого содержания радионуклидов в теле человека, воздухе производственных помещений и воде. В этот период допустимая доза облучения всего тела для профессиональных работников составляла **0,3 Р (рентген) в неделю**. Впервые были даны рекомендации о допустимых уровнях облучения ограниченных групп населения, составляющие **0,1 часть** дозы для профессиональных работников.

В 1956 г. МКРЗ рекомендовала предельно допустимую дозу облучения для профессиональных работников **5 бэр/год**, а в 1958 г. одобрила величину дозы разового облучения профессионалов для случаев крайней необходимости не более **12 бэр** и величину дозы аварийного облучения не более **25 бэр**. Было рекомендовано также считать генетически значимой дозой для населения величину более **5 бэр**, полученную в течение тридцати лет.

В Рекомендациях 1959 г. была сформулирована рабочая гипотеза о линейной и *беспороговой зависимости радиационных эффектов* от дозы облучения. До этого МКРЗ **более 20 лет** при разработке рекомендаций по радиационной защите исходила из концепции порогового действия ионизирующего излучения, то есть из представления, что биологические эффекты наблюдаются после превышения определенной пороговой величины [16].

Позднее в 1977 г. в публикации 26 МКРЗ были предложены рекомендации исходя из новой концепции, основой которой является представление *о беспороговом действии* ионизирующего излучения и линейной зависимости доза – эффект для отдаленных соматических⁴⁸ и генетических последствий, которые носят стохастический (случайный) характер [17]. Исходя из концепции о беспороговом действии ионизирующего излучения важное практическое значение приобретает оценка величины *приемлемого риска и соотношения польза – вред* от воздействия ионизирующего излучения.

2.4. Радиационный риск

Риск – это мера количественного измерения опасности, включающая количественные показатели ущерба от воздействия того или иного негативного фактора, в том числе и ионизирующие излучения, включая степень вероятности возникновения опасности.

По современным представлениям радиационной защиты человека считается, что для обеспечения безопасности при нормировании уровней облучения ионизирующими излучениями необходимо учитывать существо-

⁴⁸ *Соматические эффекты* – эффекты, проявляющиеся непосредственно у самого облученного индивидуума в отличие от генетических эффектов, которые могут проявиться у потомства облученного индивида.

вание двух типов биологических последствий воздействия: пороговых (детерминированных) и стохастических (вероятностных), не имеющих порога.

Детерминированные эффекты или не стохастические, причинно обусловленные эффекты. Это неизбежные, клинически выявляемые вредные биологические эффекты, возникающие при облучении, в основном, большими дозами, в отношении которых предполагается существование порога, ниже которого эффект отсутствует, а выше – тяжесть эффекта зависит от дозы. Проявляются детерминированные эффекты острой или хронической лучевой болезнью, лучевыми ожогами (местные лучевые поражения), катарактой хрусталика глаз, клинически регистрируемыми нарушениями гемопоэза, временной или постоянной стерильностью и другими нарушениями жизнедеятельности организма.

Стохастические эффекты – это биологические эффекты излучения, не имеющие дозового порога. Предполагается, что вероятность таких эффектов пропорциональна дозе, а тяжесть их проявления не зависит от дозы. Это канцерогенные – злокачественные опухоли, лейкозы и генетические эффекты, – наследственные болезни, обусловленные генными мутациями.

Проявление стохастических эффектов оценивают с помощью **эффективной (эквивалентной)** дозы. Поскольку стохастические эффекты имеют вероятностную природу и длительный латентный⁴⁹ (скрытый) период, измеряемый десятками лет после облучения, эти эффекты трудно обнаружить и связать с переобучением за долго до проявления эффекта.

В 1977 году МКРЗ предложила новую методологию нормирования уровней облучения. Взамен концепции критических органов предлагалось определять **риск возникновения** в них стохастических эффектов облучения.

2.4.1. Риск в системе нормирования и методология оценки риска

Оценка риска является одним из наиболее эффективных инструментов нормирования. В основу новой методологии оценки безопасных уровней воздействия радиоактивных излучений был заложен принцип – **риск возникновения стохастических эффектов от облучения ионизирующей радиацией должен быть сведен к уровню, сравнимому с рисками от других видов деятельности человека, условно считающихся безопасными.**

В современном нормировании радиационного воздействия использована концепция приемлемого риска. В настоящее время **концепция приемлемого риска** в сфере радиационной безопасности принята во всех странах,

⁴⁹ **Латентный период** (от лат. latens – скрытый) – время между началом действия раздражителя и возникновением ответной реакции.

где широко используются ядерные технологии. В рамках новой концепции для обоснования пределов доз облучения профессиональных работников рекомендовано принять годовую вероятность смерти от злокачественных опухолей, связанную с профессиональной деятельностью, такой же, как и в других *радиационно «безопасных»* отраслях промышленности. Такая вероятность составляет $n \cdot 10^{-3}$ усредненного за жизнь годового риска смерти. Для населения была принята величина приемлемого усредненного за жизнь годового риска смерти $> n \cdot 10^{-5}$. Именно эти фундаментальные принципы легли в основу регламентации радиационного воздействия.

Исходя из существующих к началу XXI века знаний о воздействии ионизирующих излучений в публикации № 60 МКРЗ (1990 год) [18] были введены следующие подходы к нормированию радиационного фактора.

1. Концепция нулевого риска

Концепция нулевого риска в отношении радиационного фактора заключается в том, что воздействие на организм человека ионизирующего излучения носит пороговый характер и проявляется только при дозах, превышающих предельно допустимое значение. Одним из очевидных принципов нормирования радиационного фактора должно быть исключение проявления детерминированных эффектов. Это означает, что допустимая доза облучения должна быть заведомо ниже пороговой, при которой проявляются детерминированные эффекты облучения. Следовательно, условия функционирования ядерных объектов, гарантирующие непревышение ПДД, обеспечивают нулевой риск неблагоприятных последствий.

2. Беспороговая концепция

В публикации МКРЗ № 60 принята концепция линейной и беспороговой зависимости радиационных эффектов от дозы облучения, основанная на следующих положениях:

а) существует не равная нулю вероятность стохастических соматических и генетических эффектов облучения при сколь угодно малой дозе облучения;

б) вероятность эффекта облучения линейно зависит от дозы.

Исходя из новых знаний о биологических эффектах, связанных с воздействием радиации на организм, был принят предел эффективной дозы для *персонала* на уровне **20 мЗв/год** в среднем за любые 5 последовательных лет, поскольку считалось, что непревышение данного предела облучения предупредит возникновение детерминированных эффектов в отдельных органах. Методология нормирования уровней облучения, разработанная МКРЗ, и пределы эффективной дозы практически без изменений были использованы при разработке «Норм радиационной безопасности (НРБ-99, НРБ-99/2009)» [19, 20], в основу которых положен принцип ALARA (As Low As Reasonably Achievable – настолько низко, насколько это практически достижимо).

2.4.2. Проблема малых доз

Вокруг гипотезы о линейном беспороговом воздействии малых доз радиации на биологические объекты уже несколько десятилетий идут острые дискуссии. В исследованиях, выполненных Еленой Борисовной Бурлаковой с коллегами [21], на основе обширного экспериментального материала доказано, что низкоинтенсивное облучение способно вызвать непредсказуемые и значительные по последствиям эффекты в состоянии биологических объектов и систем. По мнению ряда авторов зависимость радиационного эффекта от облучения малыми дозами оказывается нелинейной и в определенных интервалах низкоинтенсивного воздействия наблюдается более значительный эффект, чем при облучении объекта более высокими дозами [21].

Механизм такого значительного эффекта при небольших дозах облучения заключается в том, что радиация, как и другие поллютанты и неблагоприятные факторы не только нарушает функционирование живых структур, но и активизирует защитные системы. Интенсивность репарационных процессов зависит от мощности и дозы облучения и при *низких уровнях* воздействия *сигнальные системы не срабатывают* и не запускают механизмов репарации. В результате при воздействии малых доз облучения возникает более значительный эффект, чем при действии многократно большей дозы. При дальнейшем увеличении дозового воздействия ионизирующего излучения рост облучения приводит к тому, что включаются механизмы репарации. В результате в диапазоне более высоких дозовых воздействий в процессе нарастания дозы радиации эффект снижается до тех пор, пока не будет исчерпан резерв репарации (рис. 2.2).

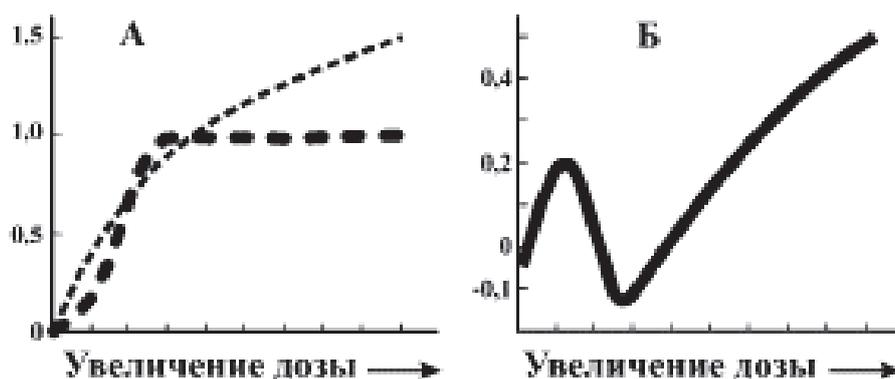


Рис. 2.2. Схема ответа организма на низкоуровневое радиационное воздействие. (По оси абсцисс – доза, по оси ординат величина эффекта в относительных единицах)

На рис 2.2 (А) – левый график, пунктиром обозначено повреждающее действие; точками – действие систем восстановления (репарации), а на правом графике (Б): результирующая дозовую зависимость. На графике (А) кривая доза – эффект выходит на плато, поскольку при увеличении дозового воздействия эффект не нарастает, и когда возможности репарации будут исчерпаны, начинает проявляться линейная зависимость эффекта от дозы. Сложение взаимодействия первичного эффекта воздействия ионизирующего излучения и результата репарации при низких дозах дает S-образную кривую ответа организма на воздействие малых доз радиации – показано на правом графике (Б).

Признание гипотезы о беспороговом действии радиации изменило представление о предельно допустимой дозе (ПДД). Исходя из того, что любая доза, превышающая фоновые уровни, может оказывать негативное влияние на здоровье людей, уровни дополнительного радиационного воздействия следует сводить до минимума. Наиболее серьезными из всех последствий длительного облучения человека при малых дозах являются заболевания раком и генетические заболевания. Несмотря на недостаточную надежность таких оценок, они необходимы, поскольку принимают в расчет социально значимые ценности при оценке радиационного риска и показывают актуальность дальнейшего изучения отдаленных последствий воздействия ионизирующих излучений на население.

Использование энергии делящихся материалов либо источников ионизирующих излучений предполагает защиту человека от негативного воздействия, для чего необходимо определить степень риска, являющегося приемлемым и оправданным в настоящее время для общества с учетом социальных и экономических выгод, которые можно ожидать от использования ядерных технологий.

2.4.3. Концепция приемлемого риска

Открытие беспорогового воздействия для ряда отдаленных эффектов облучения привело к пониманию проблемы ограничения степени риска, который можно принять как приемлемый и оправданный в настоящее время для общества.

Концепция приемлемого риска основывается на том, что общество для удовлетворения своих потребностей готово пойти на определенный риск неблагоприятных последствий от воздействия опасных техногенных факторов, в частности, радиации, компенсируемый получаемыми социальными, экономическими и экологическими выгодами. Такой уровень риска называют приемлемым.

В публикации 103 МКРЗ (2007 г.) [17] были представлены обновленные рекомендации, в которых на основе полученных новых данных о медико-биологических радиационных эффектах пересмотрены, уточнены или по-

лучили свое развитие ранее принятые положения по обеспечению радиационной *безопасности населения*. В новых Рекомендациях МКРЗ скорректированы подходы к расчету и оценке *эквивалентных и эффективных доз* с учетом взвешивающих коэффициентов *для отдельных видов излучения и новых коэффициентов для тканей и органов*, приведены новые коэффициенты риска возникновения стохастических эффектов.

Рекомендации поддерживают три фундаментальных принципа радиационной защиты:

- 1) *обоснование*,
- 2) *оптимизация*,
- 3) *применение дозовых пределов с уточнением применительно к источникам ионизирующего излучения и к облучаемым индивидуумам*.

Используемые в предыдущих Рекомендациях МКРЗ в качестве основы концепции «практической деятельности» и «вмешательства» в новых Рекомендациях заменены в рамках системы радиационной защиты на идентификацию «ситуаций облучения» с выделением трех видов ситуаций:

- 1) *планируемого облучения*,
- 2) *существующего облучения*,
- 3) *аварийного облучения*.

При этом фундаментальные принципы обоснования и оптимизации защиты применяются ко всем упомянутым ситуациям с акцентом на *принцип оптимизации защиты*. В связи с расширением практической деятельности с использованием источников ионизирующего излучения в новых Рекомендациях приведены подходы к разработке основ радиационной защиты *окружающей среды*.

2.5. Антропоцентрический и экоцентрический подход в нормировании уровней облучения

В конце XIX начале XX века воздействие радиоактивного излучения на людей недооценивалось. В полной мере понимание опасности облучения человека и в первую очередь профессионалов пришло в науку только в середине 20 годов (Mutscheller, 1925) [15]. Понятно, что в этой ситуации вопрос о защите биоты, биоценозов и экосистем не стоял перед обществом и исследователями, изучающими воздействие радиации. Несмотря на это, первые наблюдения за воздействием радиации в природных экосистемах были проведены в конце 20-х – начале 30-х годов XX века в регионе с повышенным природным радиационным фоном в Рудных горах на территории современной Чехии в местах выхода на земную поверхность урановых руд (Joachimsthal). Но потребовались долгие годы, чтобы пришло понимание степени опасности радиационного облучения для биосферы и отдельных видов животных и растений.

Ситуация, когда воздействию ионизирующих излучений на биологические системы и отдельных представителей флоры и фауны не уделялось должного внимания, просуществовала до 50-х гг. XX века. В эти годы в США, СССР, Англии и Франции бурно начинает развиваться ядерная промышленность, строятся заводы по производству делящихся материалов. Сбросы с заводов, производящих изотопы, приводят к загрязнению искусственными радионуклидами водных экосистем и окружающих территорий, а испытания ядерных зарядов привели не только к локальному радиоактивному заражению в районах взрыва, но и вызвали загрязнение искусственными радионуклидами биосферы. Первое широкомасштабное загрязнение биосферы продуктами ядерного деления произошло после бомбардировки японских городов Хиросимы и Нагасаки. Вклад в глобальное загрязнение вносят и захоронения ядерных отходов в мировом океане, широко практиковавшиеся США в 50–60 гг. прошлого века.

Реализация ядерного проекта в СССР послужила мощным толчком для развития исследований в области радиационной биологии и экологии. На заре атомной эры в конце 40 начале 50 гг. XX века радиоэкологические исследования и эксперименты с растворами искусственных радионуклидов проводили в Лаборатории «Б» под руководством Николая Владимировича Тимофеева-Ресовского – репрессированного ученого с мировым именем. Поведение искусственных радионуклидов в сельскохозяйственных агроценозах и их переход в растения изучали в биофизической лаборатории (БФЛ) Московской сельскохозяйственной академии им. Тимирязева под руководством профессора Всеволода Маврикиевича Клечковского, в последствии академика ВАСХНИЛ.

Детальные научные исследования радиационного поражения окружающей среды были организованы В.М. Клечковским в районе радиационной катастрофы на ПО «Маяк» в сентябре 1957 года на Южном Урале, где в результате химического взрыва емкости с высокоактивными отходами произошел выброс большого количества радиоактивных веществ в окружающую среду – $7,4 \cdot 10^{17}$ Бк (20 М Ки). В результате аварии радиационному заражению подверглись значительные территории на севере Челябинской, Свердловской и Курганской областей и образовался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). [22, 23]. Для ликвидации последствий аварии была организована Опытная научно-исследовательской станции ПО «Маяк», которая по праву считается альма-матер отечественной радиоэкологии [24, 25, 26].

Параллельно с исследованиями СССР обширные радиоэкологические исследования в месте сбросов и хранения радиоактивных отходов велись в США (Хэнфорд, Ок-Ридж, Саванна Ривер). Аналогичные работы были начаты в этот же период и в Великобритании.

В силу сложившейся геополитической ситуации второй половины XX века не исключалась возможность глобального ядерного конфликта. В связи с этим возникла неотложная задача по оценке последствий крупномасштабного радиоактивного загрязнения окружающей среды, для решения которой в США, СССР, Канаде и Франции были сооружены в природной среде мощные источники γ -излучения. В результате комплексных исследований γ -облучения биоценозов были определены предельные уровни воздействия на наземные экосистемы, включающие десятки видов растений и животных.

Через несколько десятилетий, в 1986 году произошла ядерная катастрофа на Чернобыльской АЭС, приведшая в местах с максимальным радиоактивным загрязнением к гибели наиболее радиочувствительных природных сообществ. После аварии на ЧАЭС начались широкомасштабные исследования радиационных эффектов в природной среде. Результаты исследований привели к изменению методологических подходов к нормированию воздействия ионизирующей радиации и возникновению концепции экологического нормирования.

При переходе от санитарно-гигиенических к экологическим принципам нормирования происходит смена объекта нормирования. В роли объекта выступают не отдельные особи – человек в рамках санитарно-гигиенического подхода, а природные или созданные человеком системы: природные саморазвивающиеся комплексы – экосистемы и биогеоценозы, популяции диких и домашних животных, созданные и контролируемые человеком искусственные сообщества растений и животных, агроценозы [27].

В современной концепции экологического нормирования МКРЗ предлагает использование *референтных организмов*. К числу таких организмов предлагается отнести небольшое количество растений и животных, которые станут реперными в оценке радиационного воздействия на флору и фауну. При выборе таких видов предполагается определить:

- а) наиболее радиочувствительных представителей биоты;
- б) значимость для экосистемы (доминантные виды);
- в) представленность в основных экосистемах мира;
- г) объем имеющейся радиобиологической и радиоэкологической информации по этим видам.

Использование имеющихся данных о реакциях природных экосистем и составляющих их компонентов на радиоактивное загрязнение в целях экологического нормирования сложная задача, поскольку трудно оценить экологическую значимость многих реакций на облучение, возникших на клеточном, организменном и популяционном уровнях на фоне динамики сезонных природных процессов и циклических климатических изменений.

Разработку показателей экологического нормирования среды для наземных экосистем во многом осложняют естественные процессы динамики численности в популяциях животных, поскольку периоды всплеск численности значительно отличаются у различных видов:

а) стабильной динамикой с продолжительностью около 20 лет, которая характерна для крупных животных с большой продолжительностью жизни, слонов, китов, приматов, человека.

б) лабильной динамикой с периодами изменения численности популяций 5–11 лет, наблюдающейся у крупных птиц, рыб, хищников и грызунов.

в) эфемерной динамикой, характеризующейся неустойчивостью численности с небольшой амплитудой и малым периодом колебаний 4–5 лет, часто наблюдающейся у малых грызунов и насекомых.

На процессы динамики численности могут накладываться и миграционные процессы, что также осложняет использование ряда биоценотических показателей.

В настоящее время вопросы экологического нормирования антропогенно измененной среды разрабатываются в разных направлениях и с разными целями:

- 1) охрана генофонда планеты;
- 2) поддержание приемлемого для человека санитарного состояния среды;
- 3) охрана ландшафтного разнообразия природы;
- 4) охрана источников биологической продукции;
- 5) охрана рекреационных ресурсов;
- 6) сохранение биологического разнообразия и устойчивого развития биосферы.

Поэтому реализация охранных мероприятий является сложной многоплановой задачей, решить которую в полном объеме на практике достаточно сложно. По мнению Дмитрия Александровича Криволицкого, одним из перспективных подходов к оценке состояния окружающей человека среды может стать контроль биогенного круговорота основных химических элементов и показателей биологической продуктивности.

В условиях длительного воздействия загрязняющих веществ в относительно малых концентрациях вызываемые ими экологические последствия могут проявиться спустя длительное время. Для прогноза этих последствий могут быть использованы более чувствительные биометрические показатели – качество пыльцы и семян, частота нарушений хромосом в клетках меристемы, фракционный состав белков растительных тканей и др. [28, 29].

Первичным звеном в действии радиации на биологические структуры является воздействие на хромосомный аппарат клетки, поэтому наиболее ранние изменения можно зафиксировать на молекулярно-клеточном уровне организации живой материи. Следовательно, в качестве критерия неблагоприятного воздействия радиации, очевидно, следует использовать ге-

нетические тест-системы, обеспечивающие раннюю диагностику изменений в экосистеме.

Для оценки приемлемой нагрузки в целях сохранения состояния окружающей среды можно использовать методологию анализа радиационно-экологического риска. В настоящее время кроме радиационного риска используется более широкое понятие экологического (радиационно-экологического) риска, определяемого как вероятность последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды, неблагоприятных для человека и биоты [30]. Радиоэкологический риск является многомерной характеристикой (табл. 2.1), включающей в себя различные факторы и компоненты [31].

Таблица 2.1

Факторы и компоненты радиоэкологического риска

Факторы	Компоненты
Физические	Уровни загрязнения окружающей среды радионуклидами. Поглощенная доза
Биофизические	Эффективная доза. Форма зависимости «доза-эффект»
Биологические	Радиочувствительность. Состояние систем репарации.
Медицинские	Вероятность вредных эффектов для здоровья. Потери продолжительности жизни
Социально-экономические	Ущерб от радиоактивного загрязнения. Восприятие риска
Экологические	Снижение качества окружающей среды. Нарушение экологического баланса радионуклидов

Анализ и управление радиационным риском осуществляется на основе принципов ALARA⁵⁰:

1) непревышение допустимых пределов индивидуальной дозы от всех источников излучения (принцип нормирования);

2) запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (принцип обоснования);

⁵⁰ *АЛАРА* (англ. ALARA, сокр. As Low As Reasonably Achievable) – один из основных критериев, сформулированный в 1954 году МКРЗ с целью минимизации вредного воздействия ионизирующей радиации. Предусматривает поддержание на возможно низком и достижимом уровне как индивидуальных (ниже пределов, установленных действующими нормами), так и коллективных доз облучения с учётом социальных и экономических факторов.

3) поддержание на возможно низком и реально достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

При соблюдении принципа оптимизации учитывается следующее:

а) во-первых, необходимость установки границы риска для каждого источника облучения, поскольку предел риска регламентирует потенциальное облучение от всех возможных источников;

б) во-вторых, при снижении риска потенциального облучения существует минимальный уровень риска, дальнейшее снижение которого нецелесообразно.

В соответствии с Нормами радиационной безопасности уровень пренебрежимо малого риска разделяют *на область оптимизации риска и область приемлемого риска*, которая оценивается как $n \cdot 10^{-6}$ за год.

Функциональная схема оценки радиационного риска включает в себя следующие элементы:

А) идентификация источников риска – рассматриваются все потенциальные источники, при этом особое внимание уделяется анализу возможных источников аварийного радиационного воздействия при различных сценариях аварий;

Б) анализ данных радиационного мониторинга – определяются референтные объекты окружающей среды для последующего анализа радиационного риска с учетом принципа множественных путей радиационного воздействия; осуществляются модельные оценки содержания радионуклидов в референтных объектах с учетом компонентов биоты и пищевых цепочек;

В) оценка дозы – построение модели оценки дозы для человека и референтных объектов биоты как в штатных условиях, так и для аварийных сценариев;

Г) категоризация риска – выполнение интегральных оценок радиационного риска для человека и референтных объектов биоты, допускающие ряд предположений и упрощений, в том числе существенную экстраполяцию данных о зависимости доза-эффект в области малых доз, постулируя линейный характер такой зависимости для стохастических эффектов ионизирующей радиации.

По мнению ряда авторов [21] зависимость радиационного эффекта от облучения малыми дозами оказывается нелинейной. Это и некоторые другие допущения при оценке радиационно-экологического риска явились причиной того, что ряд экспертов считает современную методологию оценки риска в атомной промышленности ошибочной. По их мнению, управление риском – использование результатов оценок для принятия решения о снижении радиационного риска до приемлемой величины, могут выражаться

через производные параметры (пределы допустимых выбросов, допустимые удельные активности радионуклидов в компонентах природной среды).

В основе управления риском лежат принципы ALARA, поэтому риски, лежащие между недопустимым и пренебрежимо малым уровнем, являются приемлемыми, если они удовлетворяют принципу ALARA. Причем риски, удовлетворяющие принципу ALARA, могут изменяться в зависимости от конкретной радиационной ситуации и экономических условий, что также вносит определенный субъективизм в методологию оценки радиационного риска.

Долгое время считалось, что соблюдение радиационной безопасности человека гарантированно обеспечивает радиационную защиту окружающей среды. Этот постулат, сформулированный МКРЗ в Публикации 60 и часто употребляемый в сокращенном виде: «Защищен человек – защищена природная среда», с момента его опубликования подвергался критике со стороны радиоэкологов.

Такой подход к радиационной защите окружающей среды, называемый гигиеническим или антропоцентрическим, заложен в основу современных международных рекомендаций по обеспечению радиационной безопасности, а также в национальные, в том числе российские, нормативно-правовые документы в области радиационной безопасности.

Антропоцентрический принцип основан на следующих аргументах:

- 1) человек – наиболее радиочувствительный живой объект в биосфере;
- 2) предусмотрены достаточно большие коэффициенты запаса при регулировании допустимого облучения человека по сравнению с эффективными и летальными дозами;
- 3) защита здоровья человека имеет самый главный приоритет.

Критические замечания против этих антропоцентрических позиций состоят в следующем:

- 1) человек не является наиболее радиочувствительным живым объектом в биосфере, он лишь относительно чувствителен к ионизирующим излучениям;
- 2) большие коэффициенты запаса недостаточны для заключений *argioi* (это зависит от количественных оценок во многих сложных экосистемах и ситуациях);
- 3) нет сомнений и в том, что наше собственное здоровье имеет для нас самих высочайший приоритет.

Критика сторонников эгоцентрического подхода, направленная против слишком широкого распространения (на популяции всех живых существ) антропоцентрических принципов, справедливых только для человека, заключается в следующем:

1) в окружающей среде реализуются ситуации, когда человек как объект воздействия ионизирующего излучения отсутствует и техногенное загрязнение действует только на природные объекты;

2) в отличие от представителей биоты, человек имеет возможность целенаправленно защищаться от воздействия ионизирующих излучений с помощью различных средств и методов, включая простейшие, но эффективные – защиту расстоянием и временем;

3) в ряде ситуаций человек может облучаться в дозах, которые ниже регламентных, установленных исходя из принципа гигиенического нормирования, но облучение представителей некоторых экосистем будет находиться на уровне, опасном для ряда видовых сообществ, т. к. формирование доз радиации от различных источников и с учетом различных путей поступления радионуклидов в организм для людей и представителей биоты различно.

Априори⁵¹ считалось, что и человек, и биота находятся в одной и той же природной системе и получают одинаковые дозы облучения. На самом деле о равенстве доз облучения человека и биоты можно говорить лишь теоретически. Это положение названо не эквидозным облучением человека и биоты [32]. Еще одним фактором, влияющим на соотношение доз облучения человека и представителей биоты, является тип радионуклидного загрязнения. Особенно существенны различия в дозах облучения человека и биоты при радиоактивном загрязнении, связанном с поступлением в окружающую среду α - и γ -излучающих нуклидов.

В отдельных случаях, для районов с повышенными уровнями радиационного риска, может потребоваться проведение мониторинга радиационной обстановки на основе наиболее детального радиоэкологического обследования территории, для уточнения значений и интервала изменений радиационного риска, с целью получения достаточной информации для принятия решений о проведении мероприятий по обеспечению радиационной безопасности населения и окружающей среды и защитным мерам [33] (табл. 2.2).

⁵¹ *Априори* (лат. a priori – буквально «от предшествующего») – знание, полученное до опыта и независимо от него (знание априори, априорное знание), то есть знание, как бы заранее известное.

Рекомендации по организации мониторинга радиационной обстановки
в зависимости от уровня радиационного риска

Категория риска	Требования к мониторингу радиационной обстановки и защитным мерам
Неприемлемый (более $5 \cdot 10^{-5}$ год ⁻¹)	Мониторинг радиационной обстановки в зоне наблюдения радиационно опасных объектов, на радиоактивно загрязненной территории, а также на контрольном участке по специальной программе. Необходимы защитные меры
Требуемый оптимизации (от 10^{-5} до $5 \cdot 10^{-5}$ год ⁻¹)	Непрерывный автоматизированный мониторинг радиационной обстановки: мощности дозы гамма-излучения, некоторых компонент природной среды, с возможностью алармового сигнала; непрерывный отбор проб атмосферного воздуха, атмосферных выпадений и поверхностных вод с периодическими измерениями удельной и объемной активности радионуклидов в лаборатории; периодический отбор проб почвы, донных отложений, биоиндикаторов с последующими измерениями удельных и объемных активностей радионуклидов в пробах в лаборатории. Защитные меры предусмотрены по мере необходимости.
Малый (от 10^{-6} до 10^{-5} год ⁻¹)	Периодические отборы проб и измерения удельной и или объемной активности радионуклидов в компонентах природной среды и продуктах питания для подтверждения непревышения заданного уровня радиационного риска. Защитные меры не предусмотрены.
Пренебрежимый (менее 10^{-6} год ⁻¹)	В установленном порядке источник ионизирующего излучения может быть выведен из-под регулярного контроля. Защитные меры не предусмотрены.

2.6. Единый подход в системе радиационной безопасности

В последние годы многие радиоэкологи ставят под сомнение правильность антропоцентрического принципа обеспечения радиационной безопасности окружающей среды. Понятно, что в создавшихся условиях необходима смена парадигмы – отказ от антропоцентрического подхода в обеспечении радиационной безопасности и переход к новому принципу нормирования, учитывающему защиту не только человека, но и всех биологических систем и среды обитания – биосферы. В систему нормирования включаются компоненты живой и неживой природы, в том числе и «человек» как элемент биосферы. В некотором смысле экоцентрический подход является более общим и включает в себя антропоцентрический, что делает его весьма привлекательным. Однако такая смена одной из основных парадигм радиационной защиты потребует решения сложнейших научных проблем.

По мнению Геннадия Григорьевича Поликарпова [35, 36, 37] *«Люди не могут быть здоровыми в нездоровых экосистемах»*. Г.Г. Поликарпов считает, что в пользу экоцентрического подхода в нормировании действия ионизирующих излучений свидетельствует следующее:

а) По обобщенным данным [27], местное население, попавшее в зону загрязнения в результате аварийных сбросов на ПО «Маяк» в 1950 – 1951 гг., проживая на берегу загрязненной радионуклидами р. Теча в Челябинской области, используя воду реки и употребляя в пищу рыбу, молоко местного рогатого скота, пасущегося в пойме этой реки, получили дозы радиационного воздействия в 100 – 300 раз меньше, чем представители биоты, обитающие в р. Теча. После аварии на ПО «Маяк» в 1957г. жители деревень в головной части ВУРСа так же подверглись воздействию доз от ионизирующей радиации в 10–100 раз ниже, *чем дикие позвоночные животные и высшие растения*. В зоне воздействия 4 аварийного блока ЧАЭС *доза ионизирующей радиации на биоту была в 30 – 120 раз выше, чем на население* [27];

б) Нет основания игнорировать возможные в будущем ядерные аварии и катастрофы. В настоящее время ядерным оружием располагают десятки государств, и нельзя исключить выход отдельных стран из международного договора о запрете испытаний ядерного оружия. Возможно и осуществление на практике недавно провозглашенного принципа о превентивных ядерных ударах. Усиливается угроза и ядерного терроризма.

в) Антропоцентризм основан на традиционной этике, рассматривающей правила поведения людей только внутри человеческого общества. Сторонники экоцентризма считают, что «Человечество сможет выжить только благодаря новой концепции этики: *экоэтике*» [38, 39].

В XXI веке экологическая этика стала жизненной необходимостью для гармонизации отношений между *биосферой и одним из ее компонентов* –

*геологически очень молодого вида *H. sapiens*, ведущего себя все более и более деструктивно и агрессивно по отношению к биосфере.*

В результате ранжирования уровней воздействия хронического ионизирующего облучения по мощности дозы на биоту Г.Г. Поликарпов выделил по степени воздействия несколько зон:

а) *зона неопределенности* – уровень облучения ниже наименьшего уровня природного фона: $< 0,00001 - 0,0004$ Гр/год,

б) *зона радиационного благополучия* – уровень облучения в пределах природного фона: $0,00004 - 0,005$ Гр/год,

в) *зона физиологической маскировки* – уровень облучения $0,005-0,05$ Гр/год,

г) *зона экологической маскировки* – уровень облучения $0,05-0,4$ Гр/год.

д) *зона явного действия* – уровень облучения $4 - > 3000$ Гр/год. Наблюдается проявление повреждающих и поражающих эффектов ионизирующего облучения.

В 70 гг. прошлого века Г.Г. Поликарповым на основе анализа 68 научных работ по результатам исследований нарушений и изменений наиболее радиочувствительных структур и функций живых организмов и их сообществ предложил концептуальную графическую модель действия хронического облучения во всем диапазоне мощностей доз на все уровни организации живой природы – организмы, популяции, сообщества, экосистемы и биосферу в целом.

В предложенной графической модели уровни воздействия автор распределил по зонам (рис. 2.3).

Первая зона – «*Зона неопределенности*», это область с наименьшими мощностями доз воздействия ионизирующей радиации – ниже уровня среднего природного фона. В этой области основное воздействие может определять распад ^{40}K при мощности дозы ***0,00004 Гр/год*** в морских микроорганизмах.

Г. Поликарпов предлагает принять дозу мощностью ***0,00004 Гр/год*** за условный верхний предел «Зоны неопределенности». Автор считает, что в действительности такой вид границ между зонами может выглядеть в виде *«полос», а не геометрических линий*. Ширина межграницных «полос» между зонами в предложенной модели может быть предметом предстоящих исследований в радиоэкологии.

Вторая зона – «*Зона радиационного благополучия*» расположена в пределах естественного фона, который значительно варьирует в различных районах Земли.

Среднее значение мощности дозы природного фона составляет примерно ***0,001 Гр/год***.

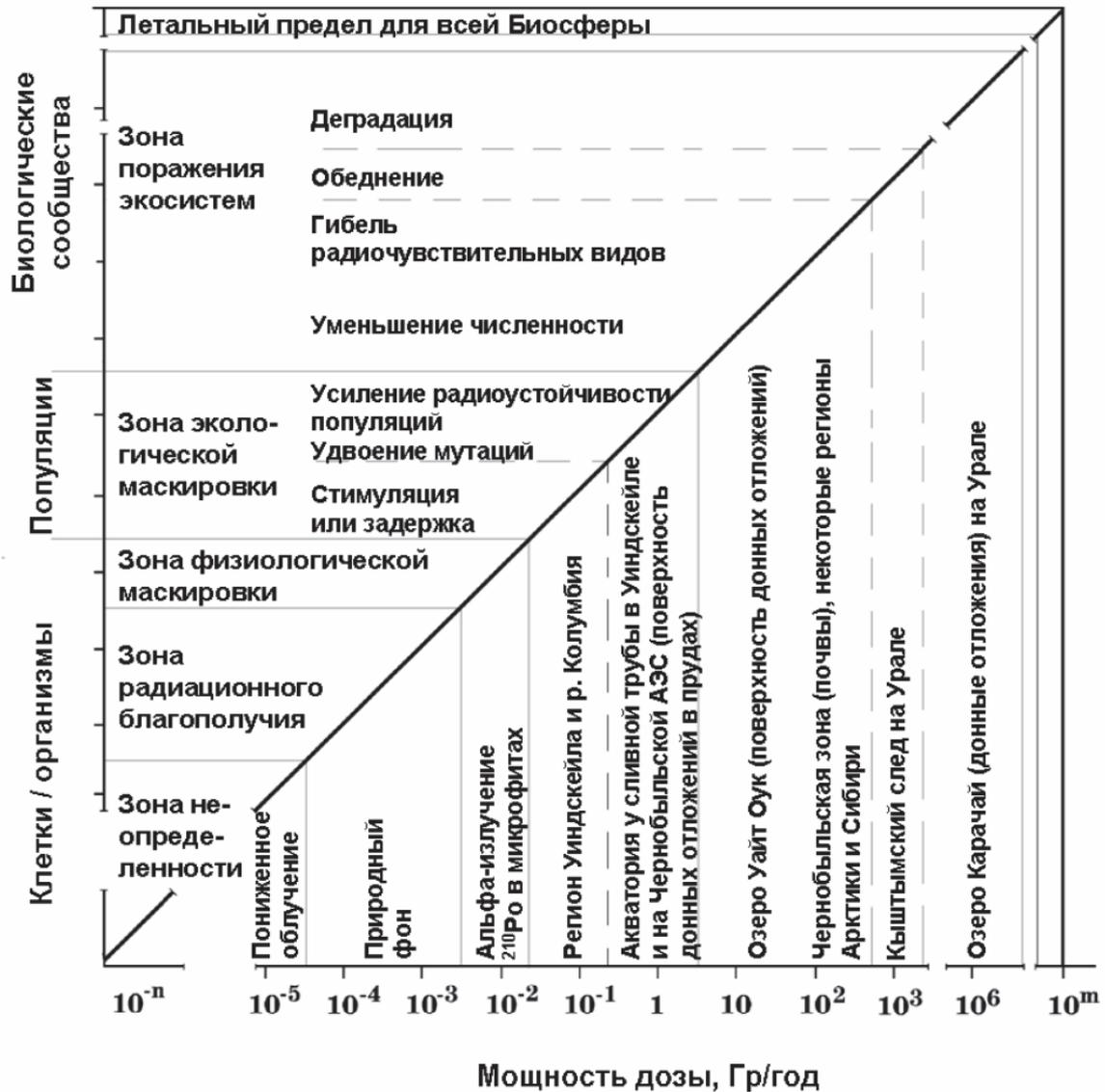


Рис. 2.3. Зонирование биосферы в зависимости от уровня воздействия ионизирующих излучений (Г.Г. Поликарпов)

Уровни дозового воздействия от природных источников ионизирующих излучений на население, проживающее в некоторых районах нашей планеты, намного больше $\sim 0,0035$ Гр/год. Так, на о. Икария в Эгейском море (Греция) песчаные пляжи и почвы, образовавшиеся в прибрежной зоне и содержащие ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , создают дозовое воздействие мощностью $0,0018$ Гр/год, а донные отложения на границе с морской водой в сублитеральной зоне на том же острове намного больше, до $0,0049$ Гр/год.

В «Зоне радиационного благополучия» выявлен ряд изменений у представителей биоты, это:

– ритмические обратимые процессы увеличения темпов клеточного деления у инфузорий (*Colpoda* sp.), коррелирующие с небольшим превышением радиационного фона (до 0,00088 Гр/год);

– нарушения двигательной ориентации у реснитчатых червей – планарий (*Dugesia doroccephala*), в зависящие от мощности дозы, изменяющейся в пределах 0,0023 и 0,021 Гр/год;

В диапазон дозовых воздействий в «Зоне радиационного благополучия» входят:

– территории с уровнями дозового воздействия, формирующимися в районах месторождений моноцита, где средняя мощность дозы на человека составляет 0,005 Гр/год. Установлено, что такой уровень облучения не вызывает изменения здоровья в популяции местных жителей (около 50 тысяч человек) по сравнению с контрольной группой. Рекомендованный МКРЗ в 1966 г. дозовый лимит, составляющий 0,005 Гр/год для ограниченной части популяции человека, может рассматриваться как пробная граница между «Зоной радиационного благополучия» (для биоты, включая человека) и следующей верхней «Зоной физиологической маскировки».

– рекомендованный в 1973 г. МКРЗ максимально допустимый уровень дозы на человека при хроническом облучении 0,001 Зв/год;

– лимит радиационного облучения человека за счет пищи морского происхождения составляет 10 % общего дозового лимита для человека – 0,0005 Гр/год;

– норма для водных животных в водоемах – хранилищах радиоактивных отходов АЭС США – 0,001 Гр/год.

Третья Зона – «**Зона физиологической маскировки**» охватывает один порядок величин мощностей доз при хроническом облучении. В пределах этой зоны радиационные эффекты маскируются во многих случаях природной вариабельностью различных физиологических биохимических показателей. В эту зону попадают повышенные величины мощностей доз естественного фона для микроорганизмов за счет радионуклидов в глубоководных осадках – 0,006 Гр/год и воздействия излучений ^{210}Po – до 0,028 Зв/год на организмы морского фитопланктона. Донные отложения в сублиторальной зоне острова Икария формируют максимальную мощность дозы, равную 0,0096 Гр/год за счет излучений ЕРН – ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th ^{40}K . Около 100 тысяч человек, проживающих в штате Керала в Индии, подвергаются воздействию мощности дозы 0,013 Гр/год, этот уровень мощности дозы от ЕРН не вызывает изменения показателей здоровья по сравнению с контрольной группой.

В «Зоне физиологической маскировки» у животных начинают проявляться незначительные эффекты воздействия на функции, морфологию организмов либо частоту возникновения ряда заболеваний, например:

– изменение веса у полевок в районах высокого радиационного природного фона в северной части России,

– увеличение частоты хромосомных aberrаций в лейкоцитах человека и эмбрионах морских рыб. В водоемах, расположенных близко от ЧАЭС, выявлен переход в способе размножения – от вегетативного к половому – у пресноводных малощетинковых червей (*Oligochaeta*). В то же время Д. Вудхед сделал вывод, что мощность дозы в 0,022 Гр/год для популяции гуппи (*Poecilia reticulata*) не влияет на процесс их размножения. Поэтому этот уровень дозового воздействия не представляет значительной опасности для их длительного выживания,

– мощность предельной дозы 0,05 Зв/год предложена как предельная для персонала, работающего с источниками ионизирующей радиации.

В соответствии с документом НКДАР ООН уровень облучения дозой 0,05 – 0,1 Гр/год достаточен для продуцирования эффектов, которые становятся регистрируемыми. Поэтому эта величина мощности дозы может быть принята в качестве границы между рассматриваемой «Зоной физиологической маскировки» и следующей за ней «Зоной экологической маскировки».

Четвертая зона – «*Зона экологической маскировки*» ограничена мощностями доз от 0,05 до 4,0 Гр/год.

Такая мощность дозы наблюдается в местах аномалий природной радиоактивности в Морро-де-Ферро, Бразилия и некоторых других районах.

Повышенный техногенный радиационный фон, появившийся в ряде районов Америки, Европы и Азии, может быть также отнесен к «Зоне экологической маскировки». Основными примерами служат уровни облучения в районе Уиндскейла⁵², реки Колумбии и зоны Чернобыльской АЭС. Значительный маскирующий эффект может обеспечиваться благодаря различному состоянию популяций, сезонных изменений и вариабельности экологических условий, а также результатом действия естественного отбора, который поддерживает экологическое равновесие в экосистемах и «предотвращает» изменения на экосистемном уровне.

Тем не менее, в этой зоне мощностей доз наблюдаются биологические эффекты:

– патология у крыс, вызванная введенным ²³⁹Am и ²³⁹Pu, уменьшение митотической активности у эмбрионов Черноморского ерша – скорпены (*Scorpena porcus*),

– исчезновение старших возрастных групп в популяциях серебряного карася (*Carassius auratus gibelio*),

– усиление гетерозиготности в популяциях рыбки гамбузии (*Gambusia*),

⁵² **Уиндскейл** 10 октября 1957 года на АЭС Уиндскейл в ядерном комплексе Селлафилд на северо-западе Великобритании произошла крупная радиационная авария. Наибольший вклад в результирующую активность выброса был внесён радиоактивным ¹³¹I ~ 20 тыс. Ки (740 ТБк). Долгосрочное загрязнение определилось ¹³⁷Cs, 800 Ки (30 ТБк).

– повреждающее действие на кровь рыб при мощности дозы 0,18–0,36 Гр/год,

– скрытые дефекты у эмбрионов рыб, подвергшихся функциональным нагрузкам, и уменьшение на 2/3 относительной плодовитости рыб,

– уменьшение числа яйцевых капсул с увеличением числа яиц в каждой капсуле у пресноводных улиток (*Physa*),

– увеличение частоты новых хромосомных aberrаций у личинок комара звонца (*Chironomus*) и отсутствие влияния на его популяции, стабильную депрессию реакции фагоцитов у сазана *Cyprinus carpio*.

Мощность дозы в 0,5 Гр/год, удваивающая естественную частоту лейкемии у людей, также входит в «Зону экологической маскировки».

В США приняты предельно допустимые мощности доз при хроническом облучении наземных животных и растений (наземных и водных) > 0,4 Гр/год и > 4 Гр/год. Различия между **предельно допустимыми мощностями доз (ПДМД)** для людей (0,001 Зв/год) и ПДМД для наземных животных (0,4 Гр/год) составляют примерно **400 раз**, а для других представителей биоты (4 Гр/год) ~ **4000**.

Экспериментально оцененная дозовая нагрузка на пресноводные экосистемы, испытывающие кроме радиационной тепловую и химическую нагрузки, рассчитанная А.И. Смагиным по уровню облучения рыб (наиболее радиочувствительного звена пресноводных экосистем), составляют 2-3 Гр/год. Такая мощность дозы формируется в водоемах – хранилищах ПО «Маяк», в основном, за счет инкорпорированных организмами рыб β – излучающих радионуклидов. Автор считает, что эти уровни дозового воздействия можно принять как субкритические для пресноводных экосистем [22, 23].

ПДМД для человека расположена в зоне «радиационного благополучия» и равна среднему природному фону (0,001 Гр/год), тогда как для **всех других видов биоты биосферы** ПДМД попадает в «Зону экологической маскировки».

Пятая зона – «Зона поражения экосистем и зона летальности для всей биосферы» – это зона дозовых воздействий, начинающихся от 4 Гр/год и выше. Зона летальности расположена в дальней области земной сферы – радиационных поясах Ван Аллена, где пойманные магнитным полем нашей планеты солнечные протоны создают дозу 3650000 Гр/год, а электроны –1800000000 Гр/год, (более подробно см. Смагин, А.И. «Введение в радиационную безопасность»).

Мощность дозы 0,1 Гр/сутки (3,65 Гр/год, или округленная до целых величин – 4 Гр/год) продолжительного, хронического облучения (предложена С. Ауербахом) принята международным научным сообществом в качестве нижней границы экологического действия ионизирующей радиации. На нижней границе «Зоны поражения экосистем» (4 Гр/год) происходит угнетение функций и экологических процессов, падение плодовитости,

наступает бесплодие, начинается деградация популяций животных, а также эффекты псевдостимуляции и перестройки сообщества перифитона (организмов, заселяющих субстраты в толще воды). В то же время, дозовое воздействие 4 Гр/год не влияет на выживаемость и морфологию у морской камбалы (*Pleuronectes platessa*).

Д. Вудхед приводит отношение полулетальной дозы при остром облучении к уровню дозового воздействия при протяженном, хроническом облучении ($LD_{50\text{остр.}} / LD_{50\text{хронич.}}$), это соотношение колеблется в пределах величин от 2 до 10. На основании этого соотношения и данных о летальных дозах при остром облучении Г.Г. Поликарпов рассчитал следующие ориентировочные значения летальных доз при хроническом облучении. В соответствии с принципом предосторожности (precaution principle), при расчетах наименьшие острые летальные дозы были умножены на 2 (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Оценка минимальных летальных доз при хроническом действии ионизирующей радиации, рассчитанные Г.Г. Поликарповым

Организм	Минимальные хронические летальные дозы на взрослых особей, Гр/год
Млекопитающие	4–20
Человек	12–18
Птицы	10–50
Амфибии (или земноводные)	14–70
Рыбы	14–70
Рептилии (земноводные и пресмыкающиеся)	20–100
Ракообразные	30–150
Моллюски	200–1000
Иглокожие	780–3900
Насекомые	20–2000
Высшие растения (деревья, кустарники и травянистые растения)	14–70
Низшие растения (мхи, лишайники и водоросли)	60–300
Простейшие	60–300
Бактерии	100–5000
Вирусы	400–2000

Исходя из данных, приведенных в табл. 2,3, следует, что взрослые особи как радиочувствительных, так и большинство менее радиочувствительных животных (начиная с доз 14 Гр/год) находятся в «Зоне повреждения экосистем». В то же время, радиочувствительность развивающихся эмбрионов семги, форели и камбалы составляет (0,2–1,0 Гр), а развивающихся эмбрионов долгоносика, фруктовой мушки, осы и мыши (1,0–2,0 Гр), что соответствует скорее «Зоне экологической маскировки». Поэтому, следуя принципу предосторожности МАГАТЭ, можно обсуждать и решать вопрос об изменении нижней границы «Зоны экологической маскировки» на один порядок величин – с 4,0 до 0,4 Гр/год. По оценкам радиочувствительности эмбрионов разных групп водных и наземных животных наиболее радиочувствительными являются эмбрионы водных животных – семги, форели и камбалы (0,2–1,0 Гр).

Исходя из различной радиочувствительности эмбрионов, водных и наземных животных возникает необходимость более широкомасштабных радиобиологических исследований эмбрионального развития большого числа представителей разнообразных систематических групп животных и растений.

По мнению Г.Г. Поликарпова, представленная на рис 2.3 графическая концептуальная модель является первым этапом в становлении и разработке зональности экологического действия всех уровней мощности доз ионизирующих излучений.

Сравнивая антропоцентрический и экоцентрический подходы, основанные на различных принципах – антропоцентрическом и экоцентрическом соответственно, но использующих одинаковые ключевые понятия – безопасность (или защита) каждого индивидуального человека и популяции людей, в первом случае, и каждую популяцию и вид биоты, во втором можно заключить, что критерии и нормы радиационной защиты человека (как биологического вида) соответствуют «Зоне радиационного благополучия» (см. рис. 2.3). Это означает, что человек считается защищенным при следующих условиях:

а) радиологические показатели качества питьевой воды для населения (человека) должны обеспечивать не превышение эффективной мощности дозы:

- 0,001 Зв/год (Нормы радиационной защиты Украины-97, НРБУ-97, Киев, Украина);
- 0,0001 Зв/год (Нормы радиационной защиты-99, НРБ-99, Москва, Россия);
- 0,00004 Зв/год (US EPA, США);

б) квота лимита мощности дозы с учетом критического типа водопользования в Украине (НРБУ-97) равна:

- 0,00001 Зв/год для предприятий, применяющих ядерные реакторы (АЭС и др.);

- 0,00005 Зв/год для урановых шахт, гидрометаллургических заводов по обработке урановых руд и т.д.;

в) оценка мощности дозы для населения в Украине при рыбохозяйственном использовании водоемов:

- 0,0001 Зв/год с учетом отдельно ^{137}Cs и ^{90}Sr в питьевой воде;
- 0,0035 Зв/год с учетом ^{137}Cs в загрязненной рыбе;
- 0,0001 Зв/год с учетом ^{90}Sr в загрязненной рыбе;
- 0,0038 Зв/год – общая мощность дозы;

г) квота мощности дозы от каждого в отдельности долгоживущего радионуклида ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде и донных отложениях (сапропель) водного объекта для популяции человека при различных типах его рыбохозяйственного использования НКДАР ООН 2000 (UNSCEAR-2000):

- 0,0001 Зв/год для питьевого водоснабжения (НРБ-99);
- 0,0001 Зв/год через потребление рыбы с учетом в ней ^{90}Sr ;
- 0,0038 Зв/год через потребление рыбы с учетом в ней ^{137}Cs ;
- 0,00001 Зв/год при хозяйственном использовании без ограничения (Санитарные Правила для Атомных Станций -99, СП АС-99);

д) радиологические условия водной среды источника питьевой воды для населенных пунктов, формирующие мощность дозы 0,00001 Зв/год на человека, создают мощность дозы 0,03 Гр/год на организм тюленя, обитающего в том же водоеме. **Формирующаяся мощность дозы на организм тюленя в 3000 раз больше, чем для людей**, и соответствует «Зоне физиологической маскировки»;

е) в случае, когда человек получает дозу при хозяйственном использовании воды питьевого водоема всего 0,00001 Зв/год, дозовое воздействие на популяции байкальской нерпы (*Phoca sibirica*,) обитающей в том же водоеме, с учетом излучений ^{137}Cs и ^{90}Sr составляет:

- 0,0003 Гр/год с учетом облучения из воды;
- 0,03 Гр/год, при квоте для комплексного водопользования людьми, равной 0,001 Зв/год;
- 0,3 Гр/год, при использовании водоема для водоснабжения питьевой водой с удельной активностью ^{137}Cs в воде на «уровне вмешательства» (11 Бк/кг).

На основании анализа этих данных С.В. Казаков [40] пришел к следующему обоснованному заключению: «Следует признать, что регламентирование содержания радиоактивных веществ в водных объектах по уровню нормирования удельной активности радионуклидов в питьевой воде **не гарантирует радиационного благополучия в экосистеме водного объекта в целом**».

Например, коэффициент накопления ^{14}C для пресноводных рыб равен $5 \cdot 10^4$ (UNSCEAR-1982) [40], это приводит к тому, что мощность дозы внутреннего облучения тюленей при питании рыбой может составлять 7,5 Зв/год. В то же время известно, что мощности доз на порядок меньшей

величины, а именно, десятые доли Зв/год, не являются безопасными для млекопитающих [40].

Очевидно, что **антропоцентрическая формула МКРЗ: «Если защищен человек, то окружающая среда защищена автоматически» [18] – не отвечает требованиям, предъявляемым к радиационной защите биосферы.**

По мнению С.В. Казакова и И.И. Линге [34]: «Экологический подход к регламентированию воздействия ионизирующей радиации может привести к замене человека как наиболее радиочувствительного объекта, по которому строится вся существующая система нормирования доз воздействия ионизирующих излучений, на иной, более радиационно критический вид биоты. Это приведет к адаптации антропоцентрического подхода к «видоцентрическому».

Имеется очень четкий индикатор для распознавания антропоцентризма и экоцентризма в радиационной защите биосферы: **антропоцентристы** говорят о «человеке **И** биоте», тогда как **экоцентристы** говорят об «**экосистемах, ВКЛЮЧАЯ человека**».

Научная логика не легко воспринимается «технократами» (термин, который часто применял директор Океанографического музея в Монако Ж.-И. Кусто в его борьбе за чистоту гидросферы). Например, в 2001 г. на конференции по радиационной защите в Бельгии ответ главного инженера по ядерной энергетике крупной атомной державы на вопрос о его предпочтении между антропоцентрическим и экоцентрическим принципами в радиационной защите: **«Никаких сомнений, я – человек, и поэтому я предпочитаю антропоцентрический».**

Современные технократы не осознают себя обитателями экосистемы, обязанными следовать экологическим законам биосферы.

В настоящее время в сознании большинства людей не сформировалось понимание, что человек часть природы и в случае игнорирования законов природы - **игнорированием экологической этики**, будущие поколения человечества окажутся под нарастающей угрозой экологического наказания вплоть до исчезновения вида Человек разумный (*H. Sapiens*).

Нижний блок на рис. 2.3 отражает единую и неделимую систему «Экосистемы, включая примитивного *H. Sapiens*». Следующий над ним блок показывает весьма критическую современную ситуацию в связи с попытками современного человечества избежать «правил игры в биосфере» и, как писал О. Кинне [39]: «заменить правила сосуществования правилами доминирования».

Развитие современного сценария будущего демонстрирует вероятные последствия ухода *H. sapiens* из-под влияния биосферы в обозримом будущем – исчезновение человека как вида с лица Земли, если современное и будущее человечество не станет достаточно мудрым, чтобы «восстановить стыкуемость между метаболическими процессами природы и таковыми

населения людей» [39]. Современный человек разумный, имеет шанс изучить и следовать законам биосферы, принципам и правилам экоэтики и этики окружающей среды, предложенным В. И. Вернадским, Н.В. Тимофеевым-Ресовским, О. Kinne и др.

Международный союз радиоэкологов поддерживает переход от антропоцентрического к глобальному экоцентрическому подходу, целью которого служит сохранение целостности экосистем. *«Этот принцип может быть обобщен как «здоровье человека нуждается в здоровой окружающей среде».*

В настоящее время существуют значительные пробелы между **конечной целью защиты** особей, популяций и экосистем, подвергшихся действию хронических и малых доз смешанных загрязнений, и возможным практическим подходом для ее достижения.

Казаков С.В. и Линге И.И [34] считают, что «Экологический подход к регламентированию воздействия ионизирующей радиации может привести к замене человека как наиболее радиочувствительного объекта, по которому строится вся существующая система регламентирования, на иной, более радиационно критический вид. В современной теории защиты от радиационного излучения может произойти «сравнительно простая адаптация антропоцентрического подхода к видоцентрическому» и «выработка синтетической позиции, обеспечивающей одновременно охрану здоровья и человека, и всех других организмов». Успех в радиационной защите может быть достигнут только при целенаправленном поиске наиболее радиочувствительных видов живых организмов в различных экосистемах во всех составных частях биосферы Земли [41].

По мнению Рудольфа Михайловича Алексахина дополнение антропоцентрической концепции экоцентрической или тем более замена первой на вторую едва ли окажутся продуктивными. Усилия радиоэкологов, решающих проблемы охраны окружающей среды от воздействия ионизирующей радиации, и медиков, занимающихся вопросами радиационной защиты человека, должны быть направлены на выработку синтетической позиции, обеспечивающей одновременно охрану здоровья и человека, и других живых организмов [41].

Вопросы для проверки знаний по главе 2

1. Как проявляется негативное воздействие невидимых лучей на человека и другие живые объекты?
2. История формирования представлений об опасности радиоактивного излучения.
3. Рак рентгенологов и заболевания других профессиональных работников в сфере ядерных технологий.
4. Для чего необходимы дозиметрические измерения?
5. Электроскоп и его роль в изучении ионизирующих излучений.
6. Счетчика Гейгера-Мюллера.
7. Чем обусловлено создание МАГАТЭ. История МАГАТЭ с момента создания и до наших дней?
8. Роль Международной комиссией по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ), Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), научного комитета ООН в обеспечении радиационной безопасности.
9. Почему органы тела человека (кожа, кроветворные органы, хрусталик глаза и половые железы) являются критическими для выбора допустимых уровней облучения?
10. Предельно допустимые дозы облучения для профессиональных работников и населения.
11. Понятие риска. Что такое радиационный риск?
12. Детерминированные и стохастические эффекты.
13. Радиационный гормезис.
14. Риск в системе нормирования и методология оценки риска.
15. Беспороговая концепция действия ионизирующей радиации и проблема малых доз.
16. Концепция приемлемого риска, обоснование, оптимизация, применение дозовых пределов с уточнением применительно к источникам ионизирующего излучения и к облучаемым индивидуумам.
17. Антропоцентрический и экоцентрический подход в нормировании уровней облучения.
18. Принцип АЛАРА.
19. Антропоцентрический и экоцентрический подходы в нормировании радиационных воздействий.
20. Единый подход в системе радиационной безопасности. Плюсы и минусы.
21. Синтетическая концепция защиты биосферы, включая человека, как части природных систем.
22. Что такое экологическая этика?

Глава 3. ЗАЩИТА ОТ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ДОЗИМЕТРЫ И РАДИОМЕТРЫ, НОРМЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

3.1. Способы защиты от радиоактивного излучения

Как было показано в предыдущих разделах, опасность радиоактивного излучения определяется дозой облучения, которую получают живые организмы и в первую очередь человек. Доза в свою очередь зависит от типа ионизирующего облучения, его физических показателей и продолжительности воздействия. Физические параметры ионизирующих излучений определяют их способность распространяться в воздухе и проникать в вещество. В зависимости от типа излучения различаются и средства защиты от излучения, поскольку каждая из частиц либо квант характеризуется определенными физическими свойствами, а следовательно, проникающей и ионизационной способностью (подробнее см. раздел 1.1 и табл. 1.1).

α -частицы, имеющие максимальный повреждающий эффект, имеют самый маленький пробег в воздухе и способны пролететь только несколько миллиметров. α -излучение может быть задержано листом папиросной бумаги, одеждой или эпидермисом кожи.

β -частицы могут преодолеть в воздухе несколько метров, а в мягкие ткани проникают на глубину от нескольких миллиметров до сантиметров. Препятствием для бета-лучей может стать одежда, стекло толщиной в 2 – 3 мм либо лист металлической фольги, например, алюминия или свинца толщиной 1 мм.

γ -излучение имеет высокую проникающую способность. А пробег в воздухе γ – квантов может составлять от нескольких метров и до десятков и даже сотен метров в зависимости от мощности источника. Защититься от γ - излучения можно с помощью свинцовой или стальной пластины толщиной в несколько см.

При прохождении через вещество энергия ионизирующих излучений снижается. Достаточной защитой от всех видов излучений и в первую очередь γ -излучения является свинец, бетон, слой воды [5, 2].

Способы защиты от ионизирующей радиации человека и биоты:

а) время облучения. Поглощенная живым объектом энергия ионизирующего излучения или доза определяется временем воздействия. Понятно, что уровень дозового воздействия можно регулировать временем контакта с источником облучения, а именно уменьшая время контакта снижать дозу облучения. Например, на радиационно опасном производстве время пребывания рабочего в условиях высоких радиационных полей строго регламентируется допуском – нарядом на производство работ и по-

сле истечения регламентированного времени рабочий обязан покинуть опасную зону, чтобы избежать переобучения. Оставшуюся часть рабочего времени работник проводит в «чистых условиях» в зоне без повышенного уровня облучения.

Доза радиации относительно быстро падает с течением времени в эпицентрах ядерных аварий и взрывов. За 2–3 года в зоне радиоактивного заражения происходит снижение уровня дозового воздействия на биоту, включая человека, приблизительно в 100 раз. Этот эффект вызван распадом короткоживущих продуктов деления, составляющих большую долю радионуклидов при взрыве ядерных зарядов и в составе аварийных сбросов и выбросов;

б) расстояние. Пробег различных видов излучения в воздухе не одинаков, поэтому и расстояния, обеспечивающие защиту от излучения различных видов радиации, различаются. Как уже отмечалось, если для защиты от α -частиц достаточно удалиться от источника на несколько десятков сантиметров, β -частиц десятков дециметров, то ослабить воздействие источника γ -излучения может расстояние в несколько десятков метров.

В случае радиационной аварии либо при ядерном взрыве доза облучения снижается с увеличением расстояния от эпицентра ядерного инцидента. При увеличении расстояния от источника радиоактивного облучения в 2 раза уровень радиации снижается в 4 раза, при четырехкратном увеличении расстояния уровень радиации снижается в 8 раз и так далее по экспоненте. На рис. 3.1 показано снижение уровня дозового облучения при удалении от эпицентра взрыва нейтронной бомбы.

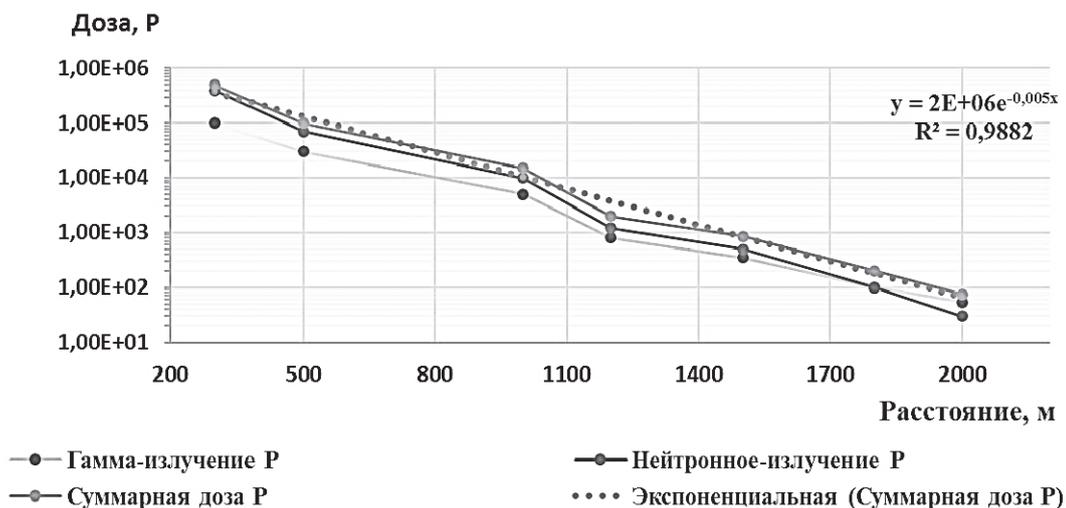


Рис. 3.1. Расчетные значения доз радиоактивного излучения после взрыва нейтронного боеприпаса мощностью 1 кт

Из представленной информации следует, что при воздушном ядерном взрыве мощностью 1 кт, продолжительность которого составляет несколько секунд, суммарная доза γ - и нейтронного излучения на расстоянии 300 м составит 500 000 Р (5 000 Гр), на расстоянии 1 км около 1000 Р (10 Гр), а 2 км 15 Р (0,15 Гр) что сопоставимо с безопасным уровнем разового γ -облучения человека [42].

Защитные экраны. Как отмечалось ранее (см. рис. 1.5), различные виды излучения значительно отличаются по поражающему действию.

Механические преграды являются хорошим барьером для ионизирующих излучений. Поскольку излучения обладают различной проникающей способностью, а определить, с каким видом ионизирующей радиации мы имеем дело не всегда возможно, рациональнее использовать универсальные барьеры, такие как кирпичная или бетонная стена не менее 40 см толщиной, стальная или свинцовая перегородка от 8-13 см, слой грунта от 90 см, слой воды больше 1 м. От нейтронного излучения максимальный уровень защиты обеспечивают материалы, в состав которых входит водород – например, вода, парафин, полиэтилен, полипропилен. На рис. 3.2 приведена толщина различных материалов, обеспечивающая снижения уровня дозового воздействия более, чем в 1000 раз.

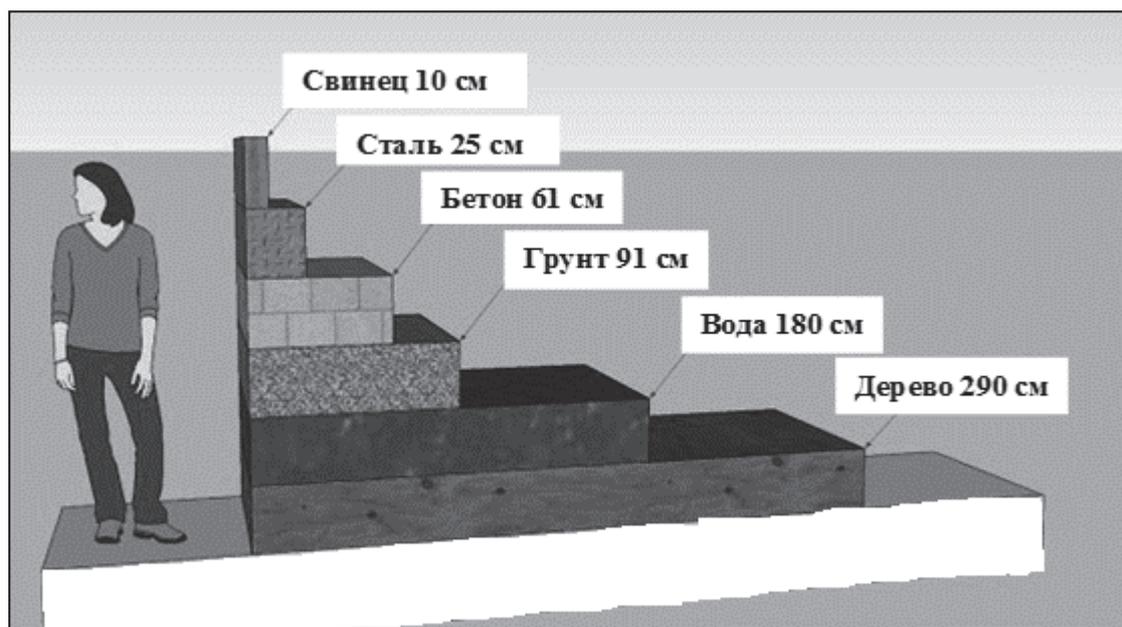


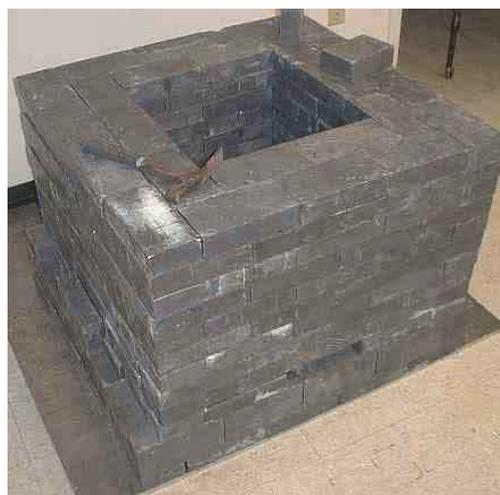
Рис. 3.2. Толщина материала, ослабляющая γ -излучение в 1024 раза

Необходимо учитывать, что перечисленные барьеры не полностью защищают от γ -лучей, а лишь ослабляют излучение. При увеличении толщины слоя можно снизить уровень облучения до нормы. Одним из лучших экранов от γ -излучения является вода.

Впервые наиболее широко различные защитные барьеры от воздействия X-лучей начали использовать рентгенологи в начале XX века: освинцованные фартуки и перчатки, свинцовые пластины, освинцованные стекла. В радиологических и радиохимических лабораториях и на радиационно-опасных производствах широко используются домики из свинцовых кирпичей и свинцовые колодцы различных конфигураций и конструкций (рис. 3.3).



а)



б)

Рис. 3.3. Свинцовые кирпичи разной конфигурации – а), колодец из свинцовых кирпичей – б)

Разработаны и многочисленны индивидуальные средства защиты от радиоактивного излучения. Для защиты дыхательного пути от воздушного поступления радиоактивных частиц используют различные типы респираторов, противогазов и защитных масок рис. 3.4.



Рис. 3.4. Противогазы и защитные маски

Самый простой и наиболее широко применяемый на практике респиратор «Лепесток» (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Респиратор «Лепесток»:
а – респиратор «Лепесток»; б – использование респиратора

Для защиты от радиоактивной пыли и частично потоков нейтронов применяют накидки, плащи и фартуки из полиэтилена. На рис. 3.6 и 3.7 показаны современные защитные костюмы для работы в условиях повышенного радиационного фона.

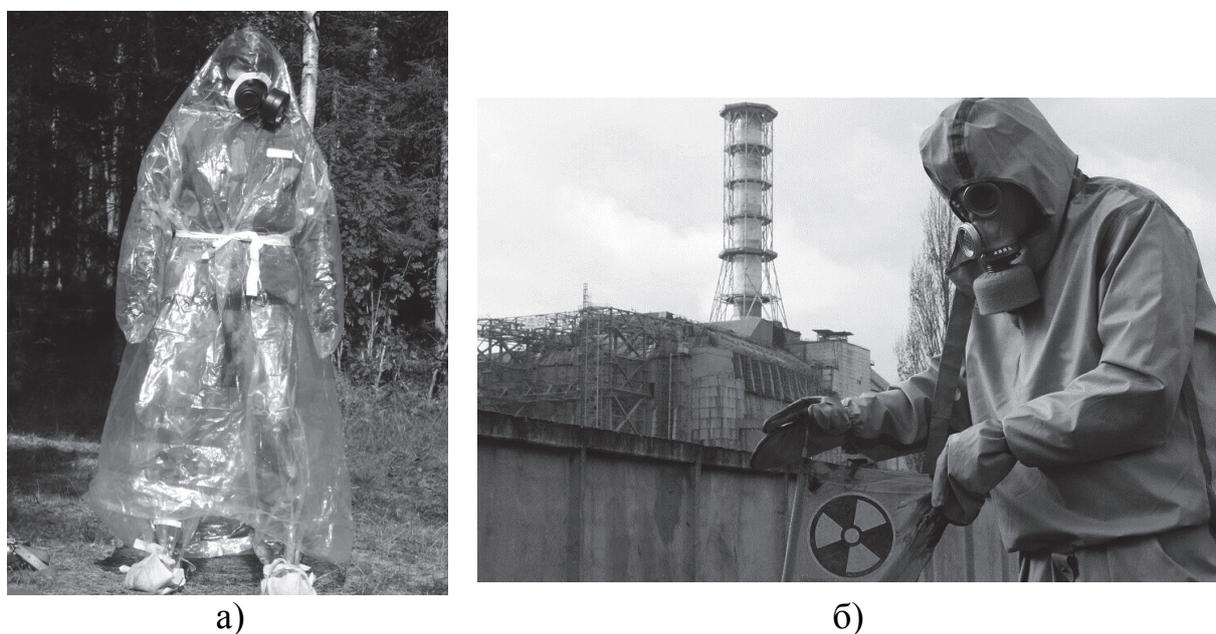


Рис. 3.6. Современный противорадиационный защитные костюмы:
а – полиэтиленовая накидка и бахилы; б – костюм из прорезиненной ткани



Рис. 3.7. Защитные костюмы для работы в эпицентре взрыва. Подготовка бойцов для работ по дезактивации кровли 4 энергоблока Чернобыльской АЭС

3.2. Дозиметры и радиометры

Проблема измерения дозы радиоактивного излучения возникла сразу после открытия явления в конце XIX века. Первым простейшим прибором, способным оценивать наличие либо отсутствие ионизирующего излучения, является электроскоп. Этот прибор использовали при проведении экспериментов Пьер и Мария Кюри в конце XIX и начале XX века. Позже был разработан счетчик Гейгера-Мюллера (подробнее см. раздел 2.2)

Для измерения уровня радиоактивного излучения применяют измерительные приборы, называемые дозиметрами. В зависимости от конструкции и типа дозиметра он может измерять как несколько видов излучения, так и один из видов α -, β -, γ -, рентгеновское или нейтронное излучения.

Дозиметры, способные измерять несколько видов радиации, имеют более сложное устройство, достаточно большую стоимость и в основном относятся к профессиональным средствам измерения.

Для бытовых целей, как правило, применяются дозиметры, измеряющие один или два вида радиации: γ -, β -излучения. У бытовых дозиметров меньше диапазон измеряемых величин и большая погрешность измерения, бытовые дозиметры, как правило, имеют меньшую точность.

Дозиметры могут применяться для измерения уровня радиации или выполнять роль предупреждающих индикаторов радиоактивной опасности.

По своему функциональному назначению дозиметры можно разделить на основные группы.

Индикаторы или сигнализаторы – простые приборы с невысокой чувствительностью и малой точностью, не имеющие цифрового табло, а только подающие световой или звуковой сигнал при радиационной опасности.

Измерительные приборы – устройства, используемые для измерения радиационного уровня радиоактивного фона, имеющие цифровой или аналоговый индикатор, отображающий уровень радиации. Уровень радиации может отображаться в различных единицах, обычно это мкЗв/час.

Поисковые приборы – это высокочувствительные измерительные приборы с дополнительными, обычно выносными (наружными), датчиками (детекторами), применяются для поиска незначительных изменений радиационного фона. Обычно используются для досмотра пограничными службами и другими спецслужбами.

Работа любого дозиметра базируется на одних и тех же принципах. Базовым элементом всех дозиметров является датчик ионизирующего излучения.

В зависимости от принципа работы датчики радиации делятся на:

Ионизационные камеры – это датчики, конструкция которых состоит из различных по исполнению газонаполненных камер. Принцип работы основан на регистрации электрических возмущений, возникающих в газоразрядной камере при прохождении сквозь нее различных заряженных частиц. Применяются в основном для регистрации β - и γ - излучений. Газоразрядные датчики имеют простую конструкцию и небольшую стоимость. Приборы такого типа плохо подходят для регистрации α - излучений.

Наиболее распространенной конструкцией газоразрядного датчика, является счетчик Гейгера-Мюллера, который применяется в большинстве бытовых и профессиональных дозиметрах.

Сцинтилляционные кристаллы – это кристаллы неорганического или органического происхождения. Принцип работы основан на регистрации фотонов, которые генерируются в кристалле, если сквозь него проходят заряженные частицы (электроны, протоны, нейтроны, α - частицы). Могут применяться для регистрации всех видов радиации. Применяются в основном в поисковых приборах, так как обладают высокой чувствительностью и точностью. Имеют достаточно большие размеры и высокую стоимость.

Твердотельные полупроводниковые детекторы – состоят из кристаллов и полупроводникового материала. Принцип работы основан на изменении электрической проводимости материала при прохождении сквозь него заряженных частиц (электроны, протоны, нейтроны). Могут приме-

няться для регистрации всех видов радиации. Обладают небольшой точностью, но при этом имеют маленькие размеры и низкую стоимость.

Все виды радиации опасны, но в бытовой сфере и окружающей нас среде можно столкнуться с действием основных трех видов радиации - это β -, γ - и α - излучение. Наибольшую опасность представляет альфа излучение, так как оно наносит живой ткани наибольший урон. Но зарегистрировать альфа излучение сложнее всего, потому что для его измерения дозиметр должен быть поднесен вплотную к источнику излучения, так как альфа излучение распространяется в пространстве на небольшие расстояния в пределах 2-3 см. Дозиметры, способные зарегистрировать альфа излучение, должны иметь отдельный датчик в дополнении к датчику Гейгера-Мюллера. Обычно это специальное окошечко в дозиметре, которое имеет сдвигаемую защитную крышку.

Для измерения ионизирующих излучений в быту лучше приобрести дозиметр, способный измерять три вида радиоактивного излучения β , γ и α .

Диапазон измеряемых величин – это максимальное и минимальное значение уровня дозы радиации, которое способен зарегистрировать прибор. Стоит обратить внимание на нижний порог измерений, он не должен быть выше, чем 0,05 мкЗв/ч. Максимально измеряемый уровень радиации у всех дозиметров достаточно высок.

Важное значение имеет поверка прибора – это отметка в паспорте дозиметра, что он проверен на заводе изготовителе и соответствует заявленным в паспорте техническим характеристикам и производит измерения с заданной точностью. Допускается отметка ОТК (отдел технического контроля) о приемке изделия. Такая отметка обязательно должна быть в паспорте изделия. В настоящее время промышленность нашей страны выпускает огромное количество дозиметрических приборов как профессиональных, так и бытовых. Выпуск качественных дозиметрических приборов налажен на Украине и в республике Белоруссия. Современные дозиметры – радиометры представлены на рис. 3.8.

Намного большими возможностями при измерении радиационных полей и материалов обладают измерительные комплексы радиоактивного излучения дозиметры–радиометры МКС – АТ 1117М, в комплект которых входит множество различных датчиков и измерительная камера рис 3.9.

Для лабораторных исследований в различных сферах промышленности используют измерительные комплексы МГБ – 01 (рис.3.10), ПРОГРЕСС-БГ+АР - Гамма-бета спектрометр с альфа-радиометром рис 3.11 и др.



а)



б)



в)



г)



д)



ж)



з)



е)



и)

Рис. 3.8. Современные портативные дозиметры - радиометры: а) МКС 1125 А, б) Дозиметр-радиометр «ЭКСПЕРТ-М» МКС-83Б, в) «Эксперт» МС-04Б, г) и д) «Терра» и «Терра -Н» МКС-05, ж) РДС-107 з) «Арбитр» ДРГ-02У, е) «СОЭКС»-1М, и) «СТОРА-ТУ» PKS -.01



Рис. 3.9. МКС-АТ1117М – Дозиметр-радиометр



Рис. 3.10. Измерительный комплекс МГБ-01



Рис. 3.11. ПРОГРЕСС-БГ+АР – Бета-гамма спектрометрический комплекс с альфа-радиометром



Рис. 3.12. Сосуд Дьюара

Высокочувствительные измерительные комплексы оснащены свинцовыми камерами (колодцами), в которых производится измерение исследуемых образцов. Свинцовые колодцы обеспечивают изоляцию датчика и измеряемого образца от воздействия внешнего радиационного фона. Для охлаждения измерительного кристалла используют жидкий азот ($t -195,75\text{ }^{\circ}\text{C}$) который по системе подачи поступает в свинцовый колодец из сосуда Дьюара (рис. 3.12).

Считается, что лучшие в мире измерительные приборы для исследований делящихся материалов выпускает фирма «CANBERRA» (США).

3.3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)

В настоящее время в России действуют Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 [19], разработанные с учетом Рекомендаций МКРЗ и требований Норм МАГАТЭ.

Нормы устанавливают основные пределы доз, допустимые уровни воздействия ионизирующего излучения по ограничению облучения населения в соответствии с Федеральным законом от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» [43], а не являются основополагающим документом, регламентирующим требования Федерального закона «О радиационной безопасности населения».

Нормы НРБ-99/2009 разработаны на основе фундаментальных принципов системы радиационной защиты (принцип нормирования, принцип обоснования и принцип оптимизации), которые впервые были сформулированы в Рекомендациях Международной Комиссии по радиологической защите (МКРЗ) в 1990 году в Публикации 60 [18]. Эти принципы были положены в основу НРБ-99 и сохраняются в НРБ-99/2009.

Принцип обоснования должен применяться на стадии проектирования новых источников излучения и радиационных объектов и выдаче лицензий на использование источников излучения. Суть этого принципа сводится к тому, что никакая практическая деятельность, связанная с облучением, не должна осуществляться, если польза от данного вида деятельности для облученных лиц или общества в целом не превышает ущерба от вызванного этой деятельностью облучения.

Формально проверка данного принципа производится путем сравнения пользы и вреда:

$$X - (Y1 + Y2) \geq 0, \quad (3.1)$$

где X – польза от применения источника излучения или условий облучения за вычетом всех затрат на радиационную защиту, а именно $Y1$ – остаточного ущерба и $Y2$ – ущерба, наносимого здоровью людей и окружающей среде от облучения, не устраненного защитными мерами и выраженного в сопоставимых единицах.

Разница между пользой (X) и суммой вреда ($Y1 + Y2$) в соответствии с принципом обоснования должна быть больше нуля.

В случае, когда невозможно достичь превышения пользы над вредом, принимается решение о неприемлемости использования данного вида источника излучения. При наличии альтернативных способов достижения пользы (X) разница $X - (Y1 + Y2)$ должна быть максимальной.

Процедура оптимизации. Нормы предусматривают, что хозяйственная и бытовая деятельность человека должна быть организована таким обра-

зом, чтобы значения индивидуальных доз, число облученных лиц и затраты на защиту поддерживались на разумных и достижимых уровнях с учетом экономических и социальных факторов.

Принцип нормирования, который применяется в ситуации планируемого облучения при нормальной эксплуатации техногенных источников ионизирующих излучений, реализуется путем установления предела дозы дополнительного облучения. Следует иметь в виду, что при эффективном использовании принципов обоснования и оптимизации ограничение дозы на уровне предела дозы применяется в редких случаях.

Обоснование пределов дозы для персонала и населения, предложенное МКРЗ в Публикациях 60 и 103 [17, 18], основано на понятии *социально-приемлемого риска* и гипотезе о линейной связи последствий облучения в малых дозах с величиной дозы. **Смертность**, связанная с производственной деятельностью, по данным Международной организации труда, находится в диапазоне $(7,2-7,5) \cdot 10^{-4}$, то есть имеет величину, близкую к **0,001**, которая принята в качестве верхней границы риска для персонала.

Величина приемлемого риска для населения принята равной $5 \cdot 10^{-5}$. **Пределы дозы 20 мЗв/год для персонала и 1 мЗв/год для населения**, установленные МКРЗ, являются результатом экспертной оценки возможных рисков от облучения в течение всей трудовой деятельности для персонала и от облучения на протяжении всей жизни для населения в целом.

Предел дозы не является границей между «безопасно» и «опасно», поскольку, во-первых, значения риска рассчитаны из предположения о существовании линейной связи последствий облучения с дозой, во-вторых, в соответствии с этой гипотезой по обе стороны предела дозы есть меньшая или большая вероятность последствий облучения.

В условиях аварийного облучения и при медицинском облучении пациентов принцип нормирования не применяется.

Польза и вред излучения выражаются различными величинами, поэтому при использовании процедуры оптимизации возникает проблема сведения этих величин к одной, например, к доходам и расходам, выраженным в денежном эквиваленте.

Согласно п. 2.2 НРБ-99/2009 облучение некоторой части населения с дозой 1 чел-Зв приводит к потенциальному коллективному ущербу для этой группы в виде потери примерно 1 чел.- года жизни за счет возникновения стохастических эффектов. Указанное соотношение получено из расчета, что при облучении группы лиц ожидаемый ущерб составляет 0,057 случая на 1 чел-Зв. В среднем возникновение такого эффекта (рака или наследственных заболеваний) приводит к потере примерно 15 лет полноценной жизни облученного или его потомка. Таким образом, коллективный

ущерб от облучения равен $0,057 \cdot 15 = 0,855$ человека-года на 1 чел-Зв (округленно 1 чел-год на 1 чел-Зв).

Для практической реализации принципа оптимизации потеря одного человеко-года жизни приравнивается в простейшем случае к величине годового душевого национального дохода. Однако, опыт применения принципа оптимизации показал необходимость учета не только экономических аспектов, но и социальных. Предполагается, что технология применения принципа оптимизации будет изложена в специальных методических указаниях.

Оценка Риска в НРБ-99/2009. Практически, любое воздействие ионизирующих излучений связано с некоторой степенью риска. Основываясь на результатах эпидемиологических наблюдений лиц, переживших атомную бомбардировку в Японии, а также других эпидемиологических данных, МКРЗ в публикации 103 [17] предложила новые числовые значения номинальных коэффициентов ущерба, которые несколько ниже значений, данных в НРБ-99.

Следует различать понятия риск и ущерб.

Величина риска характеризует вероятность возникновения каких-либо последствий облучения (заболеваемость, смертность, наследственные эффекты).

Величина ущерба является оценкой совокупного вреда, наносимого здоровью, и учитывает риск возникновения злокачественных новообразований, их летальность и среднее число потерянных вследствие таких заболеваний лет жизни, а также риск возникновения наследственных эффектов.

Номинальные (стандартные) коэффициенты ущерба не могут использоваться в качестве меры индивидуального риска или для прогноза отдаленных последствий при планировании в области здравоохранения, однако при проведении оптимизационных расчетов на их основе может быть дана консервативная оценка предотвращаемого или предотвращенного ущерба. В отличие от номинальных коэффициентов ущерба, которые используются при обосновании радиационной защиты от планируемого облучения, в НРБ-99/2009 приведены также граничные значения обобщенного риска, которые используются при обосновании радиационной защиты от источников потенциального облучения. Радиационная безопасность для источников потенциального облучения обеспечивается путем использования технических решений, способствующих снижению вероятности аварий и инцидентов, которые могут привести к облучению в дозах, характеризующих развитие радиационной ситуации по одному из возможных сценариев. Произведение вероятности события, приводящего к облучению, и вероятности неблагоприятных последствий облучения называется обобщенным

риском, который для *персонала* не должен превышать величину $2 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹, а для населения – $1 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹.

Система обеспечения радиационной безопасности персонала и населения при использовании техногенных источников ионизирующего излучения основана на введении обязательных пределов доз, *гарантирующих отсутствие* не стохастических – детерминированных пороговых эффектов облучения (подробнее см. стр. 51). В этой группе эффектов облучения различают ближайшие и отдаленные последствия. К ближайшим последствиям относятся:

- острая лучевая реакция развивается при дозе облучения от 0,5 Гр до 1 Гр, характеризуется преходящей лейкопенией и незначительными функциональными расстройствами в организме;
- острая лучевая болезнь развивается при дозе облучения более 1 Гр, заболевание всего организма, обусловленное внешним, кратковременным, относительно равномерным облучением всего организма или большей его части;
- хроническая лучевая болезнь, возникающая при длительном воздействии малых доз ионизирующего излучения, развивается, когда накопленная доза достигает 0,7–1 Гр;
- острое лучевое поражение кожи развивается при дозе облучения более 8 Гр.

Не стохастические эффекты воздействия ионизирующей радиации имеют порог дозы, составляющий 0,5 Гр. С увеличением дозы увеличивается как частота проявления эффекта, так и его выраженность, причем он обнаруживается у всех облученных.

Нормативы обеспечивают и приемлемый уровень риска появления *стохастических эффектов*, не имеющих порога воздействия ионизирующей радиации. Эти эффекты могут проявляться при самой малой дозе облучения. С увеличением дозы частота проявлений стохастических эффектов увеличивается, но не достигает 100%. **Выраженность эффекта от дозы не зависит.**

Наиболее значимые стохастические эффекты действия ионизирующего излучения:

- а) канцерогенные (возникновение доброкачественных или злокачественных новообразований);
- б) повреждение генетического аппарата;
- в) неопухолевые (атрофические, дистрофические, склеротические);
- г) сокращение продолжительности жизни.

В случае воздействия малых доз отдаленные последствия, в частности канцерогенез, становятся главным фактором, определяющим радиационную опасность. Количественная оценка этого фактора лежит в основе ха-

рактеристики радиационно-экологического благополучия, гигиенического нормирования и выработки критериев для проведения защитных мероприятий.

Согласно НРБ -99 величина канцерогенного риска составляет 1 случай на 20 чел. Зв, то есть, при облучении 20 человек в дозе по 1 Зв возникновение смертельного рака возможно в 1 случае.

В соответствии с линейно-беспороговой концепции облучения количество радиационно-обусловленных злокачественных новообразований в популяции пропорционально коллективной эффективной дозе, поглощенной в этой популяции. **Отсюда следует что, выход опухолей одинаков, если 20 человек облучить в дозе 1 Зв или 2 тыс. человек – в дозе 0,01 Зв.**

Не летальные повреждения генетического аппарата в зародышевых клетках проявляются возникновением аномалий у потомства. Частота возникновения генетических дефектов (аномалии развития, нарушение жизнеспособности и гибель плода, наследственные аномалии) в первых двух поколениях после облучения одного из родителей составляет 1 случай на 80 чел. Зв.

Таким образом, ущерб, вызванный в человеческой популяции радиационным фактором, определяется как дозой облучения, так и числом облучаемых людей.

В качестве приемлемого уровня риска смерти в результате техногенного облучения в условиях нормальной эксплуатации радиационных объектов для целей нормирования в соответствии с общепризнанными международными подходами приняты численные значения индивидуального пожизненного риска, равные 10^{-3} для персонала группы А и $5 \cdot 10^{-5}$ для населения (группа В), что соответствует **годовым эффективным дозам 20 и 1 мЗв в год**, соответственно. С учетом того, что радиационное воздействие определяется накопленной за жизнь дозой, допускается в отдельные годы **превышение** этих значений в **2,5** раза для персонала и в **5** раз для населения при условии, что средняя за любые последовательные 5 лет годовая эффективная доза не превысит установленных значений (**20 мЗв и 1 мЗв**). При этом гарантированно соблюдаются дополнительно установленные ограничения на эффективную дозу техногенного облучения персонала группы А за период трудовой деятельности (**1000 мЗв**), а эффективную дозу техногенного облучения населения за жизнь (**70 мЗв**).

Нормы предусматривают планируемое повышенное облучение (П 3.2.1) только «при предотвращении развития аварии или ликвидации ее последствий», а не для «ликвидации или предотвращении аварии». Планируемое повышенное облучение персонала не допускается при проведении ремонтных работ в контролируемых условиях.

Планируемому повышенному облучению допускается для мужчин **как правило**, старше **30 лет**. Нормы учитывают, что в аварийных формированиях, требующих серьезной физической подготовки сотрудников, на практике отсутствуют лица старше 30 лет.

Облучение природными источниками излучения. Персонал часто подвергается и облучению от естественных источников ионизирующей радиации. Допустимая доза производственного облучения работников **природными источниками излучения** составляет **5 мЗв/год**. Этот норматив распространяется только на организации, осуществляющие работы в подземных условиях (на урановые рудники, шахты, подземные производства), добывающих и перерабатывающих минеральное и органическое сырье и подземные воды, использующих минеральное сырье и материалы с АЭФФ⁵³ более 740 Бк/кг или продукцию на их основе, а также в результате деятельности которых образуются производственные отходы с АЭФФ более 1500 Бк/кг. АЭФФ определяется в строительных материалах органических удобрениях, торфе и др. Рассчитывается с учетом биологического воздействия природных материалов на организм человека и вычисляемая по формуле

$$A_{\text{ЭФФ}} = A_{\text{Ra}} + 1,31A_{\text{Th}} + 0,085A_{\text{K}} \quad (3.2)$$

где A_{Ra} , $1,31A_{\text{Th}}$, $0,085A_{\text{K}}$ – удельные активности радия, тория, калия соответственно, Бк/кг.

Для всех остальных организаций устанавливаются не дозовый критерий ограничения облучения работников, а требования к мощности дозы и среднегодовой эквивалентной **равновесной объемной активности изотопа радона (ЭРОА)** в воздухе помещений производственных зданий.

Когда работы производятся в помещениях со среднемировыми значениями мощности дозы гамма-излучения и ЭРОА изотопов радона в течение 2000 ч/год, то годовая эффективная доза производственного облучения составит 0,4 – 0,5 мЗв/год. Если значительную часть времени работы производятся на открытых площадках, то годовая доза будет существенно меньшей. При соответствии производственных зданий установленным требованиям по мощности дозы гамма-излучения и ЭРОА изотопов радона максимальные дозы облучения работников в них могут составить до 3,6 мЗв/год в новых зданиях и до 6,0 мЗв/год – в эксплуатируемых зданиях.

По данным доклада НКДАР ООН за 2000 год **дозы повышенного производственного облучения природными источниками излучения и количество облучаемых лиц в несколько раз выше соответствующих**

⁵³ $A_{\text{эфф}}$ – удельная эффективная активность ЕРН (естественных радионуклидов).

значений для профессионального облучения при работах с техногенными источниками излучения. Такое соотношение доз обусловлено тем, что уровни профессионального облучения контролируются и снижаются в течение десятков лет, тогда как повышенное производственное облучение природными источниками излучения практически не контролировалось и не снижалось. Введение требований НРБ-99/2009, а в последующем также ОСПОРБ-99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10 [44] по контролю и снижению уровней повышенного производственного облучения природными источниками излучения позволит заметно снизить дозы облучения от ЕРН.

При применении на практике требований п. 4.1 (НРБ-99/2009) следует учитывать два принципиальных момента:

– во-первых, согласно определению «радиационный объект» п. 46 «Термины и определения» НРБ-99/2009, предприятия и организации, в которых облучение работников относится к облучению природными источниками излучения, *к таковым не относятся.*

– во-вторых, имеются отдельные виды производств, на которых облучению природными источниками излучения в производственных условиях подвергается также и персонал группы А, как правило, занятый обслуживанием радиоизотопных приборов (уровнемеры, плотномеры и т.п.). К таким производствам могут относиться организации по производству минеральных удобрений и агрохимикатов, по комплексной переработке различных руд с извлечением из них концентратов цветных и черных металлов и др.

В п. 4.2 НРБ-99/2009 допустимые значения радиационных факторов при их *монофакторном* воздействии установлены для стандартных условий по длительности рабочего времени и средней скорости дыхания, которые на практике встречаются редко. Поэтому в тех случаях, когда условия облучения работников (длительность, скорость дыхания, сдвиг равновесия между радионуклидами уранового и ториевого рядов в производственной пыли) существенно отличаются от значений, приведенных в п. 4.2 НРБ-99/2009, дозы облучения работников необходимо рассчитывать в соответствии с требованиями ОСПОРБ-99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10 [44].

В соответствии с п. 1.4 НРБ-99/2009 *космическое излучение вблизи поверхности Земли и ^{40}K* , ответственный за дозу внутреннего облучения при его поступлении в организм человека с водой и пищей, *относятся к нерегулируемым источникам излучения*, поскольку на значение дозы облучения населения за счет этих двух источников практически невозможно влиять. Требования Норм и Правил на эти ионизирующие излучения не распространяются. Практически также не поддается регулированию доза внутреннего облучения населения за счет ингаляционного поступления долгоживущих природных радионуклидов в атмосферном воздухе. Ос-

тальные природные источники излучения рассматриваются как регулируемые и для снижения доз облучения населения за счет них вводятся различные ограничения в форме нормативов, уровней вмешательства, гигиенических критериев и т.д.

Контроль за радиационной безопасностью является одним из основных элементов всей системы радиационной безопасности (рис. 3.13). Он позволяет применять на практике основные принципы радиационной безопасности.

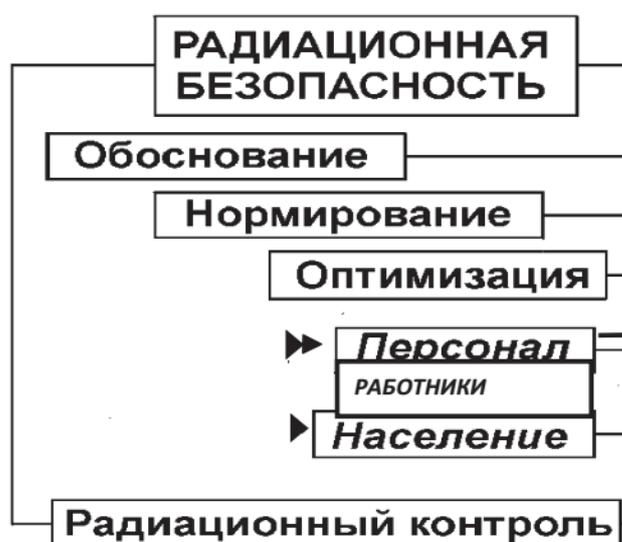


Рис. 3.13. Система радиационной безопасности России

Правовые, нормативные, практические и другие аспекты обеспечения радиационной безопасности в России нашли отражение в целом ряде документов различного уровня, это и Федеральные Законы, и различные отраслевые методики.

В разделе 7 НРБ-99/2009:

- а) определено место и основные цели радиационного контроля, затем перечислены объекты,
- б) определены процессы и факторы, подлежащие контролю,
- в) дан список контролируемых параметров.

Нормативы НРБ-99/2009 не регламентируют допустимое содержание радионуклидов в организме человека, это обусловлено введением концепции эффективной дозы. В определение эффективной дозы (эквивалентной дозы в органе) в качестве показателя, отражающего внутреннее облучение, введена ожидаемая эффективная (эквивалентная) доза. Ее значение определяется поступлением в организм радионуклидов за текущий год. Таким

образом, исходной информацией для расчета годовой эффективной дозы является значение годового поступления (а не содержания в организме или отдельных его органах) радионуклидов. Исходя из этого, схема оценки годовой эффективной дозы внутреннего облучения должна строиться на основе определения поступления радионуклидов в организм. Для решения этой задачи данные об индивидуальном содержании радионуклидов в организме, полученные с помощью счетчиков излучения человека (СИЧ), являются предпочтительными, но лишь в ряду других данных, таких, например, как данные измерений концентраций радионуклидов в воздухе или продуктах питания в совокупности с данными о характере поведения людей и количестве потребляемых ими продуктов. Для определения значения эффективной дозы необходимо на основании данных об индивидуальном содержании радионуклидов в организме с привлечением других показателей оценить поступление радионуклидов в организм, а затем, используя дозовые коэффициенты, рассчитать значение эффективной дозы.

Нормируемые величины – эффективная доза и эквивалентная доза в органе – не являются измеряемыми величинами. Их значения на практике необходимо оценивать на основе, измеряемых значений показателей радиоактивности, таких, например, как мощность дозы γ -излучения или плотность потока β -частиц. Связь между различными величинами, использующимися в радиационной безопасности, схематически показана на рис. 3.14.

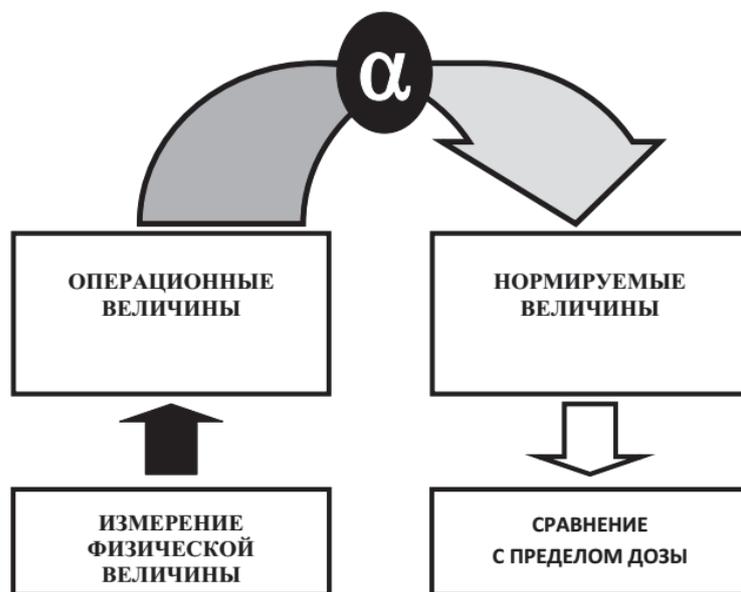


Рис. 3.14. Связь между различными величинами, использующимися в радиационной безопасности

Такие физические величины как керма, поглощенная доза, флюенс частиц воспроизводятся с помощью соответствующих эталонов и на практике являются измеримыми. Операционные величины, такие как амбиентный эквивалент дозы⁵⁴ (используется для характеристики излучения в точке, совпадающей с центром шарового фантома) и индивидуальный эквивалент дозы, также являясь измеримыми и представляют собой консервативную оценку нормируемых величин, измерение которых не представляется возможным. Поэтому оценка дозы для целей сравнения с установленными дозовыми пределами или контрольными уровнями, выполненная на основе операционных величин, будет приводить к консервативной оценке реальных доз облучения людей. **Если значение операционной величины меньше предела дозы или установленного контрольного уровня, то дальнейшие измерения не требуются.** В противном случае необходимы дополнительные измерения и/или дополнительные характеристики поля излучения и поведения человека в этом поле, для того чтобы на основании измерений или расчетов оценить более точное значение контролируемого параметра и вновь сравнить его с пределом дозы (контрольным уровнем).

Измерения или расчеты, выполняемые для целей оптимизации или оценки в случаях повышенного облучения, также предполагают измерение реальных доз облучения, а не их консервативных значений.

Контрольные уровни. Процедура установления контрольного уровня должна быть основана на двух принципах:

- а) не превышения установленного дозового предела,
- б) реализации на практике принципа оптимизации радиационной безопасности.

Установление контрольного уровня имеет целью закрепление на практике достигнутых положительных тенденций в уменьшении уровней облучения персонала и населения, радиоактивного загрязнения окружающей среды, улучшении условий труда при работе с источниками ионизирующего излучения. Численные значения контрольных уровней устанавливаются администрацией предприятия по согласованию с органами исполнительной власти, уполномоченными осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор. Систематическое превышение значений контрольных уровней свидетельствует о неудовлетворительном качестве проведения работ с источниками ионизирующего излучения.

⁵⁴ **Эквивалент дозы амбиентный** (амбиентная доза) $H(d)$ – эквивалент дозы, который был создан в шаровом фантоме МКРЕ на глубине d (мм) от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, в поле излучения, идентичном рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленном и однородном.

Радиационный контроль организаций и территорий предусматривает проведение контроля и учета индивидуальных доз облучения персонала группы А и Б, населения при использовании источников ионизирующего излучения в медицинских целях, а также доз, обусловленных естественным радиационным и техногенно-измененным радиационным фоном. Постановлением Правительства РФ от 16.06.1997 № 718 «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета доз облучения граждан», во исполнение статьи 18 Федерального закона «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ от 09.01.1996 в России создана и функционирует Единая государственная система контроля и учета доз облучения населения Российской Федерации (ЕСКИД).

Оценка радиационной безопасности включает характеристику радиоактивного загрязнения окружающей среды – почвы, воздуха, подземных и поверхностных вод и других объектов окружающей среды, а также питьевой воды и пищевых продуктов; анализ системы радиационной безопасности на конкретном радиационном объекте основывается, прежде всего, на оценке эффективности мероприятий по обеспечению радиационной безопасности.

В соответствии с НРБ 99/2009 на каждом радиационном объекте должно быть разработано **Положение о службе радиационной безопасности**, которое утверждается его руководителем и согласовывается с органом исполнительной власти, уполномоченным осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор; программа радиационного контроля, представляющая собой пакет документов по организации системы контроля – видов, объема, порядка контроля, перечня технических средств, структуры и штатов службы радиационной безопасности, должностные инструкции и др. с учетом особенностей и условий выполняемых работ;

– вероятность радиационных аварий и их масштаб определяется видом источника ионизирующего излучения, областью применения, технологией и способом применения источника ионизирующего излучения, активностью источника излучения, видом радионуклида(ов); применением или отсутствием технических мер по снижению вероятности событий, вследствие которых могут быть превышены граничные значения обобщенного риска, установленные НРБ-99/2009; достигнутым уровнем радиационной безопасности на конкретном радиационном объекте;

– степень готовности к эффективной ликвидации радиационных аварий и их последствий на радиационном объекте определяется наличием обученных специалистов (дозиметристов, радиохимиков, физиков, специалистов по радиационной гигиене и др.), необходимого материально-технического обеспечения, планов аварийного реагирования;

– анализ доз облучения, получаемых отдельными группами населения от всех источников ионизирующего излучения и числа лиц, подвергшихся облучению выше установленных пределов доз облучения, должен проводиться в соответствии с Федеральным законом «О радиационной безопасности населения» и Постановлением Правительства РФ от 16.06.1997 № 718 «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета доз облучения граждан».

В соответствии с требованиями НРБ 96/2099 должна проводиться оценка средней годовой эффективной и коллективной дозы облучения населения и число облучаемых лиц отдельно за счет природного и техногенно-измененного радиационного фона, техногенного, аварийного и медицинского облучения. Должна быть рассчитана средняя годовая эффективная и коллективная дозы облучения населения и число облучаемых лиц за счет всех источников ионизирующего излучения. Снижение доз от каждого источника излучения должно достигаться за счет уменьшения облучения критических групп населения для данного источника излучения.

Вопросы для проверки знаний по главе 3

1. Как можно защититься от α -, β -, γ - и нейтронного ионизирующих излучений?
2. Современные дозиметры и радиометры, основные принципы работы приборов.
3. Для чего служат Нормы радиационной безопасности?
4. Какие фундаментальные принципы лежат в основе разработки Норм радиационной безопасности?
5. Принцип обоснования.
6. Принцип нормирования.
7. Принцип оптимизации, польза – вред.
8. Риск. Понятие приемлемого риска.
9. Нормируемые величины в радиационной безопасности.
10. Для чего нужен радиационный контроль предприятий и территорий.
11. Роль службы радиационной безопасности?
12. Для чего нужны Нормы радиационной безопасности?
13. Принцип обоснования (польза – вред) и принцип нормирования.
14. Риск и ущерб.
15. Облучение природными источниками излучения.
16. Радиационный контроль организаций и территорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смагин, А.И. Введение в радиационную безопасность / А.И. Смагин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 92 с.
2. Солодкий, В.А. История развития лучевой диагностики в Российском научном центре рентгенорадиологии: к 90-летию со дня основания / В.А. Солодкий, П.М. Котляров, Н.В. Нуднов // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2014. – № 5. – С. 5–12.
3. Булдаков, Л.А. Радиоактивное излучение и здоровье / Л.А. Булдаков, В.С. Калистратова. – М.: Информ-Атом, 2003. – 165 с.
4. Сапожников, А.Ю. Радиоактивность окружающей среды / А.Ю. Сапожников, Р.А. Алиев, С.Н. Калмыков. – М.: БИНОМ: Лаборатория знаний, 2006. – 287 с.
5. Пивоваров, С.П. Радиационная экология / С.П. Пивоваров, В.П. Михалев. – М.: АСАДЕМА, 2004. – 240 с.
6. Ильин, Л.А. Радиационная безопасность и защита / Л.А. Ильин, В.Ф. Кириллов, И.П. Коренков. – М.: Медицина, 1996. – 336 с.
7. Радионуклиды и производственная деятельность человека / Л.А. Булдаков, И.Я. Василенко, В.С. Калистратов и др.: справ. изд. под ред. Л.А. Булдакова и В.С. Калистратовой. – М., 1977. – 144 с.
8. Ярмоненко, С.П. Радиобиология человека и животных / С.П. Ярмоненко, А.А. Вайнсон. – М.: Высш. школа, 2004. – 594 с.
9. Воробьева, В.И. Введение в радиоэкологию / В.И. Воробьева. – М.: Логос, 2009. – 358 с.
10. Большая медицинская энциклопедия. – <http://www.medical-enc.ru>.
11. Лурье, А.А. Сельскохозяйственная радиология и радиоэкология / А.А. Лурье. – М.: МСХА. 1999. – 134 с.
12. Гуськова, А.К. Лучевая болезнь человека (очерки) / А.К. Гуськова, Г.Д. Байсоголов. – М.: Медицина, 1971. – 380 с.
13. Чаклин, А.В. Проблема века / А.В. Чаклин. – 2-е изд., дораб. и доп. – М.: Знание, 1990. – 240 с.
14. Doll R., Peto R. The causes of cancer: quantitative estimates of avoidable risks of cancer in the United States today // J Nat Cancer Inst 1981; 66: pp. 1191–1308.
15. Mutscheller, A. Physical standards of protection against roentgen ray dangers / A. Mutscheller – Amer. J. Roentgen. – 1925. – Vol. 13. – P. 65.
16. Москалев, Ю.И. Некоторые итоги работы Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) за 45 лет / Ю.И. Москалев // в кн.: От радиобиологического эксперимента к человеку; под ред. Ю.И. Москалева. – М., 1976. – 252 с.

17. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ); пер с англ. / под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 343 с.
18. ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication No 60. – Ann ICRP 21 (1–3), Oxford: Pergamon Press (1991) (Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Ч. 1, Ч. 2. – М.: Энергоатомиздат, (1994).
19. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/09). – М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы: санитарные нормативы: Минздрав России, 2009. – 110 с.
20. The effects of low doses of irradiation on health. – Eur. J. OncoL, 1998, Vol. 3. – No. 4. – pp. 367–373.
21. Бурлакова Е.Б. Новые аспекты закономерностей действия низкоинтенсивного облучения в малых дозах / Е.Б. Бурлакова, А.Н. Голощапов, Г.П. Жижина, А.А. Конрадов // Радиационная биология. Радиоэкология – 1999. – Т. 39. – № 1. – С.26–33.
22. Смагин, А.И. Экология промышленных водоемов предприятия ядерного топливного цикла на Южном Урале / А.И. Смагин. – Озерск: Редакционно-издательский центр ВРБ, 2007. – 190 с.
23. Смагин, А.И. Экология водоемов в зоне техногенной радионуклидной геохимической аномалии на Южном Урале / А.И. Смагин; под ред. С.А. Романова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 205 с.
24. Алексахин, Р.М. Организация научных исследований по радиоэкологии на Восточно-Уральском радиоактивном следе / Р.М. Алексахин, Д.А. Криволицкий, В.И. Соколов // Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале: сб. ст. – М.: Наука, 1993. – С. 6–12.
25. Алексахин, Р.М. У истоков отечественной радиоэкологии (атомный ротамстед и радиоэкологическая мекка) / Р.М. Алексахин // Вопросы радиационной безопасности. – 1997. – № 3. – С. 58–62.
26. Алексахин, Р.М. Колыбель отечественной радиоэкологии / Р.М. Алексахин, Б.С. Пристер // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2008. – Т. 48, № 2. – С. 234–250.
27. Алексахин, Р.М. Радиационная защита окружающей среды: антропоцентрический и экоцентрический принципы / Р.М. Алексахин, С.В. Фесенко // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2004. – Т. 44, № 1. – С. 93–103.
28. Тихомиров, Ф.А. Современные проблемы и научно-прикладные задачи радиоэкологии / Ф.А. Тихомиров // Известия высшей школы. Биологические науки. – 1985. – № 1. – С. 5–15.

29. Криволуцкий, Д.А. Биоиндикация и экологическое нормирование на примере радиоэкологии /Д.А. Криволуцкий, Ф.А. Тихомиров, Е.А. Федоров, Е.Г. Смирнов // Журнал общей биологии. – 1986. – Т. 47, № 4. – С. 468–477.

30. Крышев, И.И. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учетом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 / И.И. Крышев, Т. Г. Сазыкина // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – 2013. – Т. 22, № 1. – С. 47–61.

31. Крышев, И.И. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России / И.И. Крышев, Е.П. Рязанцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИздАТ, 2010. – 496 с.

32. Методика оценки радиационных рисков на основе данных мониторинга радиационной обстановки / И.И. Крышев, Т.Г. Сазыкина, А.И. Крышев и др.; Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ – МЦД». – 2014. – 116 с.

33. Крышев, И.И. Радиоэкологическая обстановка в биосфере и реальность ее оптимизации / И.И. Крышев, Т.Г. Сазыкина // Биосфера. – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 203–217.

34. Казаков, С.В. О гигиеническом и экологическом подходах в радиационной защите / С.В. Казаков, И.И. Линге // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2004. – Т. 44, № 4. – С. 482–492.

35. Polikarpov, G.G. Effects of ionizing radiation upon aquatic organisms (Chronic irradiation) / G.G. Polikarpov // Atti della Giomata sul tema Alcuni Aspetti di Radioecologia. Associazione Italiana di Fisica Sanitaria e Protezione Contro le Radiazioni. XX Congresso Nazionale (Bologna, 1977): Proc. – Poligrafici Parma-Bologna, giugno 1978. – P. 25–46.

36. Брешиньяк, Ф. Охрана окружающей среды в XXI веке: радиационная защита биосферы, включая человека (Заявление Международного Союза Радиоэкологии) / Ф. Брешиньяк, Г. Поликарпов, Д. Отон и др. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2003. – Т. 43, № 4. – С. 494–496.

37. Поликарпов, Г.Г. Радиационная экология как научная основа радиационной защиты биосферы и человечества / Г.Г. Поликарпов // Проблемы радиационной и пограничных дисциплин; под ред. В.И. Мигунова и А.В. Трапезникова. – 2006. – Вып. 8. – С. 3–28.

38. Kinne, O. Ethics and eco-ethics / O. Kinne // Mar. Ecol. Progr. Ser. – 1997. – 153. – P. 1–3.

39. Kinne, O. Eco-ethics further developed text 01.05.2002 / O. Kinne // EEIU Brochure. – Oldendorf/Luhe: Inter-Research, 2002. – P. 1–6.

40. Казаков, С.В. Принципы оценки радиоэкологического состояния водных объектов / С.В. Казаков // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2004. – Т.44, № 6. – С. 694–704.

41. Алексахин, Р.М. Новейшие результаты исследований в области радиоэкологии / Р.М. Алексахин, С.А. Гераськин, А.А. Удалова // Вестник Российской академии наук. – 2015. – Т. 85, № 4. – С. 373–376.

42. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010).

43. Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» от 09.01.1996 № 3-ФЗ. – <http://www.consultant.ru>.

44. СанПиН 2.6.1.2800-10. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения.

СПИСОК ТЕРМИНОВ

Антиоксиданты или противooksидлители (также антиooksидлители, консерванты) – вещества, ингибирующие окисление. Это любое из химических веществ, в том числе естественные продукты деятельности организма и питательные вещества, поступающие с пищей, которые могут устранить окислительное действие свободных радикалов и других веществ.

Белок BPI – бактерицидный белок, увеличивающий проницаемость мембран клеток. Оказывает бактерицидное действие на многие виды грамотрицательных бактерий.

Биота (от греч. βιοτή – жизнь) – исторически сложившаяся совокупность видов живых организмов, объединенных общей областью распространения в настоящее время или в прошедшие геологические эпохи. В состав биоты входят как представители клеточных организмов (растения, животные, грибы, бактерии, протисты и пр.), так и бесклеточные организмы (например, вирусы). Биота является важной составной частью экосистем и биосферы. Биота активно участвует в биогеохимических процессах.

В-лимфоциты (В-клетки, от bursa fabricii птиц, где впервые были обнаружены) – функциональный тип лимфоцитов, играющих важную роль в обеспечении гуморального иммунитета, осуществляемого белками антигенами, растворимыми в крови и других жидкостях организма. При контакте с антигеном или стимуляции со стороны Т-клеток (см. Т-клетки) некоторые В-лимфоциты трансформируются в плазматические клетки, способные к продукции антител. Другие активированные В-лимфоциты превращаются в В-клетки памяти. Помимо продукции антител В-клетки выполняют множество других функций.

Вегетационный период – период года, в который возможны рост и развитие (вегетация) растений. Продолжительность периода зависит главным образом от температурного режима территории, который определяется географической широтой и особенностями климата данного региона.

Гемодинамика – движение крови по сосудам, возникающее вследствие разности гидростатического давления в различных участках кровеносной системы (кровь движется из области высокого давления в область низкого). Зависит от сопротивления току крови стенок сосудов и вязкости самой крови. О гемодинамике судят по минутному объему крови.

Гемопоз (лат. haemopoiesis), кроветворение – это процесс образования, развития и созревания клеток крови – лейкоцитов, эритроцитов, тромбоцитов у позвоночных. Классифицируют эмбриональный (внутриутробный) гемопоз и постэмбриональный гемопоз.

Геном (нем. Genom) – совокупность генов, характерных для гаплоидного набора хромосом данного вида организмов; основной гаплоидный набор хромосом.

Гетероциклические соединения (гетероциклы) – органические соединения, содержащие циклы, в состав которых наряду с углеродом входят и атомы других элементов.

Гормезис (иногда гермезис) (от греч. hórmēsis – быстрое движение, стремление) – стимулирующее действие умеренных доз стрессоров; стимуляция какой-либо системы организма внешними воздействиями, имеющими силу, не достаточную для проявления вредных факторов. Термин радиационный гормезис был предложен в 1980 году Т.Д. Лакки и означает благоприятное воздействие малых доз облучения.

Естественный усредненный радиационный фон обычно лежит в пределах 0,10–0,16 мкЗв/час. Нормой радиационного фона принято считать значение, не превышающее 0,20 мкЗв/час. Безопасным уровнем для человека считается порог в 0,30 мкЗв/час.

Изотопический спин (изоспин) – одна из внутренних характеристик (квантовое число), определяющая число зарядовых состояний адронов (элементарных частиц, участвующих в сильном взаимодействии). В частности, протон и нейтрон (общее наименование этих элементарных частиц – нуклоны) различаются значением проекции изоспина, тогда как абсолютные значения их изоспина одинаковы. Последнее выражает свойство изотопической инвариантности сильного взаимодействия. С точки зрения сильного взаимодействия протон и нейтрон являются одинаковыми частицами, а многие другие свойства у них также близки. Поэтому была разработана модель, по которой любой нуклон обладает изотопическим спином, равным $1/2$, у которого есть две возможные «проекции» в особом изотопическом пространстве. Когда проекция изотопического спина I_z равна $+1/2$, то нуклон становится протоном, а когда $-1/2$ – нейтроном. (Это соглашение о знаках принято в физике элементарных частиц; в ядерной физике для оси z изотопического пространства выбрано противоположное направление, чтобы проекция изоспина нейтрона была равна $+1/2$ и суммарная проекция изоспина у большинства ядер была положительной). Такое поведение изотопического спина выглядит естественным с точки зрения квантовой механики, поскольку в ней уже есть квантовое число с аналогичными свойствами – спин. По аналогии с этим названием и был введен термин «изотопический спин».

Индуративный отек развивается в результате поражения не только кровеносных, но и лимфатических сосудов, что ведет к нарушению оттока лимфы, отеку и склерозу кожи и подкожной клетчатки. В области

индуриативного отека может возникать некроз кожи, ведущий к образованию глубоких лучевых язв.

Компьютерная томография – метод неразрушающего послойного исследования внутреннего строения предмета, был предложен в 1972 году Годфри Хаунсфилдом и Алланом Кормаком. За эту разработку ученые были удостоены Нобелевской премии. Метод основан на измерении и сложной компьютерной обработке разности ослабления рентгеновского излучения различными по плотности тканями. В настоящее время рентгеновская компьютерная томография является основным методом исследования внутренних органов человека с использованием рентгеновского излучения.

Костно-мозговой синдром развивается при облучении в диапазоне доз 1–10 Гр, средняя продолжительность жизни – не более 40 суток, на первый план выступают нарушения гемопоэза – процесса образования, развития и созревания клеток крови – лейкоцитов, эритроцитов, тромбоцитов у позвоночных.

Керма – сумма начальных кинетических энергий всех заряженных частиц, освобожденных незаряженным ионизирующим излучением (таким как фотоны или нейтроны) в образце вещества, отнесенная к массе образца. При низких энергиях первичного излучения керма примерно равна поглощенной дозе, тогда как при высоких энергиях керма намного выше поглощенной дозы, поскольку часть энергии уносится из поглощающего объема в форме рентгеновского тормозного излучения или быстрых электронов.

Макроэргические соединения (греч. makros – большой + ergon – работа, действие); синоним: высокоэргические соединения. К макроэргическим соединениям относятся аденозинтрифосфорная кислота (АТФ), аденозиндифосфорная кислота (АДФ), а также пирофосфат ($H_4P_2O_7$), полифосфаты (полимеры метафосфорной кислоты – $(HPO_3)_n \cdot H_2O$) и ряд других соединений. Самое важное макроэргическое соединение – АТФ.

Метаболизм (от греч. μεταβολή – превращение, изменение), или обмен веществ – набор химических реакций, которые возникают в живом организме для поддержания жизни. Эти процессы позволяют организмам расти и размножаться.

Метаболиты – промежуточные продукты обмена веществ в живых клетках. Многие из них оказывают регулирующее влияние на биохимические и физиологические процессы в организме. Метаболиты образуются в клетках, тканях и органах растений и животных в процессе промежуточного обмена и участвуют в последующих процессах ассимиляции и диссимиляции. В физиологии и медицине к метаболитам обычно относят продукты внутриклеточного обмена, подлежащие окончательному распаду и удале-

нию из организма. Поступая в кровь, большинство метаболитов принимает участие в биохимических процессах регуляции с помощью биологически активных химических веществ, которые разносятся по организму кровью или лимфой, а также путем диффузии в межклеточной жидкости, осуществляя специфические и неспецифические влияния на биохимические и физиологические процессы.

Меристема (с др.-греч. – μεριστός – делимый), или образовательная ткань, или меристематическая ткань, – обобщающее название для тканей растений, состоящих из интенсивно делящихся и сохраняющих физиологическую активность на протяжении всей жизни клеток, обеспечивающих непрерывное нарастание массы растения и предоставляющих материал для образования различных специализированных тканей (проводящих, механических и т. п.).

Митоз – обычное деление соматических клеток, благодаря которому организм растет, развивается и регенерирует ткани. Митотическое деление в норме заканчивается появлением двух дочерних клеток, каждая из которых содержит набор хромосом и генов, идентичных родительской клетке. В течение жизни соматических клеток возможны десятки и даже сотни последовательных митозов.

Некроз (от греческого nekrosis – омертвление) – омертвление ткани под влиянием нарушения кровообращения, химического или термического воздействия (ожог, отморожение), травмы и др. Необратимый процесс омертвления пораженных тканей живого организма в результате воздействия внешних или внутренних факторов. Такое патологическое состояние крайне опасно для человека, чревато самыми тяжелыми последствиями и требует лечения под наблюдением высококвалифицированных специалистов. Зона некроза, окруженная так называемой демаркационной линией, подвергается гнойному расплавлению; на месте дефекта ткани образуется рубец.

Нитрофураны – группа антибактериальных средств. Например, фурацилин – лекарственный препарат из группы нитрофуранов.

Онтогенез (от лат. on, род. падеж ontos – сущее и génesis – происхождение, зарождение), онтогения, индивидуальное развитие особи, вся совокупность ее преобразований от зарождения (оплодотворение яйцеклетки, начало самостоятельной жизни органа, вегетативного размножения или деление материнской одноклеточной особи) до конца жизни (смерть или новое деление особи).

Оогамия (от греч. ὄον – яйцо и gámos – брак) – форма полового процесса, при котором зигота (оплодотворенная яйцеклетка) образуется в результате слияния гетерогамет – половых клеток, содержащих разные половые хромосомы, например, сперматозоиды с X- и Y-хромосомами, одна из ко-

торых представлена макрогаметой – неподвижной крупной яйцеклеткой (яйцом) с мелкой, обычно подвижной, мужской половой клеткой. Свойственна всем многоклеточным животным и высшим растениям, а также многим низшим растениям.

Органеллы (от орган и др.-греч. εἶδος – вид) – постоянные компоненты клетки, жизненно необходимые для ее существования. Органеллы располагаются внутри клетки в цитоплазме. Органеллы делятся на мембранные (одномембранные или двумембранные) и немембранные.

Питтсбургский университет – основан в 1787 году. Получил известность как мировой центр медицинских исследований.

Профузное кровотечение – быстрая потеря крови или любое острое кровотечение.

Резистентность – устойчивость организмов к тем либо иным неблагоприятным воздействиям, химическим препаратам, включая антибиотики и ядохимикаты, воздействию ионизирующего излучения и др. Резистентность может быть естественной и приобретенной.

Радиационно опасный объект (РОО). Объект, на котором хранят, перерабатывают, используют или транспортируют радиоактивные вещества, при аварии на котором или его разрушении может произойти облучение ионизирующим излучением или радиоактивное загрязнение людей, сельскохозяйственных животных и растений, объектов народного хозяйства, а также окружающей природной среды. [ГОСТ Р 22.0.05-94, ст. 3.2.9]

Сальмозан – иммуномодулятор бактериального происхождения стимулирует клеточный и гуморальный иммунитет, активизирует макрофаги, повышает неспецифическую резистентность организма к инфекциям, вызываемым патогенными микроорганизмами, обладает адьювантным действием. Совместно с вакцинами стимулирует иммунный ответ и пролонгирует выработанный специфический иммунитет организма.

Сепсис – тяжелое инфекционное заболевание, развивающееся при прогрессировании и распространении инфекционного процесса в организме через кровь. Гиппократ еще 2000 лет назад назвал сепсис заболеванием с распадом тканей и гниением, без лечения неизбежно приводящим к смерти. Чаще всего возбудителями сепсиса выступают стафилококки, кишечная палочка, стрептококки, пневмококки.

Спонтанное деление – разновидность радиоактивного распада тяжелых атомных ядер. Спонтанное деление является делением ядра, происходящим без внешнего возбуждения (вынужденного деления), и дает такие же продукты, как и вынужденное деление: осколки (ядра более легких элементов) и несколько нейтронов.

Техногенно-измененный радиационный фон – естественный радиационный фон, измененный в результате деятельности человека.

Токсемия (от др.-греч. τοξικός – ядовитый и αἷμα – кровь) – отравление организма, вызванное наличием в крови токсинов, поступающих извне или образующихся в самом организме.

Филогенез – это процесс исторического развития органического мира. История рода (филогения) описывает происхождение видов и групп организмов, их близкое и дальнее родство, т.е. происхождение от общих предков в ближнем и дальнем прошлом.

Церебрастенический синдром развивается при постоянном воздействии негативных факторов на нервную систему или организм, которые до этого подвергались воздействию повреждающих факторов. Происходит ухудшение памяти, повышенная утомляемость, невозможность сосредоточиться, перепады настроения.

Цитотоксические Т-клетки способны непосредственно атаковать и уничтожать микроорганизмы, а иногда даже собственные клетки организма. Эти клетки называют клетками – киллерами. Благодаря рецепторным белкам на поверхностях цитотоксических клеток они плотно связываются с микроорганизмами или клетками, содержащими соответствующий специфический антиген. Затем атакуемая клетка уничтожается. После связывания цитотоксическая Т-клетка секретирует так называемые перфорины (белки, формирующие отверстия в мембране атакуемой клетки). Через эти отверстия из интерстициального пространства в клетку быстро течет жидкость. Кроме того, цитотоксическая Т-клетка выделяет токсические вещества прямо в атакуемую клетку. Почти немедленно атакуемая клетка сильно разбухает и обычно вскоре после этого разрушается.

Цитопения – дефицит одного или нескольких различных видов клеток крови. Наиболее частым в клинической практике является изолированное уменьшение количества лейкоцитов (лейкопения) и тромбоцитов (тромбоцитопения).

Эндогенный – внутреннего происхождения; в медицине – происходящий от причин, лежащих во внутренней среде организма.

Эритема (греч. ἔρυθρός – красный) – сильное покраснение кожи, вызванное расширением капилляров. Один из симптомов воспаления.

Яйцеклетка (науч. – ооцит, реже – овоцит) – женская гамета животных, высших растений, а также многих водорослей и других протистов (к протистам относятся все организмы, тело которых не образует настоящих тканей, не имеет значения, каким количеством клеток они образованы), которым свойственна оогамия, (см. выше).

ПРИЛОЖЕНИЕ

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Применительно к санитарным правилам (ОСПОРБ 99/2010) приняты следующие термины и определения (в ред. Изменений № 1, утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 16.09.2013 № 43)

1. **Авария радиационная** – потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью оборудования, неправильными действиями работников (персонала), стихийными бедствиями или иными причинами, которая могла привести или привела к облучению людей выше установленных норм или радиоактивному загрязнению окружающей среды.

2. **Активность (A)** – мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени:

$$A = \frac{dN}{dt}, \quad (1)$$

где dN – ожидаемое число спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния, происходящих за промежуток времени dt . Единицей активности является беккерель (Бк).

Использовавшаяся ранее внесистемная единица активности кюри (Ки) составляет $3,7 \times 10^{10}$ Бк.

3. **Активность минимально значимая (МЗА)** – активность источника ионизирующего излучения в помещении или на рабочем месте, при превышении которой требуется разрешение органов исполнительной власти, уполномоченных осуществлять федеральный государственный санитарно-эпидемиологический надзор на использование этого источника, если при этом также превышено значение минимально значимой удельной активности.

4. **Активность минимально значимая удельная (МЗУА)** – удельная активность источника ионизирующего излучения в помещении или на рабочем месте, при превышении которой требуется разрешение органов исполнительной власти, уполномоченных осуществлять федеральный государственный санитарно-эпидемиологический надзор на использование этого источника, если при этом также превышено значение минимально значимой активности.

5. **Активность удельная (объемная)** – отношение активности A радионуклида в веществе к массе m (объему V) вещества:

$$A_m = \frac{A}{m}; \quad A_v = \frac{A}{V}. \quad (2)$$

Единица удельной активности – беккерель на килограмм, Бк/кг. Единица объемной активности – беккерель на метр кубический, Бк/м³.

6. **Активность эквивалентная равновесная объемная (ЭРОА) дочерних продуктов изотопов радона** – ^{122}Rn и ^{220}Rn – взвешенная сумма объемных активностей короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона – ^{218}Po (RaA); ^{214}Pb (RaB); ^{214}Bi (RaC); ^{212}Pb (ThB); ^{212}Bi (ThC) соответственно:

$$(\text{ЭРОА})_{\text{Rn}} = 0,10 A_{\text{RaA}} + 0,52 A_{\text{RaB}} + 0,38 A_{\text{RaC}}$$

$$(\text{ЭРОА})_{\text{Th}} = 0,91 A_{\text{ThB}} + 0,09 A_{\text{ThC}},$$

где A_i – объемные активности дочерних продуктов изотопов радона.

7. **Вещество радиоактивное** – вещество в любом агрегатном состоянии, содержащее радионуклиды с активностью, на которые распространяются требования НРБ-99/2009 и настоящих Правил.

8. **Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы (W_R)** – используемые в радиационной защите множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов (табл. П.1).

Таблица П.1

Множители поглощенных доз
для учета относительной эффективности

Фотоны любых энергий	1
Электроны и мюоны любых энергий	1
Нейтроны с энергией менее 10 кэВ	5
Нейтроны с энергией от 10 кэВ до 100 кэВ	10
Нейтроны с энергией от 100 кэВ до 2 МэВ	20
Нейтроны с энергией от 2 МэВ до 20 МэВ	10
Нейтроны с энергией более 20 МэВ	5
Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

Примечание. Все значения относятся к излучению, падающему на тело, а в случае внутреннего облучения – испускаемому при ядерном превращении.

9. **Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы (W_T)** – множители эквивалентной дозы в органах и тканях, используемые в радиационной защите для учета различной чувствительности разных органов и тканей в возникновении стохастических эффектов радиации (табл. П.2).

Таблица П.2

Множители эквивалентной дозы в органах и тканях

Гонады	0,20
Костный мозг (красный)	0,12
Толстый кишечник	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Грудная железа	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Остальное	0,05*

*При расчетах учитывать, что «Остальное» включает надпочечники, головной мозг, экстрагаторокальный⁵⁵ отдел органов дыхания, тонкий кишечник, почки, мышечную ткань, поджелудочную железу, селезенку, вилочковую железу и матку. В тех исключительных случаях, когда один из перечисленных органов или тканей получает эквивалентную дозу, превышающую самую большую дозу, полученную любым из двенадцати органов или тканей, для которых определены взвешивающие коэффициенты, следует приписать этому органу или ткани взвешивающий коэффициент, равный 0,025, а оставшимся органам или тканям из рубрики «Остальное» приписать суммарный коэффициент, равный 0,025.

10. **Вмешательство** – деятельность, направленная на снижение вероятности, либо дозы, либо неблагоприятных последствий облучения населения при радиационных авариях, при обнаружении радиоактивных загрязнений объектов окружающей среды или повышенных уровней природного облучения на территориях, в зданиях и сооружениях.

11. **Группа критическая** – группа лиц из населения (не менее 10 человек), однородная по одному или нескольким признакам – полу,

⁵⁵ Экстрагаторокальный отдел органов дыхания: нос, рот, глотка, верхняя часть гортани.

возрасту, социальным или профессиональным условиям, месту проживания, рациону питания, которая подвергается наибольшему радиационному воздействию по данному пути облучения от данного источника излучения.

12. **Дезактивация** – удаление радиоактивного загрязнения с какой-либо поверхности или из какой-либо среды, или его снижение.

13. **Доза поглощенная (D)** – величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу:

$$D = \frac{\overline{de}}{dm}, \quad (3)$$

где de – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме, а dm – масса вещества в этом объеме.

Энергия может быть усреднена по любому определенному объему вещества, и в этом случае средняя доза будет равна полной энергии, переданной веществу, содержащемуся в данном объеме, деленной на массу этого вещества. В единицах СИ поглощенная доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм ($\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$), и имеет специальное название – грей (Гр).

Использовавшаяся ранее внесистемная единица рад равна 0,01 Гр.

14. **Доза в органе или ткани (D_T)** – средняя поглощенная доза в определенном органе или ткани человеческого тела:

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D \times dm, \quad (4)$$

где m_T – масса органа или ткани; D – поглощенная доза в элементе массы dm .

15. **Доза эквивалентная ($H_{T,R}$)** – поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, W_R :

$$H_{T,R} = W_R \times D_{T,R}, \quad (5)$$

где $D_{T,R}$ – средняя поглощенная доза в органе или ткани T , W_R – взвешивающий коэффициент для излучения R .

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

$$H_T = \sum_R H_{T,R}. \quad (6)$$

Единицей эквивалентной дозы является зиверт (Зв).

16. **Доза эффективная (E)** – величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты:

$$E = \sum_T W_T \times H_T, \quad (7)$$

где H_T – эквивалентная доза в органе или ткани T ; W_T – взвешивающий коэффициент для органа или ткани T .

Единица эффективной дозы – зиверт (Зв).

17. **Доза эквивалентная ($H_T(\tau)$) или эффективная ($E(\tau)$) ожидаемая при внутреннем облучении** – доза за время τ , прошедшее после поступления радиоактивных веществ в организм:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt, \quad (8)$$

$$E(\tau) = \sum_T W_T \times H_T(\tau), \quad (9)$$

где t_0 – момент поступления, $\dot{H}_T(t)$ – мощность эквивалентной дозы к моменту времени t в органе или ткани T .

Когда τ не определено, то его следует принять равным 50 годам для взрослых и $(70 - t_0)$ – для детей.

18. **Доза эффективная (эквивалентная) годовая** – сумма эффективной (эквивалентной) дозы внешнего облучения, полученной за календарный год, и ожидаемой эффективной (эквивалентной) дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же год.

Единица годовой эффективной дозы – зиверт (Зв).

19. **Доза предотвращаемая** – прогнозируемая доза вследствие радиационной аварии, которая может быть предотвращена защитными мероприятиями.

20. **Загрязнение радиоактивное** – присутствие радиоактивных веществ на поверхности, внутри материала, в воздухе, в теле человека или в другом месте, в количестве, превышающем уровни, установленные НРБ-99/2009 и настоящими Правилами.

21. **Загрязнение поверхности неснимаемое (фиксированное)** – радиоактивные вещества, которые не переносятся при контакте на другие предметы и не удаляются при дезактивации.

22. **Загрязнение поверхности снимаемое (нефиксированное)** – радиоактивные вещества, которые переносятся при контакте на другие предметы и удаляются при дезактивации.

23. **Заключение санитарно-эпидемиологическое** – документ, удостоверяющий соответствие (несоответствие) санитарным правилам факторов среды обитания, хозяйственной и иной деятельности, продукции, работ и услуг, а также проектов нормативных актов, эксплуатационной документации.

24. **Захоронение отходов радиоактивных** – безопасное размещение радиоактивных отходов без намерения последующего их извлечения.

25. **Зона наблюдения** – территория за пределами санитарно-защитной зоны, на которой проводится радиационный контроль.

26. **Зона радиационной аварии** – территория, на которой установлен факт радиационной аварии.

27. **Источник ионизирующего излучения** – (в рамках данного документа - источник излучения) радиоактивное вещество или устройство, испускающее или способное испускать ионизирующее излучение, на которые распространяется действие НРБ-99/2009 и настоящих Правил.

28. **Источник радионуклидный закрытый** – источник излучения, устройство которого исключает поступление содержащихся в нем радионуклидов в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан.

29. **Источник радионуклидный открытый** – источник излучения, при использовании которого возможно поступление содержащихся в нем радионуклидов в окружающую среду.

30. **Источник излучения природный** – источник ионизирующего излучения природного происхождения, на который распространяется действие НРБ-99/2009 и настоящих Правил.

31. **Источник излучения техногенный** – источник ионизирующего излучения, специально созданный для его полезного применения или являющийся побочным продуктом этой деятельности.

32. **Категория объекта радиационного** – характеристика объекта по степени его потенциальной радиационной опасности для населения и персонала в условиях возможной максимальной для данного объекта радиационной аварии.

33. **Квота** – часть предела дозы, установленная для ограничения облучения населения от конкретного техногенного источника излучения и пути облучения (внешнее, поступление с водой, пищей и воздухом).

34. **Класс работ** – характеристика работ с открытыми источниками ионизирующего излучения по степени потенциальной опасности для персонала, определяющая требования по радиационной безопасности в зависимости от радиотоксичности и активности нуклидов.

35. **Контроль радиационный** – получение информации о радиационной обстановке в организации, в окружающей среде и об уровнях облучения людей (включает в себя дозиметрический и радиометрический контроль).

36. **Место рабочее** – место постоянного или временного пребывания персонала для выполнения производственных функций в условиях воздействия ионизирующего излучения.

37. **Мощность дозы** – доза излучения за единицу времени (секунду, минуту, час).

38. **Население** – все лица, включая персонал вне работы с источниками ионизирующего излучения.

39. **Обеспечение качества** – планируемые и систематические действия, необходимые для обеспечения работы медицинского рентгенорадиологического оборудования и выполнения процедур на уровне, удовлетворяющем установленным медико-техническим требованиям.

40. **Облучение** – воздействие на человека ионизирующего излучения.

41. **Облучение аварийное** – облучение в результате радиационной аварии.

42. **Облучение медицинское** – облучение ионизирующим излучением, которому подвергаются:

а) пациенты при прохождении ими диагностических или терапевтических медицинских процедур;

б) лица (за исключением медицинского персонала), которые сознательно и добровольно помогают в уходе за пациентами в больнице или дома;

в) лица, проходящие медицинские обследования в связи с профессиональной деятельностью или в рамках медико-юридических процедур;

г) лица, участвующие в медицинских профилактических обследованиях и в медико-биологических исследованиях.

43. **Облучение планируемое повышенное** – планируемое облучение персонала в дозах, превышающих установленные основные пределы доз, с целью предупреждения развития радиационной аварии или ограничения ее последствий.

44. **Облучение потенциальное** – облучение, которого нельзя ожидать с абсолютной уверенностью, но которое может иметь место в результате аварии с источником, либо события или последовательности событий гипотетического характера, включая отказы оборудования и ошибки во время эксплуатации.

45. **Облучение природное** – облучение, которое обусловлено природными источниками излучения.

46. **Облучение производственное** – облучение работников от всех техногенных и природных источников ионизирующего излучения в процессе производственной деятельности, за исключением облучения за счет нахождения в производственных помещениях, удовлетворяющих установленным требованиям.

47. **Облучение профессиональное** – облучение персонала в процессе его работы с техногенными источниками ионизирующего излучения.

48. **Облучение техногенное** – облучение от техногенных источников как в нормальных, так и в аварийных условиях, за исключением медицинского облучения пациентов.

49. **Обращение с отходами радиоактивными** – все виды деятельности, связанные со сбором, транспортированием, переработкой, хранением и захоронением радиоактивных отходов.

50. **Объект радиационный** – физический объект (сооружение, здание, огороженный комплекс зданий), где осуществляется обращение с техногенными источниками ионизирующего излучения.

51. **Отходы радиоактивные** – не предназначенные для дальнейшего использования вещества в любом агрегатном состоянии, в которых сумма отношений удельных активностей радионуклидов к их МЗУА превышает 1.

52. **Паспорт радиационно-гигиенический организации** – документ, характеризующий состояние радиационной безопасности в организации и содержащий рекомендации по его улучшению.

53. **Паспорт радиационно-гигиенический территории** – документ, характеризующий состояние радиационной безопасности населения территории и содержащий рекомендации по его улучшению.

54. **Персонал** – лица, работающие с техногенными источниками излучения (группа А) или работающие на радиационном объекте или на

территории его санитарно-защитной зоны и находящиеся в сфере воздействия техногенных источников (группа Б).

55. **Предел дозы (ПД)** – значение эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения населения и персонала за счет нормальной эксплуатации радиационного объекта, которое не должно превышать. Соблюдение предела годовой дозы предотвращает возникновение детерминированных эффектов, а вероятность стохастических эффектов сохраняется при этом на приемлемом уровне.

56. **Предел годового поступления (ПГП)** – уровень поступления данного радионуклида в организм в течение года, который при монофакторном воздействии приводит к облучению условного человека ожидаемой дозой, равной 20 мЗв для персонала группы А, 5 мЗв для персонала группы Б и 1 мЗв для населения.

57. **Радиационная безопасность населения** – состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения.

58. **Работа с источником ионизирующего излучения** – все виды обращения с источником излучения на рабочем месте, включая радиационный контроль.

59. **Работа с радиоактивными веществами** – все виды обращения с радиоактивными веществами на рабочем месте, включая радиационный контроль.

60. **Референтный диагностический уровень (РДУ)** – уровень дозы в медицинской рентгенорадиологической диагностике или активности радиофармацевтического препарата, вводимой пациенту (в случае радионуклидной диагностики), при типовых исследованиях однородных групп пациентов с использованием современного распространенного оборудования. РДУ служит средством оценки того, не является ли уровень облучения пациента в данном ЛПУ необычно большим или малым для рассматриваемого исследования.

61. **Риск радиационный** – вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения.

62. **Санитарно-защитная зона** – территория вокруг радиационного объекта, за пределами которой уровень облучения населения за счет нормальной эксплуатации радиационного объекта не превышает установленную для него квоту.

63. **Санпропускник** – комплекс помещений, предназначенных для смены одежды, обуви, санитарной обработки персонала, контроля радиоактивного загрязнения кожных покровов, средств индивидуальной защиты, специальной и личной одежды персонала.

64. **Саншлюз** – помещение между зонами радиационного объекта, предназначенное для предварительной дезактивации и смены дополнительных средств индивидуальной защиты.

65. **Средство индивидуальной защиты** – техническое средство, носимое человеком и используемое для предотвращения или уменьшения воздействия на человека вредных и/или опасных факторов, а также для защиты от загрязнения.

66. **Уровень вмешательства (УВ)** – уровень радиационного фактора, при превышении которого следует проводить определенные защитные мероприятия.

67. **Уровень контрольный** – значение контролируемой величины дозы, мощности дозы, радиоактивного загрязнения и т.д., устанавливаемое для оперативного радиационного контроля с целью закрепления достигнутого уровня радиационной безопасности, обеспечения дальнейшего снижения облучения персонала и населения, радиоактивного загрязнения окружающей среды.

68. **Устройство (источник), генерирующее ионизирующее излучение** – электрофизическое устройство (рентгеновский аппарат, ускоритель, генератор и т.д.), в котором ионизирующее излучение возникает за счет изменения скорости заряженных частиц, их аннигиляции или ядерных реакций.

69. **Эффекты облучения детерминированные** – клинически выявляемые вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, в отношении которых предполагается существование порога, ниже которого эффект отсутствует, а выше - тяжесть эффекта зависит от дозы.

70. **Эффекты облучения стохастические** – вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, не имеющие дозового порога возникновения, вероятность возникновения которых пропорциональна дозе и для которых тяжесть проявления не зависит от дозы.

Учебное издание

Смагин Андрей Иванович

**БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ И ЗАЩИТА
ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Учебное пособие

Техн. редактор *А.В. Миних*
Дизайн обложки *А.В. Глушковой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 11.12.2018. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 6,97. Тираж 100 экз. Заказ 536/180.

Отпечатано с оригинал-макета заказчика
в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.