

Радиобиология с основами радиоэкологии

Рекомендовано

Учебно-методическим объединением высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области зоотехнии и ветеринарии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 36.05.01 Ветеринария

Ставрополь
«АГРУС»
2019

УДК 619:616-001.28/.29

Авторы:

доктор ветеринарных наук, профессор В.А. Оробец
кандидат химических наук Э.В. Горчаков

Рецензенты:

Заведующий кафедрой радиобиологии и вирусологии им. академиков А.Д. Белова и В.Н. Сюрин ФГБОУ ВПО МГАВМиБ, доктор биологических наук, профессор Н.П. Лысенко;

Профессор кафедры паразитологии, ветеринарно-санитарной экспертизы и зоогигиены ФГБОУ ВПО Кубанский государственный аграрный университет, доктор биологических наук, профессор М.И. Звержановский

Радиобиология с основами радиоэкологии : учебное пособие / В.А.Оробец, Э.В. Горчаков, Н.И. Тарануха; Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь : АГРУС, 2015. - с.

Учебное пособие рассматривает основные теоретические вопросы радиоэкологии и радиобиологии. Включает несколько разделов: «Физические основы радиоэкологии», «Основы дозиметрии», «Миграция радионуклидов в природной среде», «Действие ионизирующих излучений на биологические объекты» и др.

Рекомендовано пособие для самостоятельной работы студентов и аспирантов очной и заочной форм обучения биологических специальностей сельскохозяйственных вузов и преподавателей, осуществляющих подготовку специалистов по направлениям подготовки 36.05.01 – Ветеринария и 36.03.01 – Ветеринарно-санитарная экспертиза продуктов животноводства.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Введение в радиобиологию	8
1.1.	Определение радиобиологии	8
1.2.	Краткая история развития радиобиологии	10
1.3.	Связь радиобиологии с другими науками	11
1.4.	Значение радиобиологии для сельскохозяйственной науки и производства	12
2.0.	Физическая характеристика атомов и радиоактивный распад ядер	13
2.1.	Строение атома	13
2.2.	Виды радиоактивного распада	18
2.3.	Закон радиоактивного распада	21
3.0.	Виды ионизирующих излучений и их взаимодействие с веществом	24
3.1.	Виды ионизирующего излучения.	24
3.2.	Проникающая способность и плотность ионизации ионизирующих излучений	26
3.3.	Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом	29
4.0.	Дозы ионизирующих излучений.	34
4.1.	Дозы ионизирующих излучений и единицы их измерения	37
4.2.	Линейная передача энергии и относительная биологическая эффективность	39
4.3.	Виды облучения	44
4.4.	Понятие «малые дозы» и их биологическое действие на живые организмы	45
4.5.	Радиационный гормезис	47
5.0.	Приборы и приспособления для обнаружения и регистрации ионизирующих излучений	48
5.1.	Детекторы	48
5.2.	Приборы для измерения ионизирующих излучений	52
5.3.	Основные методы измерения радиоактивности	55
5.4.	Радиационно-экологическое районирование комплексом геофизических методов	57
6.0.	Естественные источники ионизирующих излучений и радионуклидов	58

6.1.	Космогенные источники	59
6.2.	Природные радиоактивные вещества	61
7.0.	Антропогенные источники ионизирующих излучений и радионуклидов	64
7.1.	Технологически повышенный естественный радиационный фон	65
7.2.	Загрязнение окружающей среды радионуклидами в результате испытания атомного и ядерного оружия	67
7.3.	Радиоактивность, связанная с работой предприятий ядерно-топливного цикла	69
7.4.	Радиационные аварии	72
8.0.	Территории бывшего СССР с повышенной радиоактивной загрязненностью среды	75
8.1.	Радиоактивные загрязнения, вызванные испытаниями ядерного оружия	75
8.2.	Аварийное радиоактивное загрязнение среды	76
8.3.	Радиационная обстановка в Ставропольском крае	82
9.0.	Миграция радионуклеидов. Распространение радионуклидов в атмосфере	82
9.1.	Физические и химические формы существования радионуклидов (общие аспекты)	82
9.2.	Процессы переноса радионуклидов в атмосфере	82
9.3.	Фракционирование радионуклидов	84
9.4.	Осаждение радиоактивных аэрозолей на земную поверхность	86
10.0.	Поведение радионуклидов в почве	89
10.1.	Миграция радионуклидов в почве	89
10.2.	Формы нахождения радионуклидов в почвах	91
10.3.	Поглощение и закрепление радионуклидов почвами	92
10.4.	Свойства почв, влияющие на поведение радионуклидов	93
11.0.	Поступление радиоактивных веществ в растения	97
11.1.	Некорневой путь поступления радиоактивных веществ в растения	98
11.2.	Корневой путь поступления радиоактивных	101

	веществ в растения	
11.3.	Факторы, влияющие на накопление радионуклидов в растительных кормах, и периоды в развитии радиационной ситуации	104
11.4.	Миграция радионуклидов в травяных и лесных экосистемах	105
12.0.	Поступление радиоактивных веществ в организм сельскохозяйственных животных	107
12.1.	Факторы, определяющие степень поражения организма животных	107
12.2.	Пути поступления радиоактивных веществ в организм животных	107
12.3.	Всасывание радионуклидов в желудочно-кишечном тракте	108
12.4.	Распределение и метаболизм радиоактивных веществ в организме	109
12.5.	Выведение радионуклидов из организма животных	110
13.0.	Действие ионизирующих излучений на биологические объекты. Прямое и косвенное действие ионизирующих излучений	111
13.1.	Общие аспекты действия ионизирующего излучения	111
13.2.	Прямое и косвенное действие ионизирующих излучений	111
13.3.	Эффект разведения и кислородный эффект	114
14.0.	Радиационные повреждения ДНК и проявления лучевого поражения на уровне клетки	115
14.1.	Виды радиационных повреждений ДНК	115
14.2.	Восстановительные процессы в облученной клетке	117
14.3.	Задержка прохождения клеточного цикла	118
14.4.	Радиационная задержка клеточного деления	120
14.5.	Мутации и хромосомные аберрации	121
14.6.	Индукция и реализация программируемой смерти клетки (апоптоза)	123
14.7.	Генетическая и геномная нестабильность	124
15.0.	Радиочувствительность животных	126
15.1.	Видовая и популяционная радиочувствительность	126
15.2.	Радиочувствительность органов и тканей	127

15.3.	Половые различия в радиочувствительности	128
15.4.	Возрастная радиочувствительность	128
16.0.	Основные эффекты облучения животных и человека	129
16.1.	Непосредственные и опосредованные эффекты облучения	129
16.2.	Детерминированные эффекты облучения	130
16.3.	Стохастические эффекты облучения	138
16.4.	Тератогенные эффекты облучения	139
17.0.	Основы радиационной безопасности	140
17.1.	Нормы радиационной безопасности (НРБ)	140
17.2.	Организация работы с источниками ионизирующих излучений	145
17.3.	Виды и средства индивидуальной защиты	149
17.4.	Международные и Российские организации, занимающиеся вопросами действия ионизирующих излучений на живые организмы	150
18.0.	Химические средства противолучевой защиты	152
18.1.	Основные противолучевые препараты (радиопротекторы)	152
18.2.	Основные радиосенсибилизаторы	157
18.3.	Возможности химических средств противолучевой защиты человека	160
19.0.	Определение дозы внешнего и внутреннего облучения расчётным методом.	163
19.1.	Общая характеристика поступления радиоактивных веществ в организм	164
19.2.	Выведение радионуклидов из организма	167
19.3.	Расчетный метод определения доз облучения от внешних источников	168
19.4.	Расчетный метод определения доз облучения при поступлении радиоизотопов внутрь организма	169
20.0.	Ветеринарно-санитарная экспертиза животноводства полученной на территории, загрязнённой радионуклидами	172
20.1.	Общее положение	172
20.2.	Предубойный осмотр, сортировка и убой животных	173

20.3.	Послеубойный осмотр туш и органов	176
20.4.	Радиационная экспертиза продукции животноводства	179
21.0.	Дезактивация продуктов и сырья животного происхождения	182
21.1.	Общие положения	182
21.2.	Дезактивация мяса	184
21.3.	Дезактивация мяса кроликов, кур, субпродуктов и других продуктов убоя	186
21.4.	Дезактивация шерсти, кожевенного и шумно-медового сырья	188
21.5.	Дезактивация молока	191
21.6.	Утилизация (захоронение) радиоактивных отходов, образующихся после дезактивации продукции животноводства	194
22.0.	Система защитных и реабилитационных ветеринарных мероприятий на территории, на территории загрязнённой радионуклидами.	196
23.0.	Задачи ветеринарной науки при радиоактивном загрязнении сельскохозяйственных угодий.	203
	Библиографический список	208
	ПРИЛОЖЕНИЕ	212

ВВЕДЕНИЕ

Радиобиология составляет часть ветеринарных наук. В подготовке врача ветеринарной медицины радиобиология является одной из дисциплин, определяющих профессиональную подготовку специалиста. Непосредственная задача радиобиологии заключается в изучении элементарного строения мира, различных видов ионизирующих излучений и влияние данных излучений на рост, развитие и жизнедеятельность живых организмов, влияния на особенности физических и химических свойств соединений в живых организмах, разработке способов уменьшения негативного воздействия ионизирующих излучений, контроля воздействия и лечения последствий после определенной дозы облучения.

Радиобиология представляет собой науку, связывающую физические, химические и фармацевтические дисциплины, с одной стороны, и медико-биологические дисциплины, с другой. Для тех и других объектом исследования являются живые организмы. Физические и химические дисциплины, преподаваемые в ВУЗе, изучают химию и физику ионизирующего излучения, медико-биологические дисциплины - действие ионизирующих излучений на организм животных, превращения веществ в организме. Поэтому при изучении радиобиологии студент должен интегрировать знания практически всех дисциплин.

Цель изучения теоретического курса радиобиологии заключается в формировании знаний о видах и способах взаимодействия ионизирующих излучений с живыми организмами, взаимосвязи между их физической природой и изменением химической структуры и действием на организм, методах контроля и выявления ионизирующих излучений, а также способов предотвращения негативного их влияния.

Задачи практического курса: выработать умения, необходимые ветеринарному врачу в организации и осуществлении контроля негативного влияния ионизирующих излучений в соответствии с действующей нормативной документацией.

1.1 Определение радиобиологии

Радиобиология – наука о путях биогенной миграции радионуклидов и последствиях действия ионизирующего излучения на живые организмы.

В природе организмы подвергаются радиационному воздействию от естественных источников и от источников, связанных своим происхождением с деятельностью человека, эффекты этих воздействий и изучает радиоэкология.

Доза ионизирующего излучения от естественных источников составляет порядка 1-5 мЗв в год (действовала на организмы и в прошлые геологические эпохи). Искусственная радиоактивность возникает при перемещении и переработке естественных радионуклидов, при авариях на предприятиях ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) и при испытаниях ядерного

оружия. Мощность дозы от глобальных выпадений достигает 0,04-0,41 мЗв в год.

Биологическая опасность радионуклидов, находящихся в биосфере, зависит от их количества, характера излучения, периода полураспада, физического состояния в химических соединениях, в которых они заключены, способности организмов накапливать и выводить эти радионуклиды.

Радиационное воздействие выделяется из других воздействий из-за своеобразного действия на живое вещество. Ни один живой организм в процессе эволюции не приобрел рецепторов для обнаружения радиации, и нет ни одной живой системы, которая бы не подвергалась действию радиации. Радиация двояко действует на живые организмы. С одной стороны, природный радиационный фон является необходимым компонентом существования живых организмов (в отсутствие радиации организмы не смогут развиваться и эволюционировать). С другой – радиационное воздействие на живые организмы может приводить к их повреждению и гибели. Радиобиологический парадокс состоит в большом несоответствии между ничтожной величиной поглощенной энергии и крайней степенью выраженности реакций биологического объекта вплоть до летального исхода (Тимофеев-Ресовский Н.В., 1968).

Радиоэкология является частью не только экологии, но и радиобиологии, которая изучает действие ионизирующего излучения на биологические объекты разной степени организации (от изолированной клетки до организма животного и человека).

Важнейшей особенностью действия ионизирующего излучения на биологические объекты является способность радиации влиять на их слаженные регуляторные механизмы. Именно в разрегулировании и дисфункции регуляторных процессов проявляется специфика ионизирующего излучения для открытых систем в отличие от неживых объектов. Живая открытая система, лишаясь регуляторных механизмов, необратимо утрачивает стационарное состояние (гомеостаз) и погибает. Лучевое поражение биологических объектов закономерно развивается во времени в виде периодического фазового нарушения стационарного состояния, являющегося следствием дисбаланса противоположных механизмов: усилением повреждений и репарационными процессами.

В пределах одного наземного биоценоза могут оказаться виды животных, сильно различающиеся по степени контакта с загрязненными участками, а, следовательно, и с ионизирующим излучением. По этому признаку различают животных, случайно контактирующих с загрязнением, временно или постоянно.

Появление нового сильного абиотического фактора, каким является ионизирующее излучение, может вызвать значительные изменения в структуре сообществ и экологии отдельных видов. Для некоторых видов радиация губительна, и они исчезают из биоценоза (среди деревьев особенно

радиочувствительная сосна), другие же оказываются более устойчивыми, и количество их даже возрастает. Третьи виды изменяют свою численность вследствие изменения количества двух первых видов, например, хищники и паразиты, связанные с видами, которые служат им объектом питания, сократившаяся численность под действием ионизирующего излучения и могут выпасть из сообществ.

Радиационное поражение наземного биоценоза приводит к ослаблению входящих в него видов. Следствием этого ослабления является большая пораженность животных паразитами, например, млекопитающих – блохами и иксодовыми клещами. В свою очередь, повышенная интенсивность поражения кровососами вместе с ослаблением иммунитета животных создает благоприятные условия для широкого распространения очагов трансмиссивных и других природноочаговых болезней и для оживления циркуляции вируса в существовавших очагах. Так как к природноочаговым болезням относятся такие, как чума, клещевой энцефалит, клещевой сыпной тиф и другие тяжелейшие болезни человека, надо знать и этот аспект действия радиации на естественные биоценозы.

Объекты радиоэкологии — популяции и сообщества организмов. Изменение наземного биоценоза и его поражение приводит к ослаблению объектов радиоэкологии, т.е. входящих в него видов.

1.2. Краткая история развития радиобиологии

В развитии радиобиологии можно выделить 3 временных этапа.

Первый этап – с 1895 по 1922 гг. – описательный, связанный с накоплением данных и первыми попытками осмысления биологических реакций на облучение.

Основные события этого этапа: открытие Вильгельмом Конрадом Рентгеном X-лучей (1895 г.), Анри Беккерелем естественной радиоактивности (1896 г.), Марией Складовской-Кюри и Пьером Кюри радиоактивных свойств полония и радия (1898 г.).

В этот период установлены два важных факта – вызываемое ионизирующим излучением торможение клеточного деления (Корнике М., 1905) и различие в степени выраженности реакции разных клеток на облучение. Впервые это было отмечено в 1903 г. французскими исследователями И. Бергонье и Л. Трибондо. На основе исследований ими были сформулированы положения, вошедшие в историю под названием «закона» или «правила Бергонье и Трибондо». Суть этих положений состоит в том, что клетки тем более радиочувствительные, чем большая у них способность к размножению и чем менее определены выражены их морфология и функция, т. е. чем они менее дифференцированы. Уже в первое десятилетие XX века началось изучение действия ионизирующего излучения на эмбриогенез.

Ранние наблюдения, хотя и имели фундаментальное значение, носили описательный, качественный характер; отсутствовала какая-либо теория,

объясняющая механизм действия ионизирующих излучений на живые объекты.

Второй этап – с 1922 по 1945 гг. – становление фундаментальных принципов количественной радиобиологии, характеризующийся стремлением связи эффектов с величиной поглощенной дозы. В этот период обнаружено действие ионизирующих излучений на генетический аппарат клетки (Надсон Г.А., Филиппов Г.Ф., 1925 г.; Мюллер Г., 1927 г. и др.). *Теория мишени* как формальное обобщение многих наблюдаемых явлений сформулирована английским ученым Д. Ли (1946), русским ученым Тимофеевым-Ресовским Н.В. и немецким ученым Циммером К.

(1947). В 1928 г. была введена единица экспозиционной дозы – рентген. Открытие нейтрона в 1932 г. Чедвиком [Ярмоненко С.П., 2004].

Третий этап – с 1945 г. по настоящее время.

В радиобиологии большой удельный вес занимают исследования по изучению миграции радиоактивных продуктов ядерного деления урана и плутония по биологическим и пищевым цепям. Интерес к этому направлению работ возник в начале 50-х годов и объясняется рядом обстоятельств. Как известно, в конце 40-х и начале 50-х годов проходили испытания атомного и водородного оружия, в результате которых в биосферу поступало большое количество радиоактивных продуктов ядерных взрывов. Быстрыми темпами увеличивалась зараженность почвы радионуклидами: например, плотность загрязнения почвы ^{90}Sr в районе Токио в конце 1954 г. составляла ~ 1 мКи/км², а в последующие годы резко увеличивалась – в 1955 г. до 2, в 1956 г. до 5,5, а к середине 1957 г. достигла 8 мКи/км². Академик И.В. Курчатов предупреждал: «...если и впредь испытания атомного оружия будут продолжаться в том же темпе, как сейчас, то вследствие выпадения на поверхность земли образующихся при взрыве и распространяющихся по всему земному шару радиоактивных изотопов стронция, цезия и углерода в будущем в каждом поколении будет поражено наследственными заболеваниями несколько миллионов человек» [Советские ученые об опасности испытаний ядерного оружия. М.: Атомиздат. 1959].

1.3. Связь радиобиологии с другими науками

Радиобиология граничит с научными дисциплинами, исследующими биологическое действие электромагнитных волн инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов и радиоволн миллиметрового и сантиметрового диапазонов (биологией, физиологией, цитологией, генетикой, биохимией, биофизикой и ядерной физикой).

Многогранность задач, стоящих перед современной радиобиологией, привела к развитию радиоэкологии, радиационной генетики и других разделов радиобиологии. Исследования в области радиобиологии лежат в основе практического применения ионизирующих излучений в лучевой терапии злокачественных новообразований; на их базе разработаны эффективные методы лечения лучевой болезни, они послужили

теоретическим фундаментом для использования ионизирующих излучений в борьбе с сельскохозяйственными вредителями, для выведения новых сортов сельскохозяйственных растений (радиационная селекция), повышения урожая путем предпосевного облучения семян, продления сроков хранения сельскохозяйственного сырья, для лучевой стерилизации медицинских препаратов. Данные космической радиобиологии необходимы для прогнозирования и обеспечения безопасности полетов человека в космос. Многие открытия в области радиобиологии (например, открытия радиационного мутагенеза, а также ферментов, репарирующих радиационные повреждения ДНК и др.) способствовали существенному развитию знаний об общих законах жизни.

К настоящему времени имеется большое количество фундаментальных работ и накоплен огромный фактический материал по различным аспектам биологического действия ионизирующих излучений, но, несмотря на это, на сегодняшний день мы еще не имеем единой, объединяющей теории механизма их биологического действия.

Одной из причин такого положения, несомненно, является то, что решение основных вопросов радиобиологии велось в отрыве от тех общебиологических теоретических дисциплин, в область которых вторгаются эффекты биологического действия ионизирующей радиации и закономерности которых в значительной степени объясняют характер этих эффектов.

Как правило, авторы большинства предложенных гипотез оставляют вне поля зрения такие важнейшие проявления биологического действия ионизирующих излучений, как подавление процессов дифференцировки и иммуногенеза, канцерогенное влияние ионизирующих излучений, лечебное их действие при опухолевом росте, эффект ускорения процессов старения облученных организмов и т. д. Возможно, что именно такая широта диапазона биологического действия ионизирующих излучений - одна из причин отсутствия единой теории механизма лучевых поражений.

П.Д. Горизонтов, Э.Я. Граевский, Н.А. Краевский и другие исследователи отмечают, что отсутствие единой теории биологического действия излучений значительно затрудняет поиски средств профилактики и лечения лучевых повреждений.

1.4. Значение радиобиологии для сельскохозяйственной науки и производства

На основе эффектов биологического действия ионизирующей радиации радиобиология рассматривает и ведет разработку прикладных вопросов радиобиологии в виде радиационно-биологической технологии (РБТ) в животноводстве, ветеринарии и других отраслях сельского хозяйства в направлении: стимуляции хозяйственно полезных качеств у сельскохозяйственных животных, в том числе птиц, под действием малых

доз внешнего облучения, стерилизации ветеринарных биологических (вакцины, сыворотки и др.) и лекарственных препаратов (витамины, антибиотики и т. д.), биологических тканей, полимерных изделий, шовных и перевязочных материалов, консервирования пищевых продуктов и обеззараживания сырья животного происхождения (шерсть, кожа, пушнина и т. д.) и отходов сельскохозяйственного производства (навозные стоки) и т. д. Наряду с этим радиобиология ведет разработку и использование методов радиоактивных изотопов в животноводстве и ветеринарии для изучения физиологии и биохимии животных, диагностики болезней и с лечебной целью, в селекционно-генетических исследованиях и т. д.

Специалисты сельского хозяйства должны знать характер биологического действия различных доз радиоактивных излучений, а зооветеринарные специалисты – уметь оценивать радиационную ситуацию, диагностировать болезни лучевых поражений, организовывать и проводить мероприятия по оказанию лечебно-профилактической помощи животным. Правильная и своевременная организация мер по определению радиационной ситуации, обработке и защите животных может предотвратить заражение радиоактивными веществами мяса, молока и другой продукции.

В Российской Федерации исследования по радиобиологии проводятся в институте биологической физики АН РФ (г. Пущино), в Ленинградском институте ядерной физики АН РФ (г. Гатчина) и др. институтах АН РФ, а также в институтах Министерства здравоохранения РФ и Министерства сельского хозяйства РФ, на кафедрах многих вузов. За рубежом основные центры радиобиологических исследований: Брукхейвенская национальная лаборатория, Биологическое отделение атомного центра в Ок-Ридже и др. (США); Радиевый институт, Биологическое отделение атомного центра в Сакле (Франция); Лаборатория радиобиологии атомного центра в Харуэлле (Великобритания); институт биофизики Чешской АН (Брно); институт биофизики во Франкфурте-на-Майне, Центр ядерных исследований в Карлсруэ, институт радиационной ботаники в Гамбурге (Германия); Радиобиологическое отделение атомного центра в Тромбее (Индия); Радиобиологический институт (Сиба, Япония) и многие др.

В 1955 Генеральная Ассамблея ООН учредила специальный Научный комитет по действию атомной радиации (участвуют 20 стран), который собирает всю информацию о радиационной обстановке на Земле и возможных биологических последствиях облучения человека и освещает ее в регулярно представляемых ООН докладах (1958-1972).

2. Физическая характеристика атомов и радиоактивный распад ядер

2.1 Строение атома

Атом – мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая все его свойства. По своей структуре атом (размер примерно 10^{-8} см) представляет сложную систему, состоящую из находящегося в центре атома положительно заряженного ядра (10^{-13} см) и отрицательно заряженных

электронов, вращающихся вокруг ядра на различных орбитах. Радиус атома равен радиусу орбиты самого удаленного от ядра электрона [Белов А.Д., 1999]. Отрицательный заряд электронов равен положительному заряду ядра, при этом атом в целом электрически нейтрален.

В 1911 году Э. Резерфорд предложил планетарную модель строения атома, которая была развита Н. Бором (1913). Согласно этой модели, в центре атома расположено ядро, имеющее положительный электрический заряд. Вокруг ядра перемещаются по эллиптическим орбитам электроны, образующие электронную оболочку атома.

Любой атом состоит из элементарных частиц: протонов, нейтронов и электронов, которые в свободном состоянии характеризуются такими физическими величинами, как масса, электрический заряд (или его отсутствие), устойчивость, скорость и т. д. Массу ядер и элементарных частиц обычно выражают в атомных единицах массы (а. е. м.), за единицу принята $1/12$ массы атома углерода (^{12}C).

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Энергия выражается в электрон-вольтах (эВ), один электрон-вольт равен кинетической энергии, которую приобретает электрон (или любая элементарная частица вещества, имеющая заряд) при прохождении электрического поля с разностью потенциалов в один вольт.

$$1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Кроме этого, массу часто выражают в энергетических эквивалентах (это энергия покоя частицы, масса которой равна 1 а.е.м., составляет 931,5 МэВ (10^6 эВ)).

Атомное ядро – центральная часть атома, в которой сосредоточена почти вся масса (99,9 %). Атомное ядро состоит из двух типов элементарных частиц – протонов и нейтронов. Общее название их – *нуклон*. Протон и электрон относятся к так называемым устойчивым и стабильным частицам, нейтрон стабилен, лишь находясь в ядре.

Суммарное число протонов и нейтронов в ядре называют *массовым числом* и обозначают буквой A (или M). Так как заряд нейтрона равен нулю, а протон имеет элементарный положительный заряд $+1$, то заряд ядра равен числу находящихся в нем протонов, которое называется *зарядовым числом* (Z) или *атомным номером*. Число нейтронов в ядре равно разности между массовым A числом и атомным номером Z элемента: $N = A - Z$ (${}^A_Z X$).

Электрический заряд (q) ядра равен произведению элементарного электрического заряда (e) на атомный номер (Z) химического элемента периодической системы Д.И. Менделеева:

$$q = Ze$$

Ядерные силы

Протоны и нейтроны внутри атомного ядра удерживаются **ядерными силами**. Ядерные силы составляют потенциальную энергию связи ядра. Установлено, что сумма энергий свободных протонов и нейтронов больше энергии составленного из них ядра, из чего следует, что для разделения ядра

на его составляющие нужно затратить энергию. Минимальная энергия, необходимая для этого называется *энергией связи ядра*.

Такая же картина наблюдается, если сложить массы нуклонов, составляющих ядро атома. Расчетная масса ядра окажется больше фактической масса ядра. Разницу между расчетной и фактической массой ядра называют *дефектом массы*.

Ядерные силы не зависят от наличия или отсутствия электрического заряда у нуклонов, действуют только на очень малых расстояниях (10^{-13} см) и с увеличением расстояния между ядерными частицами очень быстро ослабевают.

Для ядерных сил характерно свойство насыщения, которое заключается в том, что нуклон оказывается способным к ядерному взаимодействию одновременно только с незначительным числом соседних нуклонов, что указывает на возможную природу ядерных сил, как сил обменного типа.

Основные свойства ядерных сил объясняются тем, что нуклоны обмениваются между собой частицами массой немногим более 200 электронных масс [Юкава Х., 1935], такие частицы обнаружены экспериментально (1947) и названы π -мезонами или пионами (существуют положительные, отрицательные и нейтральные π -мезоны). Мезоны не являются составными частями протонов и нейтронов, а испускаются и поглощаются ими (подобно тому, как атомы испускают и поглощают кванты электромагнитного излучения), при этом протон, испустивший положительный пион, превращается в нейтрон, а нейтрон после захвата пиона превращается в протон. Все эти процессы обеспечивают сильное взаимодействие и тем самым устойчивость ядер.

Протон (p) — элементарная частица, входящая в состав любого атомного ядра, имеющая положительный заряд, равный единичному элементарному заряду $+1$ ($1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл). Масса покоя протона составляет 1,00758 а. е. м. или 938,27 МэВ.

Число протонов в ядре (*атомный номер*) для каждого элемента строго постоянно и соответствует порядковому номеру элемента (Z) таблицы Д.И. Менделеева. Так как каждый протон имеет положительный элементарный заряд электричества, то атомный номер элемента показывает и число положительных элементарных зарядов в ядре любого атома химического элемента. Порядковый номер элемента еще называют *зарядовым числом*. Число протонов в ядре определяет число электронов в оболочке атома (но не наоборот) и соответственно строение электронных оболочек и химические свойства элементов.

Нейтрон (n) — электрически нейтральная элементарная частица (отсутствует лишь в ядре легкого водорода), масса покоя которой равна 1,00898 а. е. м. или 939,57 МэВ. Масса нейтрона больше массы протона на две электронные массы. В атомном ядре нейтроны являются стабильными, их число (N) в ядре атома одного и того же элемента может колебаться, что

дает в основном только физическую характеристику элемента [Белов А.Д., 1999].

Электрон — стабильная элементарная частица, имеющая массу покоя, равной 0,000548 а. е. м., а в абсолютных единицах массы — $9,11 \cdot 10^{-31}$ кг. Энергетический эквивалент, е. м. электрона равен 0,511 МэВ и элементарный электрический заряд — $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электроны двигаются вокруг ядра по орбиталим определенной формы и радиуса. Орбиты группируются в электронные слои (максимально может быть семь: К, L, M, N, O, P, O). Наименьшее число электронов, которое может находиться на орбиталях одного слоя, определяется квантовым соотношением:

$$m = 2n^2,$$

где n — главное квантовое число (в данном случае совпадает с номером слоя. Следовательно, в К-слое ($n=1$) может находиться 2 электрона, в L-слое ($n=2$) — 8 электронов и так далее.

Основную роль во взаимодействии электронов с атомным ядром играют электромагнитные силы (силы кулоновского притяжения разноименных электрических зарядов). Чем ближе к ядру находится электрон, тем больше его потенциальная энергия (энергия связи с ядром) и меньше кинетическая энергия (энергия вращения электрона). Соответственно электроны с внешней орбиты (энергия связи около 1—2 эВ) сорвать легче, чем с внутренней.

Переход отдельного электрона с орбиты на орбиту всегда связан с поглощением или высвобождением энергии (поглощается или испускается квант энергии). Согласно постулатам Бора, атомная система находится в стационарном состоянии, которое характеризуется определенной энергией. *Бесконечно долго каждый атом может находиться только в стационарном состоянии с минимальной энергией, которое называется **основным** или **нормальным***. Все остальные стационарные состояния атома с большими энергиями называются **возбужденными**. Переход электрона с одного энергетического уровня на другой, более удаленный от ядра (с большей энергией), называется **процессом возбуждения**.

В результате соударения с другими атомами, с любой заряженной частицей или при поглощении фотона электромагнитного излучения атом может перейти из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией. Время жизни атома в возбужденном состоянии не превышает $10^{-7} \dots 10^{-9}$ с. Из любого возбужденного состояния атом самопроизвольно переходит в основное состояние, этот процесс сопровождается *излучением фотонов* (квантов). В зависимости от разности энергий атома в двух состояниях, между которыми совершается переход, испускаемый квант электромагнитного излучения может принадлежать диапазону радиоволн, инфракрасного излучения, видимого света, ультрафиолетового или рентгеновского излучения.

При сильных электрических воздействиях электроны могут вырываться за пределы атома. Атом, лишившийся одного или нескольких электронов, превращается в положительный ион, а присоединивший к себе один или несколько электронов — в отрицательный. Процесс образования ионов из нейтральных атомов называется *ионизацией*. В обычных условиях атом в состоянии иона существует очень короткое время. Свободное место на орбите положительного иона заполняется свободным электроном, и атом вновь становится электрически нейтральной системой. Этот процесс носит название *рекомбинации ионов (деионизации)* и сопровождается выделением избыточной энергии в виде излучения.

Изотопы, изотоны, изобары

Атомы, имеющие ядра с одинаковым числом протонов, но различающиеся по числу нейтронов, являются разновидностями одного и того же химического элемента и называются **изотопами**. Такие элементы имеют одинаковый номер в таблице Д.И. Менделеева, но разное массовое число ($^{39}_{19}\text{K}$, $^{40}_{19}\text{K}$). Поскольку заряды ядер этих атомов одинаковые, элементарные оболочки их имеют почти однотипное строение, а атомы с такими ядрами чрезвычайно близки по химическим свойствам. Большинство химических элементов в природе представляет собой смесь изотопов. Обычно в смеси изотопов одного определенного элемента преобладает один изотоп, а остальные составляют только небольшой процент (например, калий состоит из: ^{39}K — 93,08 %; ^{40}K — 0,0119 %; ^{41}K - 6,91 %).

Чтобы отличить изотопы одного химического элемента друг от друга, перед названием элемента сверху приписывают массовое число, равное сумме всех частиц ядра данного изотопа, а снизу — заряд ядра (число протонов), соответствующий порядковому номеру элемента в таблице Д.И. Менделеева. Так, наиболее распространенный в природе легкий водород ^1_1H (протий) содержит 1 протон, редко встречающийся среди атомов водорода ^2_1H (дейтерий) — 1 протон и 1 нейтрон, а никогда не встречающийся в природе ^3_1H (тритий) — 1 протон и 2 нейтрона (тритий получают искусственным путем, облучая дейтерий медленными нейтронами) [Люцко А.М. и др., 1996].

Различают стабильные и нестабильные (радиоактивные) изотопы. К первым относятся такие изотопы, ядра которых при отсутствии внешних воздействий не претерпевают никаких превращений, ко вторым — изотопы, ядра которых могут самопроизвольно (без внешнего воздействия) распадаться, образуя при этом ядра атомов других элементов. Ядра всех изотопов химических элементов принято называть *нуклидами*, нестабильные нуклиды называются *радионуклидами*. В настоящее время известно около 300 стабильных изотопов и около 1500 радиоактивных.

Условие устойчивости атомных ядер: устойчивыми являются лишь те из атомных ядер, которые обладают минимальной энергией по сравнению со всеми ядрами, в которые данное ядро могло бы самопроизвольно превратиться.

Атомные ядра разных элементов с равным числом нейтронов называют изотонами. Например, $^{15}_7\text{N}$ и $^{14}_6\text{C}$ имеет шесть протонов и семь нейтронов, имеет семь протонов и тоже семь нейтронов.

Атомные ядра, разных элементов с одинаковым массовым числом, но с разным атомным номером (т. е. состоящие из одинакового числа нуклонов при разном соотношении протонов и нейтронов) называются **изобарами**.

Например: $^{12}_5\text{B}$, $^{12}_6\text{C}$ и т. д.

Различие в энергии атомных ядер изобаров определяется наличием у протонов электрического заряда и существованием различия в массе протона и нейтрона. Так, ядра, содержащие значительно больше протонов, чем нейтронов, оказываются нестабильными, так как обладают избытком энергии кулоновского взаимодействия. Ядра же, имеющие больше нейтронов, чем протонов, нестабильны из-за того, что масса нейтрона больше массы протона, а увеличение массы ядра приводит к увеличению его энергии. От избыточной энергии ядра могут освобождаться двумя путями:

Путем самопроизвольного деления ядер на более устойчивые части.

Путем самопроизвольного изменения заряда ядра на единицу (превращение протона в нейтрон или нейтрона в протон).

Элементарные частицы

Элементарные частицы не являются молекулами, атомами или ядрами. Они имеют радиус (R), равный $10^{-14} \dots 10^{-15}$ м и энергию (W) около $10^6 \dots 10^8$ эВ. Сейчас общее число известных элементарных частиц (вместе с античастицами) приближается к 400. Некоторые из них стабильны или квазистабильны и существуют в природе в свободном или слабосвязанном состоянии. Это *электроны*, входящие в состав атомов, их античастицы — *позитроны*; *протоны и нейтроны*, входящие в состав атомных ядер; фотоны γ , являющиеся квантами электромагнитного поля. Сюда же можно отнести электронные (*анти*)*нейтрино* ν_e , рождающиеся в процессах бета-превращений и в термоядерных реакциях, протекающих в звездах. Все остальные элементарные частицы крайне нестабильны и образуются во вторичном космическом излучении или получают в лаборатории. К ним относятся мюоны (мю-мезоны) — тяжелый аналог электрона ($\mu \sim 200 m_e$) зарегистрированы в космических лучах; пионы (пи-мезоны) π^+ , π^0 , π^- переносчики ядерного взаимодействия и другие.

У каждой частицы имеется античастица, обычно обозначаемая тем же символом, но с добавлением тильды «-» над ним. Масса, время жизни и спины частицы и античастицы одинаковы. Остальные характеристики, в том числе электрический заряд и магнитный момент, равны по модулю, но противоположны по знаку.

2.2. Виды радиоактивного распада

Радиоактивность — это свойство атомных ядер, определенных химических элементов самопроизвольно превращаться в ядра других элементов с испусканием особого рода излучения, называемого

радиоактивным излучением. Само явление носит название **радиоактивный распад**.

Радиоактивные превращения, происходящие в природе, называются естественной радиоактивностью. Аналогичные процессы, происходящие в искусственно полученных веществах (через соответствующие ядерные реакции), – искусственной радиоактивностью. Оба вида радиоактивности подчиняются одним и тем же законам.

Существуют следующие типы ядерных превращений, или видов радиоактивного распада: альфа-распад, бета-распад (электронный, позитронный), электронный захват (К-захват), внутренняя конверсия, деление ядер.

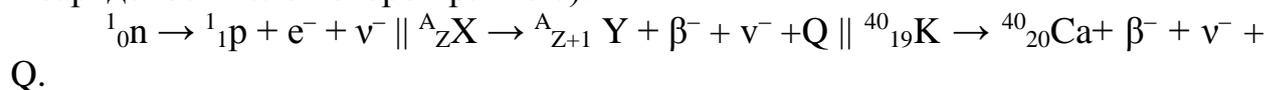
Альфа-распад – это самопроизвольное деление неустойчивого атомного ядра на α -частицу (ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$) и ядро-продукт (дочернее ядро). При этом заряд ядра продукта уменьшается на 2 положительные единицы, а массовое число на 4 единицы. При этом образующийся элемент-продукт смещается влево относительно исходного на две клетки периодической системы Д.И. Менделеева:



Альфа-радиоактивными являются практически все (за редким исключением) ядра атомов элементов с порядковым номером 82 и больше (те, что в периодической таблице стоят за свинцом ${}_{82}\text{Pb}$). Альфа-частица, вылетая из ядра, приобретает кинетическую энергию порядка 4–9 МэВ.

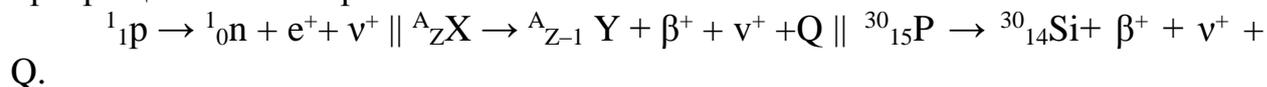
Бета-распад — это самопроизвольное превращение нестабильных атомных ядер с испусканием β -частицы, при котором их заряд изменяется на единицу. В основе этого процесса лежит способность протонов и нейтронов к взаимным превращениям.

Если в ядре имеется избышек нейтронов («нейтронная перегрузка» ядра), то происходит *электронный β^- -распад*, при котором один из нейтронов превращается в протон, а ядро испускает электрон и антинейтрино (массовое и зарядовое число которой равно 0).



При этом распаде заряд ядра и соответственно атомный номер элемента увеличиваются на единицу (элемент сдвигается в периодической системе Д.И. Менделеева на один номер вправо от исходного), а массовое число остается без изменений. Электронный бета-распад характерен для многих естественных и искусственно полученных радиоактивных элементов.

Если неблагоприятное соотношение нейтронов и протонов в ядре обусловлено избышком протонов, то происходит *позитронный (β^+) распад*, при котором ядро испускает позитрон (частицу такой же массы, как и электрон, но имеющую заряд +1) и нейтрино, а один из протонов превращается в нейтрон:



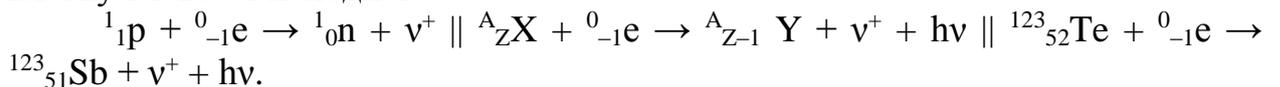
Заряд ядра и соответственно атомный номер элемента уменьшаются на единицу, и дочерний элемент будет занимать место в периодической системе Д.М. Менделеева на один номер левее от исходного, массовое число остается без изменения. Позитронный распад наблюдается у некоторых искусственно полученных изотопов.

Позитрон, вылетев из ядра, срывает с оболочки атома «лишний» электрон или взаимодействует со свободным электроном, образуя пару «позитрон-электрон», которая мгновенно превращается в два гамма-кванта с энергией, эквивалентной массе частиц (e^+ и e^-) по 0,511 МэВ. Процесс превращения пары «позитрон-электрон» в два γ -кванта получил название *аннигиляции* (уничтожения), а возникающее электромагнитное излучение – *аннигиляционное*. Таким образом, при позитронном распаде за пределы Материнского атома вылетают не частицы, а два гамма-кванта с энергией 0,511 МэВ.

Энергетический спектр β -частиц любого бета-источника является непрерывным (от сотых долей МэВ – мягкое излучение, до 2–3 МэВ – жесткое).

Электронный захват – самопроизвольное превращение атомного ядра, при котором его заряд уменьшается на единицу за счет захвата одного из орбитальных электронов и превращения протона в нейтрон.

Это происходит, если в ядре имеется избыток протонов, но недостаточно энергии для позитронного распада. Один из протонов ядра захватывает электрон с одной из оболочек атома, чаще всего с ближайшего к нему К-слоя (К-захват) или реже L-слоя (L-захват) и превращается в нейтрон с испусканием нейтрино. При этом дочерний элемент, как и при позитронном распаде, смещается в периодической системе Д.И. Менделеева на одну клетку влево от исходного.



На освободившееся место в К-слое перескакивает электрон с L-слоя, на место последнего со следующего слоя и т. д. Каждый переход электрона со слоя на слой сопровождается выделением энергии в виде квантов электромагнитного излучения (рентгеновского диапазона).

Позитронный распад и электронных захват, как правило, наблюдают только у искусственно-радиоактивных изотопов.

Деление ядер – это спонтанное деление ядра, при котором оно, без какого-либо внешнего воздействия, распадается на две, как правило, неравные части. Так, ядро урана может делиться на ядра бария (${}_{56}\text{Ba}$) и криптона (${}_{36}\text{Kr}$). Этот тип распада характерен для изотопов элементов, стоящих в периодической системе за ураном. Под действием сил электростатического отталкивания одноименных зарядов ядра-осколки приобретают кинетическую энергию порядка 165 МэВ и разлетаются в разные стороны с огромными скоростями.

Внутренняя конверсия. Возбужденное ядро передает энергию возбуждения одному из электронов внутренних слоев (K-, L-, или M- слой), который в результате этого вырывается за пределы атома. Затем один из электронов с более отдаленных слоев (с более высоких энергетических уровней) осуществляет квантовый переход на «вакантное» место с испусканием характеристического рентгеновского излучения [Белов А.Д., 1999; Симак С.В. и др., 1998].

2.3. Закон радиоактивного распада

Количество любого радиоактивного изотопа со временем уменьшается вследствие радиоактивного распада (превращения ядер). Радиоактивный распад идет непрерывно, скорость этого процесса и его характер определяются строением ядра. Поэтому на этот процесс нельзя повлиять никакими обычными физическими или химическими способами, не изменив состояния атомного ядра. Кроме того, распад носит вероятностный характер, то есть нельзя точно определить, когда и какой именно атом распадется, но в каждый промежуток времени распадается в среднем какая-то определенная часть атомов.

Для каждого радиоактивного изотопа средняя скорость распада его атомов постоянна, неизменна и характерна только для данного изотопа. Постоянная радиоактивного распада λ для определенного изотопа показывает, какая доля ядер распадется в единицу времени. Постоянную распада выражают в обратных единицах времени s^{-1} , $мин^{-1}$, $ч^{-1}$ и т. д., чтобы показать, что количество радиоактивных ядер со временем убывает, а не растет.

Самопроизвольное превращение ядер любого радиоактивного изотопа подчиняется **закону радиоактивного распада**, который устанавливает, что за единицу времени распадается одна и та же доля имеющихся в наличии ядер.

Математическое выражение этого закона, описывающее процесс убывания количества радиоактивных ядер со временем, отображается следующей формулой:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (N_t = N_0 \cdot e^{-693t/T}),$$

где N_t – число радиоактивных ядер, оставшихся по прошествии времени;

N_0 – исходное число радиоактивных ядер в момент времени $t = 0$;

e – основание натуральных логарифмов ($e = 2,72$);

λ – постоянная радиоактивного распада ($\lambda = 0,693/T$);

t – время, в течение которого распадался радиоизотоп;

T – период полураспада данного радиоизотопа.

По этой формуле можно рассчитать число нераспавшихся радиоактивных атомов в данный момент времени.

Для характеристики скорости распада радиоактивных элементов на практике пользуются периодом полураспада.

Период полураспада – это время, в течение которого распадается половина исходного количества радиоактивных ядер. Он обозначается буквой T и выражается в единицах времени.

Для различных радиоактивных изотопов период полураспада имеет значения от долей секунды до миллионов лет. Причем у одного и того же элемента могут быть изотопы с различным периодом полураспада. Соответственно и радиоактивные элементы разделяются на короткоживущие (часы, дни) – $^{131}_{53}\text{I}$ (8,05 суток), Po ($1,64 \cdot 10^{-4}$ сек) и долгоживущие (годы) – $^{238}_{92}\text{U}$ ($T = 4,47$ млрд лет), $^{137}_{55}\text{Cs}$ (30 лет), $^{90}_{38}\text{Sr}$ (29 лет).

Между периодом полураспада и постоянной распада существует обратная зависимость, т.е. чем больше λ , тем меньше T , и наоборот.

Графически закон радиоактивного распада выражается экспоненциальной кривой (рис. 2.1). Как видно из рисунка, с увеличением числа периодов полураспада число нераспавшихся атомов убывает, постепенно приближаясь к нулю [Белов АД. и др., 1999].

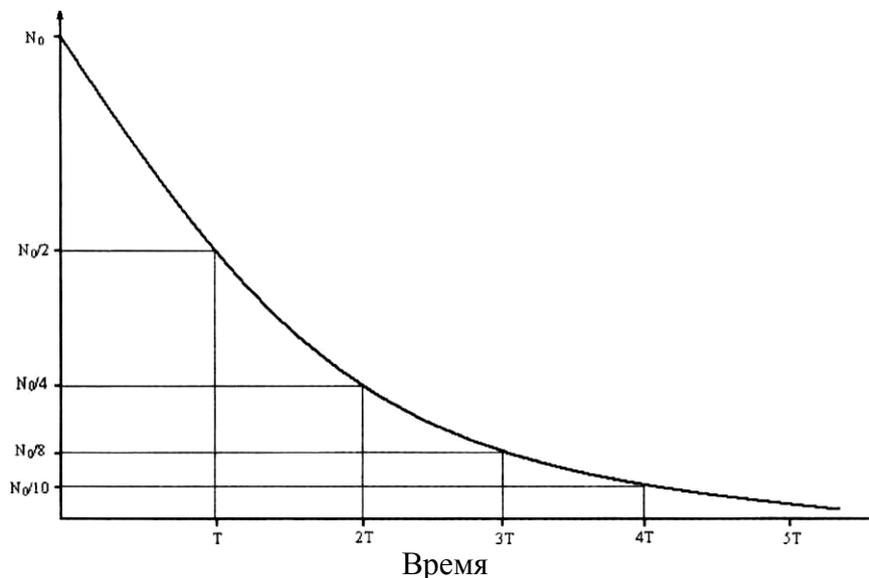


Рис. 2.1. Графическое изображение закона радиоактивного распада

Активность радиоактивного элемента равна числу распадов в единицу времени. Чем больше радиоактивных превращений испытывают атомы данного вещества, тем выше его активность. Как следует из закона радиоактивного распада, активность радионуклида пропорциональна числу радиоактивных атомов, т. е. возрастает с увеличением количества данного вещества. Поскольку скорость распада радиоактивных изотопов различна, то одинаковые по массе количества различных радионуклидов имеют разную активность.

В системе СИ единицей активности является беккерель (Бк) – распад в секунду (расп/с). Наряду с Бк используется внесистемная единица – кюри (Ки). 1Ки – это активность любого радиоактивного вещества (изотопа), в котором происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ актов распада в секунду. Единица кюри соответствует радиоактивности 1 г радия.

1Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк; 1мКи = 37МБк; 1мкКи = 37 кБк.

Активность любого радиоактивного препарата по истечении времени t определяют по формуле, соответствующей основному закону радиоактивного распада:

$$A_t = A_0 e^{-0,693t/T},$$

где A_t – активность препарата через время t ;

A_0 – исходная активность препарата;

e – основание натуральных логарифмов ($e = 2,72$);

t – время, в течение которого распадался радиоизотоп;

T – период полураспада; значения T и t должны иметь одинаковую размерность (мин, сек, часы, дни и т. д.).

(Пример: Активность A_0 радиоактивного элемента ^{32}P на определенный день равна 5 мКи. Определить активность этого элемента через неделю. Период полураспада T элемента ^{32}P составляет 14,3 дня. Активность ^{32}P через 7 суток. $A_t = 5 \cdot 2,72^{0,693 \cdot 7/14,3} = 5 \cdot 2,72^{0,34} = 3,55$ мКи).

Единицы кюри (Ки) для характеристики гамма-активности источников непригодны. Для этих целей введена другая единица – эквивалент 1 мг радия (мг-экв. радия). *Миллиграмм-эквивалент радия* – это активность любого радиоактивного препарата, гамма-излучение которого при идентичных условиях измерения создает такую же мощность экспозиционной дозы, как гамма-излучение 1 мг радия Государственного эталона радия РФ при использовании платинового фильтра толщиной 0,5 мм. Единица миллиграмм-эквивалент радия не установлена существующими стандартами, но широко используется на практике.

Точечный источник в 1мг (1мКи) радия, находящийся в равновесии с продуктами распада, после начальной фильтрации через платиновую пластину толщиной 0,5 мм создает в воздухе на расстоянии 1 см мощность дозы 8,4 Р/ч. Эту величину называют ионизационной гамма-постоянной радия и обозначают буквой K_γ . Гамма-постоянная радия принята за эталон мощности дозы излучения. С ней сравнивают K_γ всех других гамма-излучателей. Существуют таблицы гамма-постоянных для большинства радиоактивных изотопов.

Так, гамма-постоянная ^{60}Co составляет 13,5 Р/ч. Сравнение гамма-постоянных радия и ^{60}Co показывает, что 1 мКи радионуклида ^{60}Co создает дозу излучения, в 1,6 раза большую, чем 1 мКи радия ($13,5/8,4 = 1,6$). Иначе говоря, по создаваемой дозе излучения в воздухе 1 мКи радионуклида ^{60}Co эквивалентен 1,6 мКи радия, т. е. гамма-излучение, испускаемое препаратом ^{60}Co активностью 0,625 мКи, создает такую же дозу излучения, что и 1 мКи радия.

Гамма-эквивалент M изотопа связан с его активностью A (мКи) через ионизационную гамма-постоянную K соотношениями:

$$M = AK_\gamma/8,4 \text{ или } A = 8,4M/K_\gamma,$$

которые позволяют перейти от активности радиоактивного вещества, выраженной в мг-экв. радия, к активности, выраженной в мКи и наоборот [Белов А.Д., 1999].

3. Виды ионизирующих излучений и их взаимодействие с веществом

3.1 Виды ионизирующего излучения.

Ионизирующее излучение – это излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к ионизации его атомов и молекул, то есть превращению их из электрически нейтральных частиц в положительно и отрицательно заряженные ионы.

Это изменение становится возможным потому, что частицы и кванты, вылетающие из ядра при радиоактивном распаде, имеют определенный запас кинетической энергии, при пробеге в веществе эта энергия расходуется на ионизацию и возбуждение встречающихся атомов.

К ионизирующим излучениям относятся потоки заряженных и нейтральных частиц и электромагнитные излучения высоких энергий.

Электромагнитные ионизирующие излучения

Электромагнитные ионизирующие излучения по своей природе относятся к электромагнитным волнам и им присущи все волновые характеристики (длина волны, энергия и др.). Электромагнитные волны включают в себя излучения, охватывающие большой диапазон длин волн и частот.

Электромагнитные ионизирующие излучения отличаются от других электромагнитных излучений более короткой длиной волны (λ) и более высокой энергией, которые находятся в обратной зависимости друг с другом:

$$h\nu = E/\lambda,$$

где h – постоянная Планка = $6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж/Гц; ν – частота излучения.

Соответственно с уменьшением длины волны (увеличением частоты) энергия излучения возрастает: $E = hc/\lambda$.

К электромагнитным ионизирующим излучениям относятся: рентгеновское излучение, тормозное излучение, гамма-излучение.

Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитное излучение с длиной волны 10–0,001 нм (10^{-7} – 10^{-11} м), и занимает спектральную область между ультрафиолетовыми и гамма-излучением. Рентгеновское излучение образуется при торможении быстрых электронов, получаемых в вакууме, в веществе. Условно рентгеновское излучение делится на жесткое (длина волны $< 0,2$ нм) и мягкое (длина волны $> 0,2$ нм).

Тормозное рентгеновское излучение – это электромагнитное излучение, возникает при торможении электронов в электрическом поле ядер атомов вещества.

Характеристическое рентгеновское излучение возникает при перестройке электронных оболочек атомов при ионизации и возбуждении атомов и молекул.

Гамма-излучение – это электромагнитное излучение, испускаемое ядрами атомов в ходе их радиоактивного распада. Испусканием γ -квантов сопровождаются α -распад, β -распад и К-захват. Кроме этого они генерируются при аннигиляции электрон-позитронной пары и при распаде некоторых элементарных частиц, например, π -мезонов. Во всех этих случаях избыток энергии высвобождается в виде гамма-излучения.

Гамма-излучение представляет собой поперечные электромагнитные волны, лежащие в диапазоне длин волн 10^{-10} – 10^{-14} м. Они распространяются прямолинейно и равномерно во все стороны от источника γ -кванты не имеют массы покоя и заряда.

В отличие от рентгеновских лучей, имеющих непрерывный спектр энергии, в большинстве случаев γ -источники испускают γ -кванты различной энергии. Величина энергии для каждого источника постоянна и образуется линейчатый спектр излучения. В среднем энергия γ -квантов различных γ -излучателей колеблется в пределах 0,01 МэВ (мягкие γ -лучи) – 3МэВ (жесткие) иногда до 10 МэВ.

Корпускулярные излучения

Корпускулярные ионизирующие излучения представляют собой поток частиц (корпускул). В зависимости от массы, заряда и скорости они подразделяются на легкие и тяжелые, заряженные и незаряженные, быстрые и медленные.

Электроны относятся к легким заряженным частицам. Источником электронов может стать вещество, получившее определенное количество энергии. Ускоренные электроны, возникающие при β -распаде атомов радиоактивных веществ, называются β -частицами. Позитрон, образовавшийся при позитронном распаде, называется β^+ частицей. Физические характеристики электронов ядерного происхождения такие же, как и у электронов атомной оболочки.

Бета-частицы представляют собой поток частиц (электронов или позитронов) ядерного происхождения. Бета-частицы одного и того же радиоактивного элемента обладают различным запасом энергии (от 0 до некоторого максимального значения). Это объясняется тем, что при β -распаде из атомного ядра вылетают одновременно с β -частицей нейтрино. Поэтому энергетический спектр β -излучения сплошной или непрерывный. Средняя энергия β -частиц в спектре равна примерно 1/3 их максимальной энергии. Различные радиоактивные изотопы значительно отличаются друг от друга по уровню энергии β -частиц. Максимальная энергия β -частиц различных элементов имеет широкие пределы – от 0,015–0,05 МэВ (мягкое β -излучение) до 3–12 МэВ (жесткое β -излучение). Вследствие этого у β -частиц одного и того же радиоактивного элемента величина пробега в одном и том же веществе неодинакова.

К тяжелым заряженным частицам относятся протоны и дейтроны (ядра легкого и тяжелого водорода с единичным плюсовым зарядом ${}^1\text{p}^+$; ${}^2\text{d}^+$), α -частицы и ядра химических элементов.

Альфа-частицы представляют собой ядра атомов гелия и состоят из двух протонов и двух нейтронов; они имеют двойной положительный заряд и относительно большую массу (4,003 а. е. м.). Энергия их колеблется в пределах 2–11 МэВ. Для каждого данного изотопа энергия α -частицы постоянна. Альфа-излучение считают монохроматическим. Альфа-частицы возникают при α -распаде радиоактивных изотопов (например, ^{239}Pu , ^{226}Ra , ^{210}Po и др.). При делении ядер тяжелых радиоактивных изотопов образуются ядра-осколки (ядра более легких химических элементов).

Кроме этого заряженные частицы могут быть получены на ускорителях разных типов – бетатронах, циклотронах, синхротронах, синхрофазатронах и линейных ускорителях, в этом случае энергии частиц могут достигать десятков миллиардов электрон-вольт (ГэВ).

К незаряженным ионизирующим частицам относятся нейтроны. По величине энергии принята следующая условная классификация нейтронов:

- тепловые нейтроны, обладающие энергией теплового движения, которая составляет при комнатной температуре около 0,25 эВ;
- медленные нейтроны, энергия <1 КэВ;
- промежуточные нейтроны, энергия 1 – 100 КэВ;
- быстрые нейтроны, энергия >100 КэВ;
- сверхбыстрые нейтроны, энергия 10–50 МэВ.

Энергия любой корпускулярной частицы рассчитывается по формуле:

$$E = mv^2/2.$$

Ионизация атомов и молекул может вызываться различными видами корпускулярных ионизирующих излучений. Их взаимодействие с веществом будет зависеть от энергии, массы, заряда и скорости частицы.

3.2. Проникающая способность и плотность ионизации ионизирующих излучений

Проникающая способность излучения – путь, который волна или частица способны проходить в веществе. Его длина находится в обратной зависимости от массы частицы. Наибольшей проникающей способностью обладают электромагнитные ионизирующие излучения. Так, в воздухе γ -кванты пробегают сотни метров, более того, каким бы плотным ни было вещество, каким бы ни была его толщина, поглотить полностью фотоны теоретически нельзя, их можно лишь ослабить.

В радиобиологии применяется понятие *линейного коэффициента ослабления* электромагнитного излучения, который представляет собой величину относительного его уменьшения после прохождения слоя вещества в 1 см, величина коэффициента прямо пропорциональна плотности вещества и обратно пропорциональна энергии излучения. Чем меньше энергия квантов и больше масса (объем, плотность и порядковый номер) поглотителя, тем сильнее ослабление γ -излучения (табл. 3.1). Для квантов с энергией 2,5 МэВ слой полуослабления составляет в воздухе около 200 м, в дереве – 25 см в бетоне – 10 см, в свинце – 1,8 мм.

Таблица 3.1

Линейные коэффициенты ослабления γ -излучения в зависимости от его энергии (Козлов В.Ф., 1987)

Вещество (материал)	Плотность в-ва, г/см ³	Энергия, МэВ		
		1	2	3
1	2	3	4	5
Воздух	0,0013	0,00008	0,00006	0,00004
Древесина (дуб)	0,77	0,0521	0,0293	0,0203
Парафин	0.89	0.0646	0.0360	0.0246
Каучук	0.915	0,0662	0,0370	0,0254
Ткани человека	1	0,0699	0,0393	0,0274
Вода	1	0,07	0,05	0,04
Кирпич	1,78	0,113	0,0646	0,0473
Углерод	2,25	0,143	0,0801	0,059
Бетон	2,40	0,154	0,0878	0,0646
Алюминий	2,70	0,16	0,12	0,09
Сталь	7,83	0.460	0,276	0.234
Свинец	11,34	0,77	0,51	0,47

Снижение интенсивности электромагнитного излучения при прохождении через вещество описывается зависимостью:

$$I(l) = I_0 e^{-kl},$$

где $I(l)$ – интенсивность излучения, прошедшего толщину l ;

I_0 – исходная интенсивность падающего излучения;

k – линейный коэффициент ослабления (поглощения), характеризующий поглощающую способность вещества.

Большой проникающей способностью обладают незаряженные частицы (нейтроны).

Значительно меньше проникающая способность заряженных частиц. Она зависит, как и проникающая способность электромагнитных излучений от энергии, но, кроме этого, в значительной степени определяется массой и скоростью движения частицы. Так β -частицы, обладают малой массой и большой скоростью, достаточно медленно теряют свою энергию на ионизацию и поэтому их пробег в ткани больше чем у других заряженных частиц (табл. 3.2). Путь β -частиц в веществе извилист, т. к. имея малую массу, они легко меняют направление движения под действием электрических полей встречных атомов. Пробег бета-частиц в воздухе может составлять в зависимости от энергии до 25 м, в биологических тканях – до 1–2 см.

Таблица 3.2

Пробег β -частиц в различных средах

Источник	Энергия частицы, МэВ	Длина пробега частицы		
		Воздух, см	Алюминий, мм	Биологическ ая ткань, мм
³ H	0,0179	0,2	0,001	0,0025
¹⁴ C	0,155	15,5	0,122	0,206

^{35}S	0,167	16,3	0,138	0,223
^{45}Ca	0,255	46,5	0,301	0,638
^{32}P	1,704	600	3,703	8,0
^{42}K	3,58	1400	7,967	18.02

Тяжелые частицы, проходя через вещество, очень быстро теряют свою кинетическую энергию и соответственно имеют небольшую проникающую способность (табл. 3.3, 3.4).

Таблица 3.3

Пробег протонов в различных средах

Энергия частицы, МэВ	Длина пробега	
	в воздухе, см	в биологической ткани, мкм
1	2,3	23
2	4,3	73
3	14,7	147
5	35,5	355
7	64,2	642
10	121,1	1211
15	128,0	2380

Пробег α -частицы в воздухе в зависимости от энергии составляет 2—10 см, в биологических тканях — несколько десятков микрометров. Так как α -частицы массивны и обладают сравнительно большой энергией, путь их в веществе прямолинеен.

Таблица 3.4

Пробег α -частиц в различных средах

Энергия частицы, МэВ	Длина пробега частицы		
	воздух, см	алюминий, мкм	биологическая ткань, мкм
4,0	2,5	16	31
5,0	3,5	23	43
6,0	4,6	30	56
7,0	5,9	38	72
7,5	6,6	43	81
8,0	7,4	48	91
8,5	8,1	53	100
9,0	8,9	58	110
9,5	9,8	64	120
10,0	10,6	69	130

Наиболее опасными при внешнем облучении являются электромагнитные излучения, а при внутреннем - корпускулярные излучения.

Плотность ионизации (ПИ) – число пар ионов, образующихся на 1 мкм пути пробега частицы или электромагнитного излучения. Разные виды излучения в одинаковых дозах вызывают ионизацию различной плотности. Плотность ионизации пропорциональна квадрату заряда (q) и обратно пропорциональна скорости частицы (U): $ПИ = q^2/U$. Так как при равных энергиях скорость частицы обратно пропорциональна массе (m), то самую высокую плотность ионизации дают тяжелые многозарядные ионы α -частицы, имеющие наибольший заряд и максимальную массу. Их пробег в веществе прямолинеен, они вызывают сильно выраженные эффекты ионизации и флуоресценции (100-250 тыс. пар ионов в 1 см воздуха).

Рентгеновское излучение вызывает ионизацию минимальной плотности, так как его проникающая способность сходна с проникающей способностью γ -излучения, а энергия значительно меньше. Промежуточное положение в порядке возрастания занимают γ - и β -излучения, протоны и нейтроны. Бета-излучение образует 50–100 пар ионов на 1 см пути в воздухе.

Проникающая способность и плотность ионизации связаны между собой обратной зависимостью. Объясняется это тем, что, чем крупнее и тяжелее частица, тем больше энергии она несет и большей способностью к ионизации обладает и, в то же время, тем больше для нее сопротивление вещества и короче путь пробега в нем. В то же время излучения с низкой проникающей способностью, то есть с коротким путем пробега в веществе, всю свою энергию ионизации распределяют вдоль этого пути. При этом плотность ионизации оказывается выше, чем если бы та же энергия распределялась по пути большей протяженности [Симак С.В. и др., 1998].

3.3 Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом

Обнаружение и регистрация всех видов ядерных излучений, выбор материала для защиты, оценка биологического действия излучений основаны на эффектах, которые возникают при взаимодействии излучений с веществом. Для понимания принципов этих явлений необходимо знать, каким образом различные по природе излучения взаимодействуют с веществом.

Результатом взаимодействия ИИ с веществом является ионизация и возбуждение атомов и молекул. Ионизация атомов и молекул происходит тогда, когда передаваемая кинетическая энергия частицы или фотона выше энергии связи электрона с ядром, если же энергия ниже определенного уровня – то происходит только возбуждение.

К ионизирующим излучениям относятся электромагнитные излучения высоких энергий и потоки заряженных и незаряженных частиц. Механизм передачи энергии веществу зависит от типа излучения и его энергии.

Механизмы размена энергии электромагнитных ИИ

Ионизирующие электромагнитные излучения различаются по происхождению и энергии, но обладают рядом общих характеристик. При прохождении через вещество излучения испытывают **три вида взаимодействия**:

- фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект);
- комптоновское рассеяние (комptonэффект);
- процесс образования электронно-позитронных пар.

Вид взаимодействия электромагнитного излучения с веществом зависит от величины энергии кванта и от атомного номера облучаемого вещества.

Фотоэффект заключается в том, что квант электромагнитного излучения полностью передает свою энергию электрону атома, облучаемого вещества, в одном акте взаимодействия. В результате такого взаимодействия возникает свободный электрон (*электрон отдачи*), кинетическая энергия (E_k) которого равна энергии кванта ($h\nu$) за вычетом энергии связи (W) электрона в атоме:

$$E_k = h\nu - W.$$

Вероятность фотоэффекта тем выше, чем ближе совпадают значения $h\nu$ и W . Фотоэлектрическое поглощение преобладает тогда, когда *энергия кванта не превышает 0,05 МэВ*, а поглотитель представляет собой вещество с большим атомным номером (например, свинец). Для атомов, входящих в состав воды и органических веществ, максимальное значение W может быть принято равным 500 эВ. В сравнении с энергией излучения, для которого характерен фотоэффект (до 200 кэВ), эта энергия довольно мала. Поэтому почти вся энергия кванта передается электрону отдачи, который покидает оболочку атома и на своем пути вызывает ионизацию атомов и молекул вещества.

Фотоэффект невозможен на слабосвязанных и свободных электронах, так как они не могут поглощать гамма-кванты. В тканях живых организмов фотоэффект характерен только для низкоэнергетических электромагнитных излучений – длинноволнового *рентгеновского и γ -излучения с энергией ниже 100 кэВ*. С увеличением энергии облучения вероятность фотоэлектрического взаимодействия с веществом уменьшается, и при энергиях, значительно превышающих энергии связи электронов в атоме (более 1 МэВ), им можно пренебречь. В этом случае излучение фотонов ослабляется за счет комптоновского рассеяния.

Эффект Комптона, упругое рассеяние падающих фотонов излучения на свободных (или слабо связанных электронах внешней оболочки атома) электронах, которым передается лишь часть энергии фотона, при этом фотон изменяет направление своего движения. Следовательно, при комптоновском рассеянии энергия падающего кванта распределяется между выбиваемым из атома электроном отдачи и вторичным рассеянным фотоном. Вследствие соударения с фотонами электроны отдачи приобретают значительную

кинетическую энергию и расходуют ее на ионизацию вещества (вторичная ионизация).

Поскольку электроны у всех веществ одинаковы, то и изменение длины волны вторичного фотона не зависит от свойств вещества, а зависит только от угла рассеяния, а, следовательно, и энергия электрона отдачи может изменяться в широких пределах: от 0 до некоторого максимального значения, при этом образовавшийся быстрый электрон ведет себя подобно фотоэлектрону.

Узкий пучок излучения в результате комптоновского рассеяния становится более широким, а само излучение более мягким. В последующих соударениях вторичный фотон ступенчато передает свою энергию электронам вещества до тех пор, пока ее остаток, близкий по значению к энергии связи электрона в атоме, не будет передан электрону путем фотоэффекта.

Образование электронно-позитронных пар происходит при взаимодействии с веществом γ -квантов большой энергии ($>1,02$ МэВ). Этот процесс наблюдается при прохождении γ -кванта вблизи атомного ядра, в поле которого и образуется пара заряженных частиц – электрон и позитрон. Вероятность такого типа размена энергии больше для тяжелых элементов, чем для легких.

Данный эффект может быть объяснен только с помощью представлений квантовой механики. Из закона сохранения энергии следует, что энергия кванта должна быть более суммы энергии покоя частиц ($2 \cdot 0,511$ МэВ), из чего вытекает, что $1,022$ МэВ расходуется на образование «массы покоя» электрона и позитрона, а остаток энергии кванта переходит в их кинетическую энергию:

$$E_{\gamma} = h\nu \geq 2m_e c^2 \approx 1,022 \text{ МэВ}; E_k = E_{\gamma} - 2m_e c^2 = h\nu - 1,022 \text{ МэВ}.$$

Позитрон, встретившись с любым свободным или орбитальным электроном (вероятность этого возрастает с уменьшением кинетической энергии позитрона) взаимодействует с ним, что приводит к возникновению аннигиляционного γ -излучения. В этом процессе, которому, в конце концов, подвергаются все позитроны, энергия массы покоя частицы сообщается образовавшимся двум квантам аннигиляционного излучения. Следовательно, энергия каждого вторичного γ -кванта вдвое меньше энергии исходного γ -кванта, но не менее $0,511$ МэВ. Аннигиляционное γ -излучение поглощается в веществе путем комптоновского рассеяния и затем фотоэффекта.

Таким образом, в зависимости от энергии падающего электромагнитного излучения преобладает один из трех видов его взаимодействия с веществом. В веществах, в состав которых входят атомы элементов с низкими массовыми числами, что характерно для низкомолекулярных органических веществ и биополимеров, при энергии электромагнитного ИИ $0,15$ – 20 МэВ наибольшее значение в поглощении энергии имеет упругое рассеяние, при меньших энергиях квантов –

фотоэффект и соответственно при больших – преобладает образование электрон-позитронных пар.

При всех трех видах первичного взаимодействия электромагнитного ИИ происходит ионизация и возбуждение атомов и молекул вещества, появляются несущие разную энергию быстрые электроны, которые в свою очередь, взаимодействуют с веществом, также ионизируя и возбуждая атомы и молекулы.

Механизмы передачи энергии корпускулярных ИИ

Корпускулярные ИИ представляют собой поток частиц (корпускул), характеризующихся массой, зарядом и скоростью, в соответствии с чем они подразделяются на легкие и тяжелые, заряженные и незаряженные, быстрые и медленные.

При взаимодействии заряженных частиц с веществом выделяют упругое и неупругое взаимодействие.

При упругом взаимодействии суммарная кинетическая энергия частиц до взаимодействия равна суммарной кинетической энергии после их взаимодействия. Следствие такого взаимодействия – лишь изменение направления движения частиц.

$$W_1 + W_2 = W_1' + W_2',$$

где W_1 и W_2 – кинетическая энергия до взаимодействия,

W_1' и W_2' – кинетическая энергия после взаимодействия.

Неупругое взаимодействие – это процесс, при котором часть кинетической энергии частиц расходуется на ионизацию и возбуждение атомов, возбуждение ядер, расщепление ядер или тормозное излучение. При таком взаимодействии суммарная кинетическая энергия частиц до взаимодействия будет равна суммарной кинетической энергии частиц после взаимодействия плюс энергия E , затраченная на ионизацию и возбуждение атомов, возбуждение и расщепление ядер или тормозное излучение:

$$W_1 + W_2 = W_1' + W_2' + E.$$

Взаимодействие заряженных частиц с веществом

Механизм передачи энергии при взаимодействии с веществом для всех заряженных частиц одинаков. При прохождении через вещество заряженные частицы взаимодействуют с электронными оболочками и ядрами атомов. В результате взаимодействия с быстрой заряженной частицей электрон получает дополнительную энергию и переходит на более отдаленный от ядра энергетический уровень, либо совсем покидает атом. В первом случае происходит возбуждение, а во втором – ионизация атома. Этот процесс продолжается до тех пор, пока запас энергии частицы не уменьшится настолько, что она потеряет ионизирующую способность.

В зависимости от знака заряда при прохождении частицы через вещество она испытывает электростатическое взаимодействие, то есть притягивается или отталкивается от положительно заряженных ядер атомов. Поскольку *α -частица* положительно заряжена, то *при упругом* взаимодействии с ядром возникают кулоновские силы, и частица

отталкивается, изменяя направление своего движения. *Неупругое* взаимодействие с атомными ядрами наблюдается, если α -частица обладает достаточной энергией для преодоления кулоновских сил взаимодействия (тогда она проникает в ядро). При этом образуется промежуточное ядро, которое распадается с испусканием заряженных частиц, нейтронов или γ -квантов.

Упругое взаимодействие **β -частиц** с веществом наблюдается при электрическом взаимодействии β -частиц с орбитальными электронами. β -частица отталкивается от отрицательно заряженных электронов, изменяя направление своего движения. Упругое взаимодействие β -частиц с атомными ядрами наблюдается в результате притяжения β -частиц к положительно заряженным ядрам атомов (электрическое взаимодействие). Следствие такого взаимодействия – изменение направления движения частиц.

При неупругом взаимодействии β -частиц с орбитальными электронами происходит ионизация и возбуждение атомов и молекул среды. β -частицы расходуют свою энергию до тех пор, пока общий запас энергии не уменьшится до такой степени, что частица теряет ионизационную способность. Неупругое рассеяние β -частиц на атомных ядрах наблюдается, если β -частица имеет высокую энергию, а поглотителем служит материал большой плотности. При этом β -частица тормозится в электрическом поле ядра атома и теряет часть своей энергии. Следствие такого взаимодействия – возникновение тормозного (электромагнитного) излучения. Интенсивность тормозного излучения определяется энергией β -частиц и атомным номером поглотителя.

Траектория движения заряженных частиц зависит от их массы – чем больше масса летящей частицы, тем менее она отклоняется от первоначального направления. Поэтому протоны, дейтроны, β -частицы и более тяжелые ядерные частицы двигаются практически прямолинейно, а траектория электронов (β -частиц) сильно изломана в результате рассеяния на орбитальных электронах и ядрах атомов.

Взаимодействие незаряженных частиц с веществом

Вследствие того, что нейтроны не имеют заряда, а их масса много больше массы электронов, они обладают большой проникающей способностью и теряют свою энергию практически только при соударении с ядрами атомов. При этом возможно упругое и неупругое рассеяние нейтронов на ядрах.

В зависимости от энергии различают сверхбыстрые, быстрые, промежуточные, медленные и тепловые нейтроны.

Сверхбыстрые нейтроны (10–50 МэВ). Их получают в ядерных реакторах, они возникают при ядерных взрывах. При взаимодействии с тяжелыми элементами сверхбыстрые нейтроны вызывают деление их ядер на 2–3 осколка. Во время каждого акта деления высвобождается колоссальная энергия (около 200 МэВ) и вылетает 2–3 свободных нейтрона, которые способны вызвать деление других ядер (цепная реакция). Ядерные реакции

сопровождаются возникновением α -излучения или заряженных частиц (α -частиц и др.), в результате чего могут образовываться радиоактивные изотопы элементов и появиться наведенная радиоактивность.

Быстрые нейтроны (>100 кэВ). Образуются в результате ядерных реакций. При соударении с ядрами атомов быстрые нейтроны передают им часть своей энергии, образуя быстролетающие ядра (ядра отдачи). Ядра отдачи, как и все заряженные частицы, тратят свою энергию на ионизацию среды. Доля передаваемой ядру энергии возрастает с уменьшением массы ядра. Так, при соударении нейтронов с ядрами водорода (протонами) им передается до 60 % энергии нейтрона, так как массы этих частиц практически равны. Быстрые нейтроны хорошо замедляются легкими веществами, содержащими много атомов водорода: вода, парафин, ткань, и свободно проходят через большие толщи тяжелых веществ (свинец). При взаимодействии с ядрами нейтроны постепенно замедляются вплоть до тепловых скоростей.

Промежуточные нейтроны (100эВ-1кэВ). Они чаще взаимодействуют с веществом по типу упругого рассеяния.

Медленные (не более 1кэВ) и тепловые нейтроны (0,025 эВ). Медленные нейтроны захватываются ядрами атомов, в результате образуются новые стабильные или радиоактивные изотопы. В водородсодержащих веществах ядра водорода захватывают медленные нейтроны и превращаются в ядра тяжелого водорода – дейтерия. Радиационный захват нейтронов сопровождается испусканием жестких γ -квантов с энергией, равной 2,18 МэВ. Для защиты от нейтронов с низкой энергией необходимо использовать, кроме поглотителя (вода, бор или кадмий), и экран из тяжелого материала (свинец, барий) для ослабления γ -излучения.

В результате различных типов взаимодействия нейтронов с веществом образуются протоны, α -частицы, ядра отдачи, γ -кванты, способные ионизировать и возбуждать атомы и молекулы. Следовательно, конечный биологический эффект при нейтронном облучении связан с ионизацией, производимой опосредованно вторичными заряженными частицами и фотонами. Вклад того или иного вида ядерного взаимодействия зависит от энергии нейтронов и состава, облучаемого вещества.

4. Дозы ионизирующих излучений

Дозиметрия (от греч. dosis - доля, порция, приём и metreo - измеряю), измерение, исследование и теоретические расчёты тех характеристик ионизирующих излучений (и их взаимодействия со средой), от которых зависят радиационные эффекты в облучаемых объектах живой и неживой природы. Первоначально развитие Д. определялось как раздел прикладной ядерной физики, предметом исследования которого является определение физических величин, характеризующих воздействие ионизирующих излучений на среду, и разработка методов и средств для измерения этих

величин. В круг задач дозиметрии входят: измерение и расчет доз в полях источников излучений и в биологических объектах (тканевая дозиметрия), измерение активности [радиоактивных препаратов](#) и других главным образом необходимостью защиты от воздействия рентгеновского и γ -излучений естественных радиоактивных веществ. Радиационные эффекты, в частности ионизация частиц среды, зависят от поглощённой энергии излучения. Так как воздух для γ - и рентгеновского излучений может служить моделью воды или мышечной ткани (у них близкие эффективные атомные номера) и ионизацию, пропорциональную поглощённой, легко измерить с помощью ионизационных камер, то измерение экспозиционной дозы было в течение длительного периода основой практической Д., обслуживавшей главным образом медицину.

В дальнейшем, с развитием реакторостроения, ускорительной техники и производства радиоактивных нуклидов, появились новые мощные источники излучения, в том числе и отличного от рентгеновских и γ -лучей. Это потоки нейтронов, ускоренных электронов, позитронов и тяжёлых заряженных частиц. Применения Д. распространились на службу радиационной безопасности, радиобиологию, радиационную химию, ядерную физику и радиационную технологию. Знание поглощённой энергии стало необходимо не только для воды и биологической ткани; воздух уже не мог рассматриваться как модель облучаемой среды. В этой связи в Д. утвердилось понятие поглощённой дозы как универсальной величины, применимой ко всем видам ионизирующего излучения и ко всем средам. Однако при равных поглощённых дозах воздействие излучения зависит также от его вида и других характеристик - «качества» излучения. Количественной характеристикой «качества» в начале служила средняя плотность ионизации, в последствии уточнённая, как линейная передача энергии (ЛПЭ). Влияние ЛПЭ на радиационные эффекты наиболее подробно было исследовано в радиобиологии, где изучалась зависимость относительной биологической эффективности от ЛПЭ. Применительно к хроническому облучению людей (для обеспечения радиационной безопасности и нормирования условий труда) регламентированную зависимость такого рода – зависимость коэффициента качества излучения от ЛПЭ.

Методы измерения поглощенной энергии в плотных средах основаны на ряде физических явлений, сопутствующих прохождению излучений через вещество. Старейший метод регистрации ионизирующих излучений — фотографический. Этим методом были получены первые сведения о новом виде энергии. Фотопленку можно использовать и для измерения величины доз, так как степень почернения пленки пропорциональна поглощенной энергии. На регистрации световых вспышек (сцинтилляции), которые испускают возбужденные ионизирующими излучениями [атомы](#) и молекулы, основан сцинтилляционный метод. Световые вспышки регистрируются [фотоэлектронным умножителем](#) (ФЭУ), включенным в соответствующую

электронную схему. Химический метод дозиметрии заключается в выявлении необратимых химических изменений, происходящих под действием излучений в веществе, чаще всего в водных растворах. В этих целях широко используется реакция превращения двухвалентного железа в трехвалентное (в ферро-сульфатном дозиметре). Регистрацию необратимых химических изменений осуществляют различными физическими или химическими методами. Все более широкое распространение получают люминесцентные методы дозиметрии, поскольку под действием ионизирующих излучений в некоторых веществах образуются скрытые центры свечения (люминесценции), которые проявляются при последующем световом (фотолюминесценция) или тепловом (термолюминесценция) воздействии на облученные вещества. При этом свечение регистрируется ФЭУ. Перспективным является использование полупроводников для целей дозиметрии. Наиболее точным, но технически сложным методом дозиметрии является калориметрический, состоящий в прямом измерении тепловой энергии, в которую преобразуется в конечном счете энергия излучения.

Особый интерес представляет тканевая дозиметрия; так как непосредственное измерение поглощенных доз в живом организме невозможно, изготавливают тканеэквивалентные фантомы человека или животных, внутри которых и измеряют излучения одним из выше описанных способов.

Определение активности радиоактивных препаратов, используемых для лечения опухолей, изучение процессов переноса и обмена веществ в организме и др. производится путем измерения числа частиц, испускаемых препаратом в единицу времени. Этот раздел дозиметрии называется радиометрией.

Радиометрия (от лат. radio - излучаю и греч. metreo-измеряю), регистрация с помощью радиометрических приборов излучений, испускаемых ядрами радионуклидов. Основана на различных эффектах взаимодействия излучения с веществом (ионизация, люминесценция, излучение Черепкова-Вавилова, образование треков в прозрачных средах, тепловое действие излучения, воздействие на фотографические материалы и др.).

Радиометрические приборы состоят из детекторов, в которых происходит преобразование энергии излучения в электрическую или другие сигналы, и регистрирующих устройств. Детекторы могут быть ионизационными, сцинтилляционными, трековыми и др., в зависимости от того, на каком из эффектов основано их действие. По агрегатному состоянию рабочего тела различают газонаполненные, жидкостные, твердотельные детекторы; по типу регистрируемого излучения-детекторы α -частиц, β -частиц, γ -квантов, нейтронов.

4.1 Дозы ионизирующих излучений и единицы их измерения

Доза – количество поглощенной энергии излучения от ионизации в рассматриваемом объеме (массе) вещества.

Так как имеются существенные различия между действием радиации на неживое и живое вещество, а также реакциями различных органов и тканей на разные виды излучения, то принято различать несколько разновидностей доз: экспозиционная, поглощенная, эквивалентная, эффективная и др.

Экспозиционная доза (D) служит количественной мерой действия ионизирующего излучения, падающего на объект. Она характеризует ионизирующую способность рентгеновских и гамма-лучей в воздухе. Экспозиционную дозу определяют по ионизирующему действию квантового излучения в определенной массе воздуха и только при значениях энергии рентгеновских и гамма-лучей в диапазоне от десятков кэВ до 3 МэВ.

Физическое воздействие любого ионизирующего излучения на вещество связано, прежде всего, с ионизацией атомов и молекул. Исходя из этого экспозиционная доза равна отношению электрического заряда ионов одного знака, возникающих в сухом воздухе, при его облучении фотонами, к массе воздуха:

$$D_x = q/M.$$

За единицу экспозиционной дозы в Международной системе единиц (СИ) принят кулон на килограмм (Кл/кг). 1 Кл/кг равен экспозиционной дозе рентгеновского или гамма-излучения, при которой в 1 кг сухого атмосферного воздуха создаются ионы, несущие электрический заряд каждого знака, равный 1 Кл.

До настоящего времени используется внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (Р).

$$1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}.$$

1 рентген равен экспозиционной дозе рентгеновского или гамма-излучения, при которой в 1 см³ воздуха (0,001293 г сухого воздуха) при нормальных условиях ($t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $p = 1013 \text{ ГПа}$) в результате завершения всех ионизационных процессов, вызванных этим излучением, образуется $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов. Такая доза накапливается за 1 ч на расстоянии 1 м от радиоактивного препарата радия массой 1 г.

Поскольку на образование одной пары ионов в воздухе в среднем затрачивается 34 эВ, то энергетический эквивалент рентгена в 1 см³ воздуха составляет $2,08 \cdot 10^9 \cdot 34 = 7,08 \cdot 10^4 \text{ МэВ} = 0,114 \text{ эрг/см}^3$, или в 1 г воздуха 88 эрг ($0,114/0,001293 \text{ г} = 88 \text{ эрг}$).

Производные единицы рентгена: килорентген ($1\text{кР} = 10^3\text{Р}$), миллирентген ($1\text{мР} = 10^{-3}\text{Р}$), микрорентген ($1\text{мкР} = 10^{-6}\text{Р}$).

Для измерения экспозиционной дозы существует простой физический метод, заключающийся в измерении суммарного заряда ионов, образовавшихся под действием радиации в воздушной ионизационной камере.

В биологическом отношении очень важно знать не просто дозу излучения, которую получил объект, а дозу, полученную в единицу времени. Скорость приращения экспозиционной дозы (накопление дозы в единицу времени) в поле излучения называется *мощностью экспозиционной дозы* ($P_э$):

$$P_э = D_э/t$$

Единицей мощности экспозиционной дозы в СИ служит ампер на килограмм (А/кг), внесистемная единица - рентген в час (Р/ч) или рентген в минуту (Р/мин) и т. д. Часто используют мР/ч, мкР/ч. Иногда в качестве единицы мощности экспозиционной дозы используют кулон на килограмм в секунду (Кл/кг·с⁻¹). Так, если в облученном воздухе измерен ток в 1 мкА/кг, это соответствует 1 мкКл/кг·с⁻¹.

Для оценки действия излучения на конкретный объект гораздо важнее определить энергию, поглощенную им, чем энергию, падающую на объект или прошедшую через него. В данном случае универсальной мерой воздействия любого вида излучения на вещество является поглощенная доза.

Поглощенная доза (D) – энергия ионизирующего излучения, переданная массе вещества:

$$D_n = E/m.$$

Единицей измерения поглощенной дозы в СИ является грей (Гр). Один грей соответствует поглощению 1 джоуля энергии (Дж) в килограмме поглощенного вещества:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}.$$

Внесистемной единицей поглощенной дозы является рад. Один рад соответствует поглощенной веществом энергии любого ионизирующего излучения, равной 100 эрг/г:

$$1 \text{ рад} = 2,39 \cdot 10^{-6} \text{ кал/г} = 0,01 \text{ Дж/кг}.$$

Соотношение новой единицы к старой выражается так: 1 Гр = 100 рад (1 рад = 0,01 Гр).

Поглощенная доза несомненно зависит от экспозиционной дозы. Если известны величины экспозиционной дозы и коэффициента поглощения ткани, то можно рассчитать поглощенную дозу. Экспериментально установить величину поглощенной дозы сложно. Выполнить это можно, если тканеэквивалентные дозиметры с детекторами установить в полости тела или в его модели – фантоме.

Мощность поглощенной дозы определяется как приращение дозы в единицу времени и рассчитывается по отношению поглощенной дозы излучения ко времени облучения:

$$P_n = D_n/t.$$

Единица мощности поглощенной дозы – грей в секунду (Гр/с), а внесистемная единица – рад в секунду (рад/с).

Вычисления доз облучения при поступлении радиоизотопов внутрь организма

Радиоактивные изотопы, попавшие в организм, будут облучать его в течение всего времени нахождения в нем. Время нахождения радиоизотопа в организме определяется его эффективным периодом полувыведения $T_{\text{эфф}}$, который вычисляется по формуле:

$$T_{\text{эфф}} = (T_{\text{физ}} * T_{\text{биол}}) / (T_{\text{физ}} + T_{\text{биол}})$$

$T_{\text{эфф}}$ показывает за какое время количество радиоизотопа уменьшается в организме в два раза, т.е. на половину. $T_{\text{эфф}}$ зависит от периода полураспада радиоизотопа ($T_{\text{физ}}$) и периода полувыведения изотопа из организма ($T_{\text{биол}}$), т.е. времени за которое выводится половина количества изотопа (с калом, мочой, молоком).

Радиоактивные изотопы, попавшие в организм, вступают в химические соединения с различными веществами его тканей. Например, изотопы йода (йод – 131 и др.) входят в состав гормонов щитовидной железы, а изотопы стронция (Sr - 90), кальция (Ca - 45) входят в состав костной ткани.

Радиоизотопы накапливаются в чувствительных к излучению и важных для жизнедеятельности организма органах и тканях, так называемых критических органах и тканях. Например, изотопы йода концентрируются в щитовидной железе, изотопы стронция, фосфора, кальция в костях, цезия в мышцах, полония в почках и т.д. Радиоизотопы, облучая органы и ткани, создают дозу внутреннего облучения.

При внутреннем облучении необходимо учитывать коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) различных видов излучений. Наибольшую опасность при внутреннем облучении представляют альфа-излучающиеся изотопы (полоний – 210, свиней - 210).

4.2. Линейная передача энергии и относительная биологическая эффективность

Средняя энергия, теряемая заряженной частицей на единице длины ее пробега в веществе, называется **линейной передачей энергии (ЛПЭ)**. За единицу этой величины принимают 1 кэВ на 1 мкм пути (1кэВ/мкм = 62 Дж/м). ЛПЭ зависит от вида заряженной частицы, ее энергии и плотности вещества поглотителя. Однако величиной ЛПЭ характеризуют не только заряженные частицы, но и нейтральные частицы и электромагнитные излучения, так как при прохождении их через вещество в результате взаимодействия с атомами и молекулами возникает вторичное излучение (ускоренные электроны, протоны и др.) которое характеризуется ЛПЭ (табл. 4.1.).

ЛПЭ в мягких биологических тканях для различных излучений (А.В. Аверьянова и др., 1992)

Вид излучения	Энергия излучения кэВ	ЛПЭ, кэВ/мкм
Электроны	2000	0,2
γ-излучение (⁶⁰ Co)	1170	0,24
Рентгеновское излучение	250	3,0
β-излучение (³ H)	18,65	4,7
Электроны	600	5,5
Рентгеновское излучение	50	6,3
Протоны	12000	10
Тепловые нейтроны	до 0,0005	20
Протоны отдачи	1300 ²	45
α-излучение (²³⁹ Pu)	5107-5157	120
Осколки деления	≈200000 ³	1000

² Средняя энергия нейтронов деления, вызывающих появление протонов отдачи.

³ Суммарная кинетическая энергия осколков деления

В зависимости от величины ЛПЭ, а, следовательно, от плотности ионизации, все ИИ делят на *редко- и плотноионизирующие*. К редкоионизирующим излучениям обычно относят рентгеновское, γ- и β-излучение, а к плотноионизирующим – тяжелые заряженные частицы. Но ЛПЭ однозарядных частиц в основном зависит от их скорости (а не от массы), соответственно тяжелые частицы при высоких скоростях могут ионизировать вещество меньше, чем электроны малой энергии. Поэтому к редкоионизирующим принято относить все виды излучения (независимо от их природы), для которых ЛПЭ не превышает 10 кэВ/мкм, а к плотноионизирующим – те, у которых ЛПЭ более 10 кэВ/мкм.

ЛПЭ заряженных частиц возрастает со снижением их скорости, поэтому в конце пробега передача энергии заряженной частицей веществу максимальна, что приводит к характерному распределению ионизации (каждая заряженная частица создает больше ионов на единице пути, чем вначале). Эта зависимость получила название *кривой Брега* с максимумом в конце пробега – *ником Брега* (рис. 4.1).

Самой высокой удельной ионизацией из всех ионизирующих излучений обладают α-частицы. Так, пробегая в воздухе расстояние всего до 10 см, одна частица на каждом сантиметре пути вызывает образование десятков тысяч пар ионов, а β-частица на 1 см пробега образует 50–100 пар ионов (пробегая в воздухе 25 м). Фотоны электромагнитных ИИ, пробегая в воздухе сотни метров, имеют минимальную плотность ионизации.

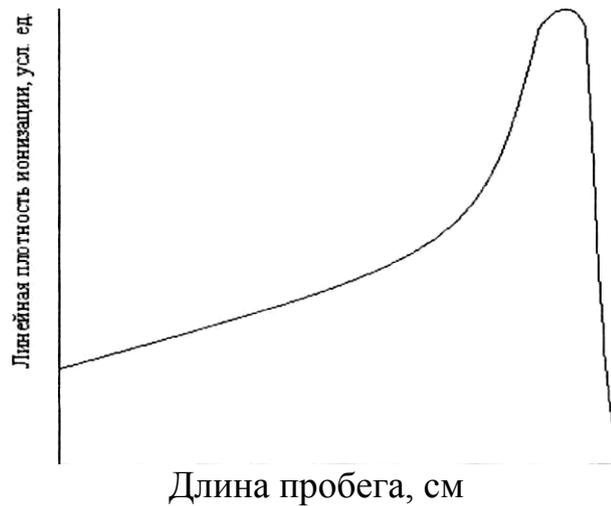


Рис. 4.1. Кривая Брега

Таким образом, величина Л ПЭ характеризует разные типы ионизирующих излучений и играет важную роль в проявлении радиобиологических реакций организма.

Относительная биологическая эффективность разных видов ИИ

При описании физических основ биологического действия радиации указывалось, что воздействие разными видами излучений, но в равных поглощенных дозах приводит к различным по величине эффектам. Это свойство излучения, часто называемое его качеством, определяется не столько физической природой излучения, сколько его ЛПЭ. Для количественной оценки качества излучения введена специальная величина **«относительная биологическая эффективность излучения» (ОБЭ)**. Ее оценивают сравнением дозы излучения, вызывающей определенный биологический эффект, с дозой стандартного излучения, обуславливающей тот же эффект:

$$\text{ОБЭ} = D_0/D_x,$$

где D_0 – доза стандартного излучения, Гр;

D_x – доза изучаемого излучения, Гр.

Как правило, в качестве биологического эффекта в данном случае используется выживаемость, частота возникновения aberrаций, опухолей, изменение продолжительности жизни и т. д.

ОБЭ для электромагнитных излучений может изменяться в пределах 0,8–1,5. Для редкоионизирующих излучений с энергией менее 3 МэВ (ЛПЭ < 3 кэВ/мкм) значение ОБЭ близко к 1. Значения ОБЭ нейтронов с энергией 10–20 МэВ обычно близко к 10, для протонов и дейтронов получены аналогичные значения. ОБЭ α -частиц и ускоренных тяжелых ионов достигает 20.

Как уже отмечалось выше, от плотности образования ионов в веществе при прохождении ИИ (характеризуется ЛПЭ) зависит и степень повреждения биологического объекта, следовательно, величина ОБЭ зависит от ЛПЭ (рис. 4.2; Д. Баренденсен, 1968).

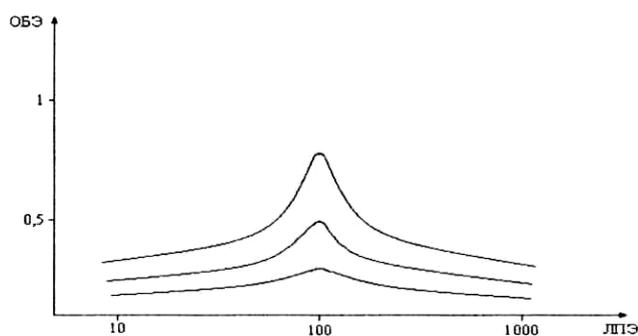


Рис. 4.2. Зависимость ОБЭ от ЛПЭ

Кроме того, величина ОБЭ в определенной степени зависит еще от целого ряда факторов: величины и мощности дозы, ее фракционирования, физиологического состояния объекта, количества в среде облучения кислорода и др. Часто невозможно достичь соответствия условий измерения радиобиологического эффекта от доз D_0 и D_x (например, при облучении крупных животных – лошадей, коров и др. очень сложно достичь равномерного распределения дозы во всех органах и тканях), поэтому при получении разности в эффектах облучения при равных дозах говорят не об ОБЭ, а об *отношении равных эффектов доз*. В связи с этим в радиобиологии введено понятие эквивалентной дозы.

Биологическое действие одинаковых доз разных видов излучений на организм неодинаково. Это связано с удельной ионизацией излучения (ЛПЭ). Чем выше ЛПЭ, тем больше коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ), или *коэффициент качества излучения Кк* (округленное значение ОБЭ).

Таблица 4.2

Коэффициенты качества ионизирующих излучений

Вид излучения	Коэффициент качества
γ -излучение	1
Рентгеновское излучение	1-2
β -излучение	0,3-3
Тепловые нейтроны	4-5
Протоны и быстрые нейтроны (до 20 МэВ)	0,5-10
Поток протонов	10
α -излучение	10-20
Многозарядные ионы и ядра отдачи	20-30

Эквивалентная доза ($D_{экв}$) учитывает биологическую эффективность различных видов ионизирующих излучений. Ее величина определяется произведением поглощенной дозы D_n на коэффициент качества излучения:

$$D_{экв} = D_n K_k.$$

Если идет облучение различными видами излучения одновременно, то эквивалентная доза равна сумме поглощенных доз от каждого вида излучения, умноженной на коэффициент качества этого вида излучения:

$$D_{\text{экв}} = \sum D_{\text{пi}} K_{\text{кi}},$$

где i – вид излучения.

В системе СИ единицей эквивалентной дозы является зиверт (Зв). Используются также производные единицы мЗв, мкЗв. Внесистемная (старая) единица измерения эквивалентной дозы – биологический эквивалент рентгена (бэр) вычисляется исходя из поглощенной дозы в радах:

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр} \quad (1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}).$$

Пример: рассчитать поглощенные физическую и эквивалентную дозы от смешанного источника излучения, если доза от гамма-излучения 1 Гр, от бета-излучения – 10 Гр, от альфа-излучения – 1 Гр и от быстрых нейтронов – 1 Гр.

Решение:

$$D_{\text{п}} = \sum D_{\text{пi}} = 1 + 10 + 1 + 1 = 13 \text{ Гр}.$$

Подставив значения $D_{\text{пi}}$ и $K_{\text{к}}$, получим:

$$D_{\text{экв}} = \sum D_{\text{пi}} \cdot K_{\text{к}} = 1 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 10 + 1 \cdot 10 = 31 \text{ Гр}.$$

Следовательно, эквивалентная доза оказывается в два с лишним раза больше физической.

Эффективная доза ($D_{\text{эфф}}$) обозначает общий радиационный ущерб для всего организма с учетом радиочувствительности облученных эквивалентными дозами тканей и органов:

$$D_{\text{эфф}} = \sum D_{\text{экв i}} \cdot \text{ТК}_i \quad (D_{\text{эфф}} = D_{\text{экв 1}} \cdot \text{ТК}_1 + D_{\text{экв 2}} \cdot \text{ТК}_2),$$

где ТК – тканевой взвешивающий коэффициент.

Эффективная доза, как и эквивалентная, также измеряется в зивертах (Зв) или производных от него единицах.

Следует учитывать, что различные органы и ткани организма обладают разной чувствительностью к действию ионизирующих излучений. Поэтому вводятся коэффициенты радиационного риска для разных органов и тканей, которые называются *тканевыми взвешивающими коэффициентами (ТК)*.

Таблица 4.3

Тканевые взвешивающие коэффициенты

Наименование органов и тканей	ТК
Поверхность кожи, кожа	0,01
Мочевой пузырь, грудная железа, печень, пищевод, щитовидная железа, остальные органы и ткани	0,05
Толстая кишка, легкие, костный мозг, желудок	0,12
Половые железы (гонады)	0,20
Все тело	1,0

Тканевые коэффициенты позволяют сопоставить неравномерное облучение отдельных органов с радиационными последствиями для всего организма. Опаснее всего, когда облучению подвергается все тело, так как

нарушаются взаимосвязи сложнейшей биологической системы, какой является человек, в отличие от нарушения одной или нескольких функций, выполняемых отдельным органом.

В случаях, когда радиоэкологическая обстановка неблагоприятна, необходимо предвидеть, какую дозу облучения получит человек за предстоящий год, десять лет, в течение всей жизни. Для этого вводится понятие *ожидаемой эффективной дозы (Зв)*. Это позволяет оценить вероятность последствий и принять соответствующие защитные меры. Расчет ожидаемой дозы сложен и требует учета множества различных факторов.

Коллективные дозы

Коллективную эффективную дозу можно получить, просуммировав индивидуальные дозы по группе облученных людей. Измеряется в человеко-зивертах (чел-Зв). Коллективную дозу можно рассчитать для отдельного поселка, области, республики или для всего контингента подвергшихся облучению людей. Таким образом, коллективная доза – объективный показатель масштаба радиационного поражения, по которому воздействие ядерных взрывов или радиационных аварий на население сравниваются между собой.

Ожидаемую коллективную эффективную дозу (чел-Зв) рассчитывают, если какая-то часть населения продолжает жить в условиях длительного хронического облучения, и известны закономерности изменения радиационного воздействия [Люцко А.М. и др., 1996].

4.3. Виды облучения

Для характеристики распределения ионизирующего излучения во времени используют величину мощности дозы или интенсивности излучения. Под этим понимают количество энергии излучения, поглощаемой единицей массы вещества в единицу времени (час, минута, секунда).

При облучении организма в зависимости от мощности дозы различают *острое и пролонгированное* облучение. Под острым понимают кратковременное (секунды, минуты, реже часы) облучение при высокой мощности дозы (дГр/мин и выше). Соответственно под *пролонгированным* – продолжительное облучение (десятки часов, сутки, недели и т. д.) при низкой мощности дозы (доли Гр/час и ниже).

Кроме этого в зависимости от актов облучения различают *однократное и фракционированное (многократное)* облучение. При *однократном* облучении вся доза формируется в течение одного непрерывного акта облучения. При *фракционированном* облучении делится на две и более фракции, чередующихся с периодами, в течение которых организм не подвергается облучению.

Как острое, так и пролонгированное облучение может быть однократным или фракционированным. Кроме того, выделяется еще *хроническое облучение*, которое рассматривается как предельный случай

продолжительного или как разновидность фракционированного облучения, проводящегося очень длительно и в малых дозах. В данном случае облучение идет при очень низких мощностях дозы (сотые и даже тысячные доли Гр/час) на протяжении всего периода вегетационного периода растений, значительной части онтогенеза или всей жизни животного.

Разница в мощности дозы облучения, как правило, определяет биологическую эффективность разных типов облучения. Доза продолжительного облучения, вызывающая определенный биологический эффект, существенно превышает дозу острого, дающего тот же эффект. Доза хронического облучения, вызывающая одинаковое биологическое действие, может в 3 раза и более превышать дозу острого облучения.

В случае фракционированного облучения биологическая эффективность зависит от количества фракций и от продолжительности интервала между ними. С увеличением продолжительности времени между фракциями биологических эффектов облучения снижается за счет восстановления в этот период различных структур и функций клеток, и как следствие – организма в целом.

Кроме всего перечисленного, по способу воздействия следует различать *внешнее и внутреннее облучение*. При *внешнем* действии облучения объект (организм) находится в поле действия источника излучения, в данном случае особую опасность имеют электромагнитные ионизирующие излучения, которые и формируют дозу, так как обладают наибольшей проникающей способностью.

Особые условия создаются при *внутреннем* облучении, поскольку инкорпорированные радионуклиды, попадая внутрь организма, могут концентрироваться в отдельных органах, тканях, клетках и даже клеточных органеллах. В этих условиях действием корпускулярных излучений уже нельзя пренебречь, так как основной вклад в поглощенную дозу вносится корпускулярным излучением.

4.4. Понятие «малые дозы» и их биологическое действие на живые организмы

Оценка влияния малых доз радиации на состояние здоровья человека имеет важное теоретическое и практическое значение, так как хроническое облучение в малых дозах является наиболее типичным воздействием ионизирующих излучений на современные человеческие популяции. Актуальность данной проблемы стала еще более значимой в связи с аварией на Чернобыльской АЭС, когда большой контингент подвергся и продолжает подвергаться до настоящего времени действию низкодозового радиационного излучения.

До сих пор не существует единого общепризнанного критерия подразделения доз или уровней облучения на большие и малые. Существует несколько подходов в определении понятия «малые дозы». Так, по мнению В.А. Барабой (1991) «...для большинства объектов область малых доз

начинается с величин на два порядка ниже LD_{50} и на 1–2 порядка выше природного радиационного фона». Ф.С. Торубаров и др. (1991) под «малыми» в клинической практике понимают дозы ионизирующей радиации, не приводящие к развитию клинически очерченных нестохастических эффектов (до 1 Гр). По С.П. Ярмоненко (1997), «малые дозы» охватывают диапазон 2–2,5 Гр, наиболее часто применяемые в лучевой терапии. В то же время в одной из последних работ В.И. Корогодина и В.Л. Корогодина (1997) приводят значения малых доз, которые на порядок ниже цитированных – порядка 10–15 сЗв, «после которых у человека не наблюдается негативных детерминированных последствий. При облучении в таких дозах у человека могут проявляться только стохастические последствия, такие, как генетические нарушения и рак».

Проявление стимуляционных и деструктивных эффектов радиации, разграничивающих явления гормезиса и повреждающего действия радиации, положил в основу определения «малых» доз радиации А.М. Кузин (1977), считающий, что «...малыми дозами для данного вида организмов, для его различных тканей, для определенного процесса следует называть те, при которых выявляется обратная реакция объекта (гормезис) по сравнению с реакцией, вызываемой в области поражаемого действия этого же вида радиации».

По Д.М. Спитковскому (1992), «малой» следует считать дозу, соответствующую одному событию пролета частицы через заданный микрообъем, практически же, по утверждению С.А. Гераськина (1995), для редко ионизирующего излучения и клеток млекопитающих границы диапазона малых доз, в зависимости от величины линейного переноса энергии, лежит в пределах от десятых долей до нескольких десятков мГр.

Проанализировав фактографические данные более 120 отечественных и зарубежных работ по действию малых доз ионизирующих излучений, опубликованных за период 1990–2000 гг., мы пришли к заключению о том, что общепризнанного критерия интервалов малых доз нет. По отечественным источникам, диапазон «малых доз» составляет от 0,01 мГр (10^{-5} Гр) до 1,0–1,22 Гр, по иностранным – от 1–5 мГр (10^{-3} Гр) до 2,0 Гр. Можно отметить, что отечественные и зарубежные авторы верхнюю величину малых доз чаще всего ограничивают 1 Гр, в то время нижняя граница выглядит более неопределенной – 1 – 10 сГр. И в то же время наиболее четкий критерий количественной оценки диапазона малых доз предложен проф. Рябухиным Ю.С. (1999), он определяет диапазон малых доз до 10 мЗв. Отмеченные проблемы в значительной степени проистекают вследствие того, что проблема медико-биологических эффектов малых доз ионизирующего излучения в настоящее время находится на этапе накопления научной информации и частичной систематизации полученных данных.

Совершенно очевидно, что одна из основных проблем в определении эффектов малых доз связана с различной радиочувствительностью биологических объектов и различной индивидуальной

радиочувствительностью в пределах одного биологического вида. Для проведения исследований необходимо использовать достаточно радиочувствительные тест-системы, характеризующиеся четкой количественной зависимостью биологического эффекта от величины дозы при как можно более низких уровнях радиационного воздействия.

В настоящее время не существует единой общепризнанной концепции биологического действия малых доз ионизирующего излучения. Наибольшее распространение получила линейная беспороговая концепция, согласно которой индукция ионизирующим излучением повреждений в молекуле ДНК является беспороговым процессом, и зависимость доза – эффект в отношении выхода генетических повреждений является линейной во всем диапазоне доз. Данная концепция постулирует безусловную опасность любых уровней облучения, в том числе и не превышающего естественного радиационного фона, т. е. сколь угодно малое превышение естественного радиационного фона приводит к нарастанию частоты мутационных нарушений в соматических и/или генеративных клетках.

Вторая концепция предполагает существование порога в зависимости доза – эффект. К настоящему времени накопилось достаточно много фактов, свидетельствующих в пользу нелинейного характера дозовой зависимости в области малых значений экспозиции. Однако если в первые годы после атомных бомбардировок порог для нестохастических эффектов был определен в области свыше 500 мЗв, то затем пороговая доза снижалась до 200, 50 и 20 мЗв. Факты такого рода ставят под вопрос возможность существования реального порога для низко- дозового радиационного воздействия. Наиболее широко пороговая концепция распространена в онкологии. Так, Preston et al. (1988) на основе анализа эпидемиологических данных по частоте онкопатологий установили дозовый порог в 20 мЗв.

Анализ многочисленных работ разных авторов позволяет выделить два участка, в пределах которых дозовая зависимость отклоняется от линейной. Существенные отклонения были выявлены в области доз ниже 5 сГр. Второй интервал, в котором наблюдается существенное изменение наклона дозовой зависимости, варьирует у разных авторов в диапазоне 10-50 сГр.

К настоящему моменту опубликован ряд работ о надлинейном характере дозовой зависимости в диапазоне малых доз, что свидетельствует об их большей эффективности по сравнению с высокими.

4.5. Радиационный гормезис

При малых (различных для разных видов) дозах наблюдается удлинение сроков жизни, уменьшение спонтанного канцерогенеза, увеличивается всхожесть и скорость развития проростков растений, повышается иммунитет, ускоряется развитие эмбрионов и уменьшается их спонтанная гибель. Это явление получило название **радиационный гормезис** (рис. 4.3.) [Симак С.В., 1998].

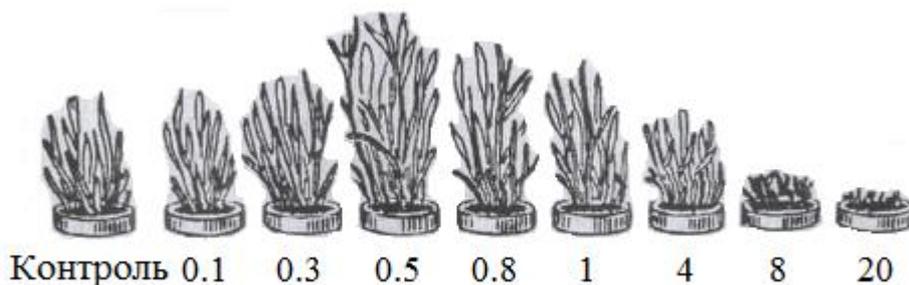


Рис. 4.3. Начальный рост кукурузы при воздействии разных доз γ -излучения на семена (в тыс. рентгенов)

Неоднократно повторенные эксперименты с разными видами организмов показали, что экранирование животных и растений от природного радиационного фона свинцовыми камерами приводит к резкому ухудшению физиологических показателей, скорости роста и развития организмов. Это показано на простейших инфузориях-парамециях, насекомых – дрозофилах; высших растениях – семенах редиса, горчицы белой и черной и животных – мышах и крысах. Внесение в экспериментальные камеры солей урана, восстанавливавших уровень природного радиационного фона, приводило развитие животных и растений к норме. А.М. Кузин (1977) предложил объясняющую это явление гипотезу, согласно которой важную роль в жизнедеятельности живого вещества играют возбужденные (но не ионизированные) молекулы. В ходе эволюции живые клетки выработали способность использовать для возбуждения молекул энергию квантов природного радиационного фона, который, следовательно, является не только «фоном», но важным фактором жизни на Земле.

5. Приборы и приспособления для обнаружения и регистрации ионизирующих излучений

5.1 Детекторы

Радиоактивные излучения не воспринимаются органами чувств. Эти излучения могут быть обнаружены (детектированы) при помощи приборов и приспособлений – детекторов, работа которых основана на физико-химических эффектах, возникающих при взаимодействии излучений с веществом [Белов АД. 1999].

В ядерно-физических приборах имеются особые устройства (детекторы), в которых энергия ионизирующего излучения преобразуется в электрический сигнал. По величине сигнала можно судить об энергии поглощенной в детекторе частицы (т. е. о виде распадающихся изотопов), а по их числу – о количестве актов распада. Так, β -частицы трития, имеющие очень малую энергию, создают при ионизации очень небольшой заряд, и их

сигналы невелики. В то же время высокоэнергетичные электроны стронция и сопутствующего ему иттрия вызывают в детекторе большие электрические сигналы.

Существует несколько типов детекторов излучения. В практике наиболее употребительны ионизационные детекторы излучений, которые измеряют непосредственно эффект взаимодействия излучения с веществом – ионизацию газовой среды, заполняющей рабочий объем (ионизационные камеры, пропорциональные счетчики и счетчики Гейгера – Мюллера и др.). В других детекторах предусматривается измерение вторичных эффектов, обусловленных ионизацией, – фотографического, сцинтилляционного (люминисцентного), химического и др.

Ионизационные счетчики

В ионизационном счетчике (они тоже бывают разными) поглощающим веществом служит газ в пространстве между двумя электродами. Простейший ионизационный счетчик представляет собой трубку, на внутренние стенки которой нанесен слой проводящего металла, например, меди. Его присоединяют к отрицательному полюсу батареи (чаще всего заземляют). Таким образом получается отрицательный электрод. В центре трубки натянута нить – анод. На нее подают положительный потенциал. Под действием электрического поля ионы, которые образуются при взаимодействии попадающих в трубку частиц с наполняющим газом, в зависимости от заряда устремляются к соответствующим электродам: положительно заряженные – к катоду, отрицательные (электроны) – к аноду. Эти заряды формируют электрический сигнал – один на каждую провзаимодействовавшую частицу [Люцко А.М. и др., 1996].

Ионизационные камеры применяют для измерения всех типов ядерных излучений. Ионизационные камеры могут быть плоские, цилиндрические и сферические с объемом воздуха 0,5–5 л. Камеры с большим объемом более чувствительны, поэтому для измерения малых доз используют камеры с большим объемом. Обычно стенки камеры изготавливают из воздухоэквивалентного материала, 1 г которого поглощает такую же энергию, как 1 г воздуха при одинаковых условиях облучения. Такими материалами служат органические пластмассы (плексиглас, бакелит, резит, полистирол и т. п.). Толщина стенок составляет 2–4 мм. Сила тока насыщения, в режиме которого работают ионизационные камеры, достигается при напряжении 150–300 В).

Токовые ионизационные камеры применяют для измерения интенсивности всех типов излучения, которые пропорциональны средней силе тока, проходящего через камеру. Поскольку сила ионизационного тока пропорциональна энергии излучения, то ионизационные камеры измеряют силу тока насыщения в единицу времени, т. е. мощность дозы данного излучения. Следовательно, ионизационные камеры могут быть использованы для измерения не только дозы излучения, но и ее мощности.

Пропорциональные счетчики выгодно отличаются от ионизационной камеры тем, что начальное усиление первичной ионизации происходит внутри самого счетчика ($K_{г.у.} = 10^3 - 10^4$). Использование газового усиления в пропорциональных счетчиках дает возможность значительно повысить чувствительность измерений и упростить схему усиления сигнала по сравнению с ионизационными камерами. Наличие пропорциональности усиления в счетчиках позволяет определить энергию ядерных частиц и изучать их природу.

Обычно пропорциональный счетчик делают в виде цилиндра. Чтобы обеспечить проникновение в полость счетчика альфа-частиц, входное слюдяное окно делают очень тонким (4–10 мкм). Наполняют счетчик смесью неона с аргоном почти до уровня атмосферного давления. В целях повышения эффективности регистрации излучений пропорциональные счетчики иногда делают в виде плоских многолитных детекторов. Пропорциональные счетчики в большинстве случаев используются для регистрации альфа-частиц.

Счетчики Гейгера–Мюллера – это газоразрядные счетчики, которые конструктивно мало чем отличаются от пропорциональных счетчиков. Основное отличие состоит в том, что внутренний объем счетчика Гейгера наполнен инертным газом при пониженном давлении (15–75 гПа), а работа осуществляется в режиме самостоятельного газового разряда (область Гейгера). В этих счетчиках эффект первичной единичной ионизации увеличивается во много раз, в результате чего весь чувствительный объем счетчика охватывается разрядом. Коэффициент газового усиления может достигать $10^8 - 10^{10}$. Если вовремя быстро нарастающей вторичной ионизации в счетчик проникает следующая ядерная частица, то она не будет зарегистрирована счетной установкой, поскольку произведенная ее ионизация уже не изменит имеющейся картины. Для обнаружения второй ядерной частицы необходимо «погасить» процесс ионизации от первой, что достигается введением в счетчик небольшого количества гасящего газа. Время, в течение которого счетчик не может зарегистрировать попавшей в него частицы (квант), называют мертвым временем счетчика. Мертвое время газоразрядных счетчиков составляет 10^{-4} с. Время, в продолжение которого счетчик способен регистрировать частицы (кванты) отдельно, характеризует его разрешающую способность. Процентное отношение числа зарегистрированных счетчиком импульсов к общему числу частиц (квантов), попавших за тот же отрезок времени в рабочий объем счетчика, называют эффективностью счетчика. В процессе работы счетчика пары спирта гасящей добавки диссоциируют на более простые радикалы. Это приводит к изменению состава рабочей газовой смеси и ухудшению ее гасящих свойств. Поэтому счетчик со временем выходит из строя.

Счетчики Гейгера–Мюллера применяют для регистрации всех видов излучений, но чаще бета- и гамма-излучений. Конструкция счетчиков определяется теми задачами, которые они призваны решать.

Галогенные счетчики составляют отдельную группу, у которых гасящим компонентом служат галоиды. Добавка незначительного количества (0,1 %) таких двухатомных газов, как Cl_2 , Br_2 , I_2 , к неону или аргону резко снижает начальный потенциал «зажигания» самостоятельного разряда и делает эти счетчики самогасящимися. Низкое рабочее напряжение (300–400 В) позволяет применять эти счетчики для измерений в полевых условиях. Срок службы галогенных счетчиков практически неограничен. Однако эти счетчики имеют существенный недостаток – короткое плато счетной характеристики (80 В) с большим наклоном (12—15 % на 100 В). Это ограничивает применение их для точных измерений радиоактивных образцов [Белов А.Д., 1999].

Полупроводниковые и сцинтилляционные счетчики

Примерно так же регистрируют излучения в полупроводниковом детекторе, но в этом случае поглощение происходит не в газе, а в полупроводниковых материалах.

Проникающее излучение - γ -кванты, разменивая свою энергию с образованием электронов, в газе редко производят ионизацию. Обычно при этом ионов так мало, что зарегистрировать это излучение ионизационным прибором трудно. В этом случае применяют большие и очень плотные детекторы – специальные полупроводниковые или сцинтилляционные. В сцинтилляторах прохождение гамма-квантов вызывает световые вспышки, которые усиливаются и преобразуются в электрические импульсы фотоэлектронным умножителем.

Сцинтилляционные счетчики обладают более высокой эффективностью счета (до 100 %) и разрешающей способностью по сравнению с газоразрядными счетчиками. Разрешающая способность сцинтилляционных счетчиков достигает 10^{-5} с при регистрации альфа-частиц и 10^{-8} с при регистрации бета-частиц и гамма-квантов. По составу сцинтилляторы делятся на неорганические и органические, а по агрегатному состоянию – на твердые, пластические, жидкие и газовые.

Полупроводниковые детекторы представляют собой твердотельную ионизационную камеру, в которой роль носителей электрического заряда выполняют электроны и так называемые дырки. Действие детекторов основано на свойствах полупроводников проводить электрический импульс под действием ионизирующих излучений. Из всех полупроводников наиболее пригодны для детекторов монокристаллы германия и кремния.

Преимущество полупроводниковых детекторов состоит в том, что можно изготавливать такие детекторы очень малых размеров, поскольку толщина рабочего слоя измеряется десятками или сотнями микрон, а полезная площадь может составлять около 1 см^2 . Вместе с тем они имеют и недостатки. Электропроводность таких детекторов изменяется при нагревании, поэтому во время регистрации излучений полупроводник надо охлаждать жидким азотом. Сейчас выращивают кристаллы особо чистого

германия, которые могут храниться и работать при комнатной температуре без ухудшения характеристик.

Для каждого вида излучений подбирается наиболее подходящий детектор. При этом большое значение имеет форма и величина измеряемого образца. Если в нем содержится цезий-137, испускающий гамма-кванты, особых требований к образцу не предъявляется, так как кванты легко проникают вовне из любой его точки. Но β -частицы стронция-90 поглощаются одним-двумя миллиметрами вещества, так что из всего объема измеряемого объекта «работает» лишь тонкий поверхностный слой. Альфа-частицы плутония вообще не могут преодолеть более нескольких микрон, и в этом случае требуется очень тонкий срез, либо необходима специальная предварительная радиохимическая обработка образца (сжигание, растворение, нанесение на подложку). Впрочем, регистрация стронция тоже производится после соответствующих радиохимических процедур.

Из-за малых пробегов частиц стенки детекторов тоже должны быть очень тонкими, чтобы излучение могло попасть в детектирующее вещество и вызвать появление электрического импульса. Активность определяют по излучению, которое сопровождает радиоактивный распад: α -, β -частицы и (или) γ -кванты.

Из радионуклидов чернобыльского выброса, которые в настоящее время представляют наибольшую радиобиологическую опасность, γ -кванты испускают при распаде только изотопы цезия. Их легче регистрировать, и именно цезий контролируется в образцах почвы, воды, продуктах питания, для которых установлены нормы содержания радиоактивности (ВДУ).

5.2 Приборы для измерения ионизирующих излучений

Приборы для измерения ионизирующих излучений можно условно разделить на три группы: радиометры, дозиметры и спектрометры.

Радиометрами называются приборы, с помощью которых проводится проверка на радиоактивность в Бк/кг или Бк/л измеряемого вещества по сопутствующему излучению. Радиометры предназначены для измерения активности радиоактивных веществ, плотности потока ионизирующих излучений, удельной и объемной активности газов, жидкостей, аэрозолей, различных объектов внешней среды, продуктов растительного и животного происхождения, а также удельной поверхностной активности [Люцко А. М. и др., 1996; Белов А. Д., 1999].

Выпускают радиометры различных систем и конструкций. Среди них можно выделить две основные группы: стационарные и переносные.

Стационарные (лабораторные) радиометры. Такие радиометры различаются электрическими и эксплуатационными параметрами, а также конструктивными особенностями. Однако все они имеют сходную блок-схему устройства и состоят из детектора, импульсного усилителя, пересчетного прибора, регистрирующего устройства для визуального определения результатов измерения и источника высокого напряжения для

питания детектора. Питание приборов обеспечивается от сети переменного тока.

Переносные, лабораторные и полевые радиометры. Они имеют малые размеры и автономное (батарейное) или сетевое питание. Приборы этого типа применяют для обнаружения радиоактивных веществ, а также для определения их количества и качества (гамма- или бета-излучение). Вместо пересчетного прибора применено более простое электронное устройство, позволяющее считывать показания по шкале стрелочного показывающего прибора. Некоторые радиометры имеют цифровую, световую и звуковую индикацию излучения, а также пороговую звуковую или световую сигнализацию превышения заданной мощности дозы или пороговой скорости счета импульсов. В качестве детекторов излучения используют газоразрядные и сцинтилляционные счетчики [Белов А.Д., 1999].

При измерении содержания цезия используют полупроводниковый или сцинтилляционный детекторы. Стронций-90 и плутониевые радиоизотопы измеряют после предварительной радиохимической обработки образца радиометрами, в которых применяются безокошечные детекторы, т. е. такие, в которых детектирующее вещество не имеет поглощающих стенок.

В гамма-радиометре детектор вместе с измеряемым объектом помещают в «домик» из свинца, стали или комбинации металлов для защиты от космического излучения и излучений природных изотопов (детектор регистрирует любые кванты, не «разбираясь», откуда они пришли). Важно, чтобы это постороннее излучение – радиоактивный фон – было малым, по сравнению с регистрируемым, иначе падает чувствительность прибора. Таким образом, радиометр – довольно сложный и тяжелый прибор. Чем меньшую активность нужно измерить, тем выше требования к чувствительности радиометра, качеству его детектора и защиты.

Существуют также большие радиометры для измерения радиоактивности, накопившейся в человеческом теле. Они называются счетчиками излучения человека (СИЧ) и имеют много детекторов, «просматривающих» тело со всех сторон. С помощью СИЧ можно измерить содержание гамма-излучающих радионуклидов. Это хороший прибор для определения накопленного цезия, но они совершенно не годятся для измерения бета- или альфа-излучающих изотопов. Правда, за рубежом известны несколько специальных установок, позволяющих оценить прижизненное содержание стронция-90 и даже плутония в органах человека по вторичным проникающим излучениям [Люцко А.М., 1996].

Дозиметры – приборы, тоже измеряющие ионизирующее излучение. В отличие от радиометров ими измеряют не активность, а поглощенную энергию ионизирующего излучения, т. е. дозу и прежде всего экспозиционную. Дозиметры предназначены для измерения экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений, поглощенной дозы излучений, мощности экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений,

мощности поглощенной дозы и интенсивности ионизирующих излучений [Люцко А.М., 1996].

Дозиметры состоят из трех основных частей: детектора, радиотехнической схемы, усиливающей ионизационный ток, и регистрирующего (измерительного) устройства. *Детекторами* излучения в дозиметрах могут быть ионизационные камеры, газоразрядные и сцинтилляционные счетчики и др. Поскольку экспозиционная доза определена для воздуха, в качестве детектора такого дозиметра (рентгенометра) можно, например, использовать воздушную ионизационную камеру, в которой собирается заряд от ионизации γ -квантами за некоторый промежуток времени. При этом показания дозиметра на табло отмечают мощность экспозиционной дозы в виде тока или мкР/с, мкР/час и т. д. Для того чтобы измерить поглощенную дозу в органической ткани, нужны тканеэквивалентные (подобные тканям человеческого тела или животного) детекторы, например, пластмассовые сцинтилляторы. Если применить другие детекторы (ионизационный счетчик, термолюминесцентный или фотолюминесцентный дозиметр, фотографическую пленку), дозиметр необходимо предварительно прокалибровать, причем для каждого вида излучения получаются свои поправочные коэффициенты. Таким образом, для того, чтобы измерить поглощенную дозу в Грехах, необходимо знать, какое излучение (γ -кванты или частицы и какой именно энергии) действует, иначе неизбежны большие ошибки. Вдобавок, данные дозиметры нужно непосредственно разместить в том органе человеческого тела, для которого определяется доза. По этим причинам экспериментально очень трудно измерить поглощенную дозу, особенно для смешанного излучения, в котором одновременно присутствуют, α -, β -частицы и γ -кванты стронция, цезия и плутония. Регистрирующим устройством может быть микроамперметр или устройство для цифровой, световой, звуковой индикации результатов измерений. Все дозиметры делят на стационарные, переносные, носимые (полевые) и индивидуальные. Принятая классификация дозиметрических приборов на группы не является строгой. Она отражает лишь основное назначение каждого прибора, но не исключает возможности использования его для решения дополнительных задач.

Стационарные дозиметры. Их используют для контроля величины дозы и мощности дозы излучения в определенных (технологически и тактически обоснованных) точках радиологических лабораторий, технологических установок, участков или объектов местности. Дозиметры подобного типа незаменимы для контроля дозы и мощности дозы излучения, получаемой объектом, подвергающимся специальному облучению, при использовании специальной технологии в сельском хозяйстве, контроле уровня радиации в хранилищах, очистных сооружениях, при лучевой терапии, для контроля радиационной обстановки в помещениях атомных электростанций, в радиохимическом производстве, в лабораториях, санпропускниках и др.

Переносные дозиметры. Их применяют для измерения дозы и мощности дозы излучения в производственных и лабораторных помещениях, где по условиям работы не требуется проводить постоянный дозиметрический контроль, а осуществляют лишь периодический контроль. К этому типу приборов можно отнести дозиметры ДРГЗ-02, ДРГЗ-03, предназначенные для измерения мощности экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений от 0,01 до 100 и от 0,1 до 1000 мкР/с, ДРГЗ-04 – от 0,1 до 3000 мкР/с. Они имеют сетевое и автономное питание.

Дозиметр-радиометр бытовой ИРД-02Б применяют для индивидуального контроля радиационной обстановки на местности, в жилых и рабочих помещениях по уровню гамма-излучения, а также для оценки плотности потока бета-излучения от загрязненных поверхностей и измерения удельной активности проб воды, почвы, продуктов питания и т. д. Дозиметры полезно иметь в загрязненной зоне для того, чтобы контролировать уровень гамма-фона и избегать сильно загрязненных цезием участков [Белов А.Д., 1999; Люцко А.М. и др., 1996].

Полевые дозиметры представляют собой большую группу приборов, которые широко применяют для обнаружения радиоактивных веществ, а также для определения их количества и качества по уровню гамма-излучения. Они характеризуются малыми габаритами и имеют автономное питание. Показания (в мР/ч или мкР/ч) считывают по шкале стрелочного прибора; некоторые приборы имеют световую и звуковую индикацию излучений, а также пороговую звуковую или световую сигнализацию превышения заданной мощности дозы. В качестве детекторов излучения используют газоразрядные и сцинтилляционные счетчики.

Спектрометры предназначены для измерения распределения излучений по энергии, заряду и массам, а также пространственно-временных распределений излучений. Спектрометры (гамма-спектрометрические установки) состоят из следующих элементов: детектора, который служит для преобразования энергии гамма-квантов в электрический импульс; предусилителя, усиливающего сигнал; блока питания детектора и предусилителя; спектрометрического усилителя, формирующего сигнал нужной формы и защищающего последующие устройства от шумов малой амплитуды, отсекая их специальным дискриминатором; аналого-цифрового преобразователя (АЦП), измеряющего амплитуду каждого импульса и накапливающего информацию о них в памяти; монитора (осциллограф или экран компьютера), который служит для визуализации гистограмм поступивших импульсов.

5.3 Основные методы измерения радиоактивности

Радиоактивность препаратов можно определить абсолютным, расчетным и относительным (сравнительным) методами. Наиболее широко практически применяют последний. Для анализа проб объектов

ветеринарного надзора, имеющих сложный радионуклидный состав, используют спектрометрические методы измерения радиоактивности.

Абсолютный метод. Метод основан на использовании прямого счета полного числа частиц распадающихся ядер в условиях 4π -геометрии (полного телесного угла). В этом случае радиоактивность препаратов выражается не в импульсах в минуту, а в единицах активности (Ки, мКи, мкКи). Для этих целей используют 4π -счетчики, конструкция которых позволяет поместить образец препарата внутрь счетчика (газопоточный счетчик типа СА-4БФЛ, сцинтилляционный счетчик с растворением пробы в жидком сцинтилляторе или помещением пробы внутрь него и др.).

Расчетный метод. Это метод определения абсолютной активности альфа- и бета-излучающих изотопов, который заключается в том, что измерение осуществляют при помощи обычных газоразрядных или сцинтилляционных счетчиков.

Чтобы сопоставить скорость счета, выраженную в импульсах в минуту, с активностью в единицах кюри, вводят в результаты измерения ряд поправочных коэффициентов, учитывающих потери излучения при радиометрии.

Относительный (сравнительный) метод. Этот метод основан на сравнении активности исследуемого препарата с активностью стандартного препарата (эталоны), содержащего известное количество изотопа. Преимущество относительных измерений в их простоте, оперативности и удовлетворительной достоверности.

Благодаря этому относительный метод широко применяют в практической радиометрии и в научных исследованиях с использованием радиоактивных изотопов.

Для правильного проведения измерений относительной активности исследуемых препаратов необходимо, чтобы схема распада, вид и энергия излучения эталона существенно не отличались от исследуемого радионуклида. Идеальным эталоном был бы радиоизотоп, одноименный с изотопом, содержащимся в измеряемом препарате.

Желательно иметь в качестве эталона долгоживущий радиоактивный изотоп, так как его можно использовать длительное время без внесения поправок на распад. При определении суммарной бета-активности в объектах ветнадзора в качестве эталона применяют ^{40}K , ^{90}Sr , ^{90}Y и др.

Эталон и исследуемые препараты должны иметь одинаковую форму, площадь и толщину активного слоя; их одинаково располагают относительно счетчика. Подложки, на которые нанесены измеряемые препараты и эталон, должны быть выполнены из одинакового материала и иметь одинаковую толщину. Все измерения надо проводить на одной установке с одним и тем же счетчиком. Следует стремиться к тому, чтобы измерения активности всех препаратов были выполнены с одинаковой статистической точностью.

Измерив скорость счета частиц $N_э$, от эталона и препарата $N_{пр}$, рассчитывают активность препарата $A_{пр}$ в беккерелях или в кюри по формуле: $A_{пр} = A_э \cdot N_{пр} / N_э$.

Спектрометрические методы. Их применяют для анализа проб без предварительного выделения радионуклидов. Измеряя энергию и интенсивность ионизирующего излучения, можно идентифицировать радионуклиды в анализируемых препаратах и достаточно точно определить их абсолютную активность. Для решения этих задач применяют спектрометры.

Спектрометр состоит из детектора и регистрирующей аппаратуры, которая выполняет функции измерения энергии и числа частиц, или квантов. В качестве детектора излучения в спектрометрах используют ионизационные камеры, сцинтилляционные и полупроводниковые счетчики.

Альфа-, бета- и гамма-спектрометрические методы.

Альфа-спектрометрический метод используют для изучения изотопного состава естественных радиоактивных элементов, и в первую очередь U, Th, Ra. Он основан на регистрации спектра альфа-частиц после приготовления тонкослойных препаратов. В альфа-спектрометрах широко применяют кремниевые полупроводниковые детекторы.

Бета-спектрометрические методы можно использовать при изучении обмена веществ в организме животных для анализа проб, содержащих два радионуклида (или более), различающихся по энергии бета-излучения минимум в четыре раза. При анализе проб объектов ветеринарного надзора бета-спектрометрические методы не используют из-за сложности такого анализа.

Гамма-спектрометрические методы наиболее широко распространены в ветеринарной практике. В качестве детекторов излучения в гамма-спектрометрах используют сцинтилляционные и полупроводниковые счетчики [Белов А.Д., 1999].

5.4 Радиационно-экологическое районирование комплексом геофизических методов

Для оценки интенсивности влияния природных, техногенных и аварийных радиационных факторов на среду обитания и деятельности человека проводится радиационно-экологическое районирование природных и природно-техногенных комплексов на различных уровнях.

Задачами районирования являются выделение площадей и объектов с неблагоприятной и весьма неблагоприятной радиационно-экологической обстановкой, выяснение тенденции ее изменчивости во времени, определение объектов радиационного мониторинга, а также разработка предупредительных или защитных мер от негативных радиационных факторов.

Комплекс геофизических методов на различных уровнях решает свои конкретные задачи. При региональном районировании предпочтение

отдается дистанционным аэрогамма-спектрометрическим съемкам с определением в поверхностном слое почво-грунтов или горных пород концентрации (удельной активности) урана (по радию), тория, калия-40 и искусственного изотопа цезия-137. На площадях с повышенными концентрациями перечисленных радиоэлементов проводится их увязка с типом почв, грунтов или подстилающих горных пород методами пешеходной гамма-спектрометрии, шпуровой и эманационной съемок. Одновременно ведется анализ радиационного воздействия на природные комплексы преобладающих в регионе техногенных систем и объектов. На этом же уровне намечаются площади и крупные техногенные объекты с неблагоприятной обстановкой для последующего радиационно-экологического мониторинга.

При территориальном районировании дополнительно в комплекс вовлекаются лабораторные радиометрические, гамма-спектрометрические и другие физические методы по количественному определению тех или иных радионуклидов в пробах почв, грунтов, горных пород, поверхностных и подземных вод, продукции и отходов техногенных систем и объектов, связанных с добычей и переработкой полезных ископаемых, включая радиоактивные руды, строительные материалы, энергетическое сырье, промышленные, питьевые, минеральные и термальные воды и т. д.

На территориальном уровне предпочтение отдается исследованиям площадей и объектов, выделенных на региональном уровне с неблагоприятной и весьма неблагоприятной радиационно-экологической обстановкой.

При районировании городов и районов проводится комплекс площадных радиометрических и дозиметрических методов с определением природного и техногенного гамма-фона, концентрации радона в почвенном воздухе, увязкой их между собой и с уровнями эквивалентной равновесной объемной активности радона в атмосфере жилых и производственных помещений. В первую очередь изучаются площади и объекты с негативной радиационной обстановкой, выделенные на региональном и территориальном уровнях [Никифоров Ю.А., 2000].

6. Естественные источники ионизирующих излучений и радионуклидов

К радионуклидам естественного (или природного) происхождения относят те, которые образовались на Земле без участия в этом человека. Различают две группы естественных источников радиации: *космогенные источники и первичные радионуклиды земной коры*. Первичные радионуклиды содержатся в естественной форме и концентрации во всех объектах биосферы: почве, воде, воздухе, минералах, живых организмах и т. д. Ионизирующие излучения, исходящие от природных источников, называют природным радиационным фоном.

6.1. Космогенные источники

Космическое излучение условно можно разделить на две части:

а) первичное космическое излучение – заряженные частицы высокой энергии, приходящие из межзвездного пространства и из солнечной галактики, а также коротковолновое электромагнитное излучение;

б) вторичное космическое излучение – ионизирующее излучение, образующееся в земной атмосфере в результате взаимодействия первичного космического излучения с атомами воздуха. Наиболее распространенными продуктами космогенной активации являются: ^3H , $^7,^{10}\text{Be}$, ^{14}C , ^{22}Na , ^{32}Si , $^{32,^{33}}\text{P}$, ^{35}S , $^{36,^{39}}\text{Cl}$.

в) радиоактивные изотопы, попадающие на поверхность Земли и в ее атмосферу из космического пространства вместе с космической пылью и метеоритными частицами [Симак С.В. и др., 1998].

Первичное космическое излучение:

Галактическое излучение образуется вследствие извержения и испарения материи с поверхности звезд и туманностей космического пространства. Оно состоит по большей части из заряженных частиц – это протоны высоких энергий (79–87 %), атомные ядра (от водорода и гелия до более тяжелых ядер лития, бериллия, бора, углерода, азота, кислорода и др.) и позитроны. Небольшой процент составляют электроны и гамма-лучи. Большинство заряженных частиц обладает очень высокой энергией – в интервале 3–15 ГэВ, а некоторые 10^{17} – 10^{18} эВ. Такие большие энергии первичные космические частицы приобретают в результате ускорения их в переменных электромагнитных полях звезд, многократного ускорения в магнитных полях облаков космической пыли межзвездного пространства и в расширяющихся оболочках новых и сверхновых звезд [Белов А.Д. и др., 1999].

Солнечный ветер. Солнце выбрасывает большое количество заряженных частиц, из которых образуется бесконечный поток, который направляется к самым окраинным зонам Солнечной системы. Такие потоки частиц получили название «Солнечный ветер».

Рядом с Землей у солнечного ветра скорость составляет приблизительно 400 км/с, а плотность – 10 частиц на 1 см^3 (в миллиард миллиардов раз ниже, чем плотность земной атмосферы).

Солнечный ветер состоит, главным образом, из электромагнитного излучения (вплоть до рентгеновского диапазона), протонов и электронов, но в нем присутствуют также ядра гелия и других элементов [Рандзини Д., 2004].

Однако лишь немногие частицы достигают поверхности Земли, т. к. они взаимодействуют с атомами воздуха, рождая потоки частиц вторичного космического излучения. Поэтому основную массу космических лучей, достигающих поверхности Земли, составляет вторичное космическое излучение [Белов А.Д. и др., 1999].

Вторичное космическое излучение очень сложно и состоит из всех известных в настоящее время элементарных частиц и излучений. Основную массу их составляют π^\pm -мезоны (тяжелый аналог электрона $m = 200 m_e$), π^\pm -мезоны (70 %), электроны и позитроны (26 %), первичные протоны (0,05 %), гамма-кванты, быстрые и сверхбыстрые нейтроны. На пути к земной поверхности поглощается и это вторичное излучение. До Земли оно почти не доходит. При бомбардировке верхних слоев атмосферы (примерно на высоте 15–20 км от поверхности Земли) космическими излучениями различной природы образуются атомы других элементов, порой радиоактивных [Белов А.Д. и др., 1999]. Таким путем образуются тяжелый изотоп водорода–третий и радиоактивный углерод-14. Распадаясь, эти изотопы испускают β -частицы, причем период полураспада у трития 12,3 года, а у радиоуглерода – 5730 лет. В воздушном пространстве оба радиоизотопа возникают и распадаются непрерывно, так что в природе всегда имеется некоторый определенный «запас» трития и радиоуглерода. Равномерно перемешиваясь с обычным углеродом и водородом, тритий и радиоуглерод попадают в воду, их потребляют растения и животные. Таким образом, все живые существа содержат немного радиоактивных изотопов, образованных космическим излучением [Люцко А.М. и др., 1996].

Продукция таких изотопов максимальна в верхних слоях атмосферы в высоких широтах, т. е. там, где существует наибольший поток частиц космических лучей.

Интенсивность космического излучения зависит от ряда факторов:

- интенсивности потока галактического излучения;
- активности солнца;
- географической широты;
- высоты над уровнем моря [Белоус Д.А., 2004].

Полярное сияние. Свечение полярного сияния происходит из-за исторгнутых Солнцем заряженных частиц: электронов, протонов, альфа-частиц, которые взаимодействуют с земным магнитным полем и между собой. Частицы, устремляющиеся к Земле, отклоняются ее магнитным полем и ионизируют атомы атмосферы. Очень высокая энергия заряженных частиц приводит к тому, что при их столкновении с нейтральными атомами атмосферы из них выбиваются один и больше электронов. При соединении ионов кислорода с электронами у полярного сияния появляется зеленоватая окраска; когда замена электронов происходит в молекуле азота, оно бывает красным. Полярные сияния происходят на высоте не менее 100 или выше 400 км и наблюдать их можно главным образом в высоких широтах, то есть, в полярных областях. Причина этого в том, что именно туда частицы отклоняются южным магнитным полем. Во время полярного сияния в ионосфере (слой атмосферы на высоте 50-500 км) происходят различные явления: пульсация магнитного поля Земли, выбросы рентгеновских лучей и образование электрических потоков. Более того, энергия, выделяемая

полярным сиянием в невидимой части области электромагнитного спектра, значительно больше, чем в его видимой части.

Космический фон практически постоянен и зависит лишь от высоты местности (табл. 6.1). В нижней атмосфере интенсивность космического излучения с высотой удваивается примерно каждые 1,5 км [Люцко А.М. и др., 1996]. По мере увеличения высоты увеличивается интенсивность космического излучения. Так, на уровне моря средняя поглощенная доза этого излучения составляет 320 мкГр/год (0,03–0,04 Р/ч или $1,15 \cdot 10^{-11}$ Гр/с), на высоте 2 км – в 3–4 раза, а на высоте 3 км – в 5–6 раз выше [Симак С.В. и др., 1998].

Таблица 6.1

Зависимость космического фона от высоты над уровнем моря

Высота, км	Мощность дозы, мкЗв/ч	Среднегодовая доза, мЗв
0	0,035	0,3
4	0,2	1,75
8,848 (Эверест)	1,0	8
10	2,9	-
20	12,7	-

Таким образом, жители высокогорья, чабаны, пасущие скот, облучаются сильнее, чем жители равнин и морских побережий. Еще сильнее космические лучи действуют на пассажиров самолета, поднимающегося на высоту 10–12 км (облучение из космоса превышает естественный уровень более чем в сто раз). Правда в полете человек проводит немного времени, и общая полученная им доза незначительна. Большую опасность космическое излучение представляет для экипажей воздушных судов, и особенно для космонавтов, так как последние лишены защиты воздушно оболочки, а через тонкие стенки аппарата-спутника частицы высокой энергии проникают без труда [Люцко А.М. и др., 1996].

6.2. Природные радиоактивные вещества

Их условно можно разделить на три группы. **В первую группу** входят нуклиды радиоактивных семейств (рядов) ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th с продуктами их распада. **Ко второй группе** относятся радиоизотопы, находящиеся в земной коре и объектах внешней среды с момента образования Земли: ^{40}K , ^{87}Rb , ^{48}Ca , ^{96}Zn , ^{130}Te , ^{129}I и др. **К третьей группе** принадлежат радиоактивные изотопы ^{14}C , ^3H , ^7Be , ^{10}Be , образующиеся непрерывно под действием космического излучения [Белов А.Д. и др., Радиобиология. 1999].

В процессе формирования Земли в состав ее коры, наряду со стабильными нуклидами, вошли и радионуклиды. Большая часть этих радионуклидов относится к так называемым **радиоактивным семействам (рядам)**. Каждый ряд представляет собой цепочку последовательных

превращений, когда ядро, образующееся при распаде материнского ядра, тоже, в свою очередь, распадается, вновь порождая неустойчивое ядро и т. д. Началом такой цепочки является радионуклид, который не образуется из другого радионуклида, а содержится в земной коре и биосфере с момента их рождения. Этот радионуклид называют **родоначальником** и его именем называют все семейство (ряд). Всего в природе существует три родоначальника – уран-235, уран-238 и торий: 232, и соответственно три радиоактивных ряда – два урановых и ториевый. Заканчиваются все ряды стабильными изотопами свинца. Радиоактивный ряд включает как долгоживущие радионуклиды (то есть радионуклиды с большим периодом полураспада), так и короткоживущие, но в природе существуют все радионуклиды ряда, даже те, которые быстро распадаются. Это связано с тем, что с течением времени установилось равновесие («вековое равновесие») – скорость распада каждого радионуклида равна скорости его образования [Белоус Д.А., 2004].

Существуют радионуклиды, которые вошли в состав земной коры в процессе формирования планеты и которые не принадлежат урановым и ториевому рядам. В природе концентрация естественных радионуклидов варьирует в широких пределах. Больше всего в окружающей среде ^{87}Rb и ^{40}K . Радиоактивность ^{40}K в земной коре превышает радиоактивность суммы всех других естественных радиоактивных элементов за счет жесткого бета- и гамма-излучений. Радиоактивный калий составляет около 0,012 % всего природного калия или 2,5 % от всех природных радионуклидов земной коры. Больше всего ^{40}K содержится в ископаемых калийных солях. Радиоактивный калий является основным радионуклидом, создающим природную активность кормов и сельскохозяйственной продукции в большинстве геохимических провинций Земли [Анненков Б.Н. и др., 1991].

Земная кора и почва

Поскольку радионуклиды образуют в природе определенные соединения и в соответствии со своими химическими свойствами входят в состав определенных минералов, то распределение естественных радионуклидов в земной коре неравномерно. Весьма существенные различия в концентрации радионуклидов отмечаются в почвах разных типов. Глинистые почвы почти везде богаче радиоактивными элементами, чем песчаники и известняки за счет процессов сорбции. Чернозем занимает промежуточное место [Симаков С.В. и др., 1998; Белов А.Д. и др., 1999; Анненков Б.Н. и др., 1991].

Радиоактивные тяжелые элементы (U, Th, Ra) содержатся преимущественно в горных гранитных породах. В разных районах земного шара доза гамма-излучения разных земных пород у поверхности Земли колеблется в широких пределах – 0,26–11,5 мГр/год. Однако имеются районы (например, бразильский курорт Гуарапари; штат Керала к Индии – моноцитовые пески; Китай, Гуандон), где вследствие выхода на поверхность Земли радиоактивных руд и пород, а также значительной примеси в почве

урана и радия доза природного фона составляет 0,12–0,7 Гр/год, что в 100–500 раз выше среднемирового фона [Белов А.Д. и др., 1999].

Природные воды

Естественные радионуклиды обнаруживаются во всех типах природных вод. Радиоактивность воде придают в основном уран, торий и радий, образующие растворимые комплексные соединения, которые вымываются почвенными водами, а также газообразные продукты их радиоактивных превращений (^{222}Rn и ^{220}Th). Концентрация радиоактивных элементов в реках меньше, чем в морях и озерах, а содержание их в пресноводных источниках зависит от типа горных пород, климатических факторов, рельефа местности и т. д. Концентрация урана, радия и тория особенно высока в подземных водах. В южных реках с высокой степенью минерализации содержание урана обычно выше, чем в северных реках с относительно низкой минерализацией. Из долгоживущих естественных радионуклидов в природных водах больше всего ^{40}K – до 330 пКи/л (в морской воде). Концентрация радионуклидов в дождевой воде невелика, исключение составляет ^3H и ^7Be , концентрация которых может достигать десятков пКи/л [Анненков Б.Н. и др., 1991; Белов А.Д. и др., 1999].

Радиоактивность атмосферы обусловлена наличием в ней радиоактивных веществ в газообразном состоянии (^{222}Rn и ^{220}Th (торон), ^{14}C , ^3H) или в виде аэрозолей (^{40}K , уран, радий и др.) [Белов А.Д. и др. Радиобиология 1999]. Радионуклиды поступают в атмосферу различными путями. Некоторое количество радионуклидов попадает в воздух в результате выветривания земных пород и разложения органических веществ. Определенная доля радиоактивности атмосферы обусловлена наличием в воздухе космогенных радионуклидов. Существенное значение имеет диффузия из почвы в приземные слои атмосферы радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Th), являющихся продуктами радиоактивного распада соответственно ^{226}Ra и ^{224}Ra [Анненков Б.Н. и др., 1991].

Радиоактивность атмосферного воздуха варьирует в широких пределах – $7,4 \cdot 10^{-4}$ – $16,3 \cdot 10^{-3}$ Бк/л ($2 \cdot 10^{-14}$ – $4,4 \cdot 10^{-13}$ Ки/л) и зависит от местоположения (в атмосферном воздухе над сушей концентрация радионуклидов выше, чем над океаном), содержания радионуклидов в материнских земных породах, времени года, состояния атмосферы и т. д. [Белов А.Д. и др., 1999; Анненков Б.Н. и др., 1991].

Во флоре и фауне концентрация естественных радионуклидов обычно не велика, так как большинство из них не являются биогенами и плохо усваиваются растительностью и животными. Исключение составляют ^{40}K , ^{14}C , ^3H , ^{18}O и ^{22}Na , которые усваиваются растениями и животными весьма интенсивно [Анненков Б.Н. и др., 1991; Симак С.В. и др., 1998].

Таким образом, растения и животные подвергаются воздействию внешних источников природного радиационного фона – космическая радиация и излучения естественных радионуклидов, рассеянных в почве, воде, воздухе, строительных и других материалах, а также внутренних

источников природной радиации, содержащихся в самом организме и поступающих в него с пищей, водой и воздухом.

Природный радиационный фон является одним из экологических факторов, для всех живых организмов Земли. Действие его непрерывно и отличается широкой вариабельностью. В ходе многих экспериментов было доказано, что наличие природного радиационного фона необходимо для нормального роста и развития всего живого на Земле. Кроме того, природный радиационный фон является одним из поставщиков материала для естественного отбора (мутации) и одним из факторов видообразования.

Естественный радиационный фон в разных местах земного шара разный. Это связано с тем, что с высотой над уровнем моря фон увеличивается за счет космического излучения, в местах выхода на поверхность гранитов или богатых торием песков радиационный фон также выше. Природные радионуклиды имеют способность избирательно накапливаться в определенных видах растений, животных, рыб. Это приводит к более высокому содержанию какого-либо из радионуклидов в определенном продукте питания по сравнению с другими. В результате жители, потребляющие в соответствии с традициями национальной кухни данный продукт в больших количествах, получают и большие дозы внутреннего облучения. Это превышение может достигать десятков раз по отношению к среднестатистическому, но это естественно. Поэтому можно говорить лишь о среднем естественном радиационном фоне для данной местности, территории, страны и т. д.

Среднее значение эффективной дозы, получаемое жителями нашей планеты от природных источников за год, составляет 2,4 мЗв.

Примерно 1/3 этой дозы формируется за счет внешнего излучения (примерно поровну от космического излучения и от радионуклидов земной коры). 2/3 обусловлены внутренним облучением [Белоус Д.А., 2004]. Суммарная доза, получаемая от природного радиационного фона людьми, колеблется в разных точках земной поверхности от 1 до 110 Зв/год на человека [Симак С.В. и др., 1998; Белов А.Д. и др., 1999; Анненков Б.Н. и др., 1991].

Неравномерность природного радиационного фона на нашей планете обусловлена:

- различием в концентрации природных радионуклидов в различных участках земной коры, на ее поверхности;
- высотой местности над уровнем моря, географической широтой, вариабельностью космического излучения;
- преимущественным потреблением определенных продуктов питания.

7. Антропогенные источники ионизирующих излучений и радионуклидов

С деятельностью человека связано появление во внешней среде искусственных радионуклидов. В результате технологических процессов

естественный радиационный фон в окружающей среде может быть изменен, так как вследствие антропогенного влияния происходит перераспределение естественных радионуклидов в биосфере и увеличивается интенсивность вовлечения их в биологический и технологический круговорот веществ в природе. Повышение естественного радиационного фона может быть связана с поступлением естественных радиоактивных веществ во внешнюю среду в результате испытаний ядерного и термоядерного оружия (особенно, если они проводятся на поверхности земной коры, в воздухе и воде), в качестве радиоактивных отходов промышленных и энергетических реакторов и в результате аварийных ситуаций на этих установках. Определенное количество радиоактивных материалов поступает в окружающую среду в процессе работы неядерной промышленности (нефте- и газодобывающие и перерабатывающие предприятия, ТЭЦ).

7.1. Технологически повышенный естественный радиационный фон

Для оценки изменения естественного радиационного фона под влиянием хозяйственной деятельности человека в 1975 г. было введено понятие *техногенно повышенный естественный радиационный фон* (ТПЕРФ), под которым понимается изменение облучения от истинно естественных источников и облучение в результате техногенной деятельности человека. Основными источниками ТПЕРФ являются: уголь, сжигаемый на электростанциях, используемый в хозяйственной деятельности природный и сжиженный газ, строительные материалы, минеральные удобрения в сельском хозяйстве, воды с повышенным содержанием естественных радионуклидов, пассажирские полеты на больших высотах.

Уголь. Все угли содержат радионуклиды урановых и ториевого рядов распада. В зависимости от зональности месторождения в 1 кг угля содержится от 1 до 70 Бк ^{40}K , от 3 до 500 Бк ^{238}U , от 3 до 300 Бк ^{232}Th . Концентрация ^{222}Rn в угле может достигать до 20 Бк/кг, а ^{226}Ra - 370 кБк/кг. Электростанции, работающие на угле, выделяют в атмосферу сравнимое с АЭС количество биологически значимых долгоживущих радионуклидов. В результате сжигания угля нелетучие компоненты остаются в золе. Если принять, что ЭС мощностью 1000 МВт ежегодно потребляют 2,3 млн т угля, то она выделяет около $7,4 \cdot 10^{10}$ Бк изотопов радия. При хорошей очистке выбросов (99,5 %) при сжигании угля в атмосферу выделяется $37 \cdot 10^7$ Бк смеси радиоактивных изотопов (сюда же входят и ^{210}Po и ^{210}Pb). Однако не все электростанции достигают такой высокой степени очистки выбросов от летучей золы. Для Великобритании этот показатель составляет в среднем 99,3 %, для различных районов Северной Америки - редко достигает 97,5 %. Проектная эффективность очистки на современных ТЭС России составляет 98,5 %. Однако большая часть стран существенно уступает современным европейским и американским стандартам [Уорнер Ф. и др., 1999; Белоус Д.А., 2004].

Нефть и природный газ. Главный источник радиоактивности нефтяных и газовых залежей – урановые ряды (продукты распада урана-238 и урана-235). Главными радиоактивными загрязнителями нефти являются ^{226}Ra ($T=1620$ лет), ^{210}Pb ($T=22,3$ года) и ^{210}Po ($T=138$ дней). Они также отлагаются в заводском оборудовании и трубопроводах, образуясь из радона, поступающего вместе с природным газом из-подземных залежей [Уорнер Ф. и др., 1999]. Нефть и газ поступают из пробуренных скважин в начале эксплуатации сухими, но затем к их потоку начинает примешиваться вода, содержащая много растворенных солей. Эти соли образуют осадки на стенках труб. В них могут содержаться радий и его дочерние продукты.

На большинстве освоенных месторождений выполняют технологические операции, связанные с радиоактивностью осадков, которая может изменяться от <1 до >15000 Бк на грамм. Сюда входят физические наблюдения за безопасностью для здоровья, необходимые ремонтные работы и захоронение радиоактивных отходов. Основным способом захоронения – это затопление в море.

Природный газ. При сжигании природного газа во внешнюю среду выделяется ^{222}Rn . Особое значение имеет сжигание газа в жилище человека. В условиях плохой вентиляции, выделяющийся из природного газа радон дает большой вклад в количество этого радионуклида, присутствующего в помещении. Среднее поступление радона в помещение примерно $370 - 555$ Бк/сутки. Вклад радона, связанный со сжиганием природного газа, в дозу не велик по сравнению с вкладом радона, выделяющегося из стройматериалов.

Сжиженный газ. При термическом фракционировании природного газа для выделения фракции тяжелых углеводородов, радон концентрируется в пропановой и этановой фракциях, что приводит к 8-кратному увеличению содержания радона в сжиженном газе. Так как сжиженный газ перед использованием хранится, в результате чего часть радона распадается ($T=3,823$ суток), в радиационно-гигиеническом отношении сжиженный газ не отличается от природного.

Из сопоставления техногенной эмиссии естественных радионуклидов в атмосферу следует, что поступление радона из нефтяных и газовых скважин значительно превосходит соответствующую величину при сжигании угля. С другой стороны, важно помнить, что если ^{226}Ra и ^{210}Pb от сжигания углей – это доля, которая поступает в атмосферу, то почти весь Ra и Pb от добычи нефти и газа сбрасывается в море.

Строительные материалы. Так как земные породы используют в качестве строительного материала, то от последнего зависит радиационный фон внутри здания. Содержание радионуклидов в строительных материалах может быть связано как с повышенной естественной концентрацией (например, в граните), так и с использованием побочных продуктов (отходов) других производств, где произошло концентрирование природных радионуклидов (например, угольный шлак). Основным вклад вносит радон-222 (продукт распада радия-226). Так в деревянных домах и сооружениях

концентрация радона в норме составляет $1,5 \cdot 10^{-2}$ Бк/л воздуха, кирпичных - 4,0; бетонных 11,6. При плохой вентиляции концентрация радона может значительно возрастать (до 100 раз), создавая повышенное облучение человека. Такая ситуация характерна в большей степени для подвалов и первых этажей зданий, где удельная активность радона может составлять величину порядка 1 - 10 кБк/м³ [Симак С.В. и др., 1998; Белоус Д.А., 2004].

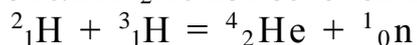
Сельскохозяйственные удобрения. Важным источником повышения естественного радиационного фона являются минеральные удобрения (суперфосфаты, фосфориты, калийные). Они содержат радионуклиды ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²³²Th, ²¹⁰Po, ²¹⁰Pb и ⁴⁰K в количестве от нескольких мБк/г до нескольких Бк/г. Внесение этих удобрений на поля в агрохимически обоснованном количестве может поднять мощность дозы излучения в месте внесения удобрений примерно на 0,5 мкР/ч. Водный сток удобрений в реки и озера повышает концентрацию радия в воде.

Следует помнить, что технологически увеличенная природная радиоактивность на порядок меньше, чем глобальная естественная эмиссия. Однако в локальном масштабе рукотворные источники могут оказаться доминирующими.

7.2. Загрязнение окружающей среды радионуклидами в результате испытания атомного и ядерного оружия

Впервые проблема антропогенных радионуклидов в биосфере появилась в середине сороковых годов, с началом эры испытаний и применения атомного, а позднее и ядерного оружия.

Действие **атомной бомбы** основано на реакции деления ядер урана-235 или плутона-239 (которые получают при облучении урана-238 медленными нейтронами). Ядерное или водородное оружие использует другой принцип: синтез гелия ⁴He из изотопов водорода дейтерия ²H и трития ³H.



Эта реакция идет при температуре несколько десятков миллионов градусов и огромном давлении. Такие условия достигаются при взрыве обычного атомного заряда [Симак С.В. и др., 1998]. При термоядерных взрывах в момент реакции синтеза возникает интенсивный поток нейтронов, вызывающий образование значительного количества продуктов активации (наведенной радиоактивности), в частности ³H, бериллия, ¹⁴C.

В результате взрывов образуется около 80 осколков деления – радиоактивных изотопов различных элементов. Каждый осколок обычно претерпевает еще несколько превращений до того, как превратится в стабильный нуклид. При этом испускаются β-частицы и γ-кванты. Большинство образующихся при этом радионуклидов короткоживущие.

Помимо осколков деления, при взрыве рассеивается часть атомной начинки (²³⁵U или ²³⁹Pu) – до 70 – 80 % от ее исходного количества.

С увеличением возраста продуктов деления их общая активность быстро уменьшается. Из закона радиоактивного распада смеси осколков

деления выявлено правило: **каждое десятикратное снижение активности осколков и мощности дозы гамма-излучения происходит в результате увеличения их возраста в 7 раз.** Уже через сутки после взрыва радиоактивность падает более чем в 3000 раз [Симак С.В. и др., 1998].

Из большого числа ядерных осколков и их дочерних продуктов интерес для радиобиологии по своим радиотоксикологическим и физическим характеристикам (величина выхода продукта при делении, период полураспада, вид и качество излучения) представляют лишь 10 радионуклидов: $^{89,90}\text{Sr}$, ^{95}Zn , ^{95}Nb , $^{103, 106}\text{Ru}$, ^{131}I , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{144}Ce . Из них только два ($^{103, 106}\text{Ru}$) относятся к непосредственным осколкам деления, а остальные восемь представляют собой продукт второго – четвертого актов бета-распада ядер-осколков. В первые месяцы после ядерного взрыва основную опасность в смеси осколков деления представляют ^{131}I , ^{140}Ba и ^{89}Sr , а в последующем ^{90}Sr и ^{137}Cs .

Загрязнение местности зависит от характера ядерного взрыва (наземный, воздушный и т. д.), калибра ядерного устройства, атмосферных условий (скорость ветра, влажность, выпадение осколков, распределение температуры по высоте, которое влияет на перемещение масс воздуха), географических зон и широт и др. Тип и «начинка» ядерных зарядов заметно влияют на характер возникающей радиоактивности.

Наземные взрывы создают сильное загрязнение радиоактивными продуктами деления непосредственно в районе взрыва, а также на прилегающей территории, над которой проходило радиоактивное облако.

При **воздушном взрыве** не происходит значительного локального загрязнения местности радиоактивными продуктами деления, так как они распыляются на очень большой площади. Однако под влиянием атмосферных осадков, выпавших в момент прохождения радиоактивного облака, может повыситься степень загрязнения в том или ином районе.

Средние и малые взрывы до нескольких килотонн тротилового эквивалента загрязняют в основном тропосферу (до высоты 18 км). **Крупные взрывы** в несколько мегатонн загрязняют главным образом стратосферу (до высоты 80 км). Благодаря наличию воздушных течений частицы радиоактивных продуктов деления способны совершать очень большой путь, вплоть до нескольких оборотов вокруг земного шара, поэтому радиоактивное загрязнение может возникнуть в любой точке земного шара, т. е. носить характер глобального загрязнения [Белов А. Д., 1999].

При взрывах почти во всех случаях опасность от выпадения продуктов ядерного деления преобладает над радиационной опасностью, связанной с нейтронной активацией.

Облучение людей продуктами ядерных взрывов происходит извне и с поступающими в организм по пищевым цепям радиоактивными веществами. Испытания на Новой Земле чрезвычайно загрязнили приполярные тундры. Оленеводы Крайнего Севера получили дозы облучения в 100 – 1000 раз более высокие, чем остальное население, так как основной их продукт

питания – оленина имела очень высокую концентрацию радиоактивности из-за накопления ягелем цезия и стронция.

Вследствие запрещения испытательных взрывов в трех средах началось постепенное снижение вызванного ими радиационного фона. В 1963 г. соответствующая среднегодовая коллективная доза составила примерно 7 % от дозы естественного облучения, в начале 80-х годов – около 1 %. Рассчитанные средние индивидуальные дозы, полученные жителями Земли в результате испытаний в мЗв, приведены в таблице 7.1 [Люцко А.М. и др., 1996].

Таблица 7.1

Средние индивидуальные дозы, полученные жителями Земли, в результате испытаний в мЗв (Антонов В.П., 1989)

Вклад в дозу	Северное полушарие	Южное полушарие	Население Земли в среднем
Внешнее облучение: короткоживущие радионуклиды	0,47	0,08	0,31
цезий-137	0,60	0,17	0,37
Внутреннее облучение: красный костный мозг	2,7	0,98	1,9
гонады (муж. половые железы)	1,5	0,42	0,99

Ожидаемая коллективная доза от всех произведенных ядерных взрывов составляет 30 млн чел*Зв. К 1980 г. человечество уже получило 12 % этой дозы. Приведенные выше индивидуальные ожидаемые дозы тоже будут накапливаться в течение длительного времени (большая часть до 2020 г.), так что их нельзя сравнивать с годовыми дозами от других источников радиации. Тем не менее, это существенный избыток над естественным облучением. Отметим, что образовавшийся при термоядерных испытаниях радиоуглерод, смешавшись со стабильным углеродом биосферы, вследствие большого периода полураспада (5730 лет) будет служить дополнительным источником облучения для многих поколений людей [Люцко А.М. и др., 1996].

7.3. Радиоактивность, связанная с работой предприятий ядерно-топливного цикла

Важным источником антропогенных поступлений радионуклидов в окружающую среду являются предприятия ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), включающего в себя урановые рудники, предприятия по обогащению и переработке руды, производству ядерного топлива, его транспортировке, производство электроэнергии на атомных электростанциях и захоронение радиоактивных отходов. На каждом из этих этапов возможны утечки и

аварийные ситуации, при которых перемещенные природные радионуклиды или радиоактивные вещества антропогенного происхождения загрязняют окружающую среду.

При добыче урана главный излучатель - ^{222}Rn . Масштабы его выделения составляют около 1 ГБк на тонну руды с содержанием 1 % оксида урана U_3O_8 . Мировая добыча урановых руд составляет примерно 40 тыс. т/год.

При извлечении урана из руд в ходе первичной их переработки образуются хвосты обогащения, которые представляют собой другой источник загрязнения атмосферы. Радиоактивность создается за счет ^{238}U , ^{230}Th , ^{226}Ra и ^{210}Pb .

Производство ядерного топлива включает в себя очистку, переработку в гексафторид урана UF_6 , обогащение изотопом ^{235}U , переработку в металлический уран и изготовление тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов). Твердые отходы, образующиеся в ходе этих операций, сходны с теми, что получают на стадиях добычи и переработки руд. Эмиссия радионуклидов в процессе производства топлива также относительно мала.

Ядерные реакторы – это мощные производители радиоизотопов и главные источники радиоактивных веществ в топливном цикле. Каждый акт деления дает два радиоактивных изотопа – осколка, каждый из которых подвергается радиоактивному распаду, превращаясь, в конце концов, в стабильный изотоп. При этом возникают сотни радиоактивных изотопов. Кроме того, интенсивные нейтронные потоки внутри реактора производят радиоактивные превращения элементов при захвате нейтронов, давая дополнительно радиоактивные изотопы (явление нейтронной активации).

Общее количество радиоактивных веществ внутри активной зоны реактора в каждый момент времени зависит от типа реактора и предшествующего режима его работы. В ходе нормальной работы ядерных реакторов образуются газообразные, жидкие и твердые отходы с низким и умеренным уровнем активности. Радионуклиды, возникающие при ядерном делении и активации, вызывают загрязнение различных материалов вследствие высвобождения их из ядерного топлива или с поверхности оболочек ТВЭЛов. Вид и количество отходов определяются такими факторами, как тип реактора, его конструктивные особенности, условия работы и степень выработанности топлива.

Хранение отработанного топлива, его переработка и захоронение отходов. В результате развития атомной промышленности и энергетики, атомного флота только в России накоплено радиоактивных отходов суммарной активностью около $11,55 \cdot 10^{19}$ Бк и отработанного ядерного топлива суммарной активностью $17,2 \cdot 10^{19}$ Бк. При этом, как отмечено в Постановлении Правительства РФ от 23 октября 1995 г, имеющиеся производственные мощности не обеспечивают надежной изоляции накопленных и вновь образующихся радиоактивных отходов, и материалов.

В настоящее время ни на одной атомной электростанции России нет полного комплекта установок для подготовки к безопасному длительному хранению – кондиционированию радиоактивных отходов. Хранилища жидких и твердых радиоактивных отходов, и отработанного ядерного топлива на АЭС близки к предельному заполнению.

Большая часть произведенного во всем мире количества долгоживущих радионуклидов находится ныне в хранилищах отработанного топлива, на радиохимических заводах, ведущих его переработку, и в хранилищах высокоактивных отходов. Количество отходов, которое необходимо захоронить и скорость, с которой они накапливаются во всем мире, огромны. В выбросах реакторов, хранилищ, радиохимических заводов и мест захоронения отходов принципиальное значение имеют следующие изотопы: ^3H , ^{14}C , ^{60}Co , ^{85}Cr , ^{90}Sr , ^{95}Zn , ^{99}Tc , ^{106}Ru , ^{129}I , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{147}Pm , ^{237}Np и изотопы плутония. В топливе после его извлечения из реактора, кроме остаточного урана и плутония, содержатся продукты деления и актиноиды, поэтому перед отправкой его на переработку необходимо дождаться распада короткоживущих радиоизотопов. Для этого отработанное топливо выдерживают в специальных хранилищах на самих АЭС. Топливо перевозится в специально оборудованных контейнерах (или «пеналах»), которые в соответствии с правилами, основанными на рекомендациях Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), способны противостоять самым тяжелым авариям.

В отработанном топливе содержится не менее 96 % урана и до 1 % плутония. При переработке с помощью экстракции они переводятся в экстрагирующий растворитель. Почти все радиоактивные продукты деления остаются в водной фазе, образуя высокоактивные отходы, которые после удаления остатков органического растворителя и оболочки твэлов поступают в хранилище.

Газообразные радиоактивные отходы накапливаются за счет образования летучих радионуклидов, наиболее важные из которых – галогены, благородные газы, ^3H и ^{14}C . Для удаления радиоактивных частиц из загрязненных газов и воздуха используют фильтры. В процессе переработки топлива образуются низкоактивные газообразные продукты. Они выделяются главным образом при разрезании и растворении твэлов. Радиоактивные изотопы йода распадаются при выдержке топлива в бассейне-охладителе. Остается лишь небольшая часть этих радионуклидов и их связывают с помощью специальной химической обработки. Изотоп криптон-85 ($T=10,4$ года) – это продукт деления, главный источник его – переработка ядерного топлива. Он образуется в ядерных реакторах, но в основном сохраняется внутри тепловыделяющих стержней. При сбросе его через газоотводную трубу никакой специальной выдержки газов не производится.

Радиоактивные жидкие отходы, образующиеся на ядерных энергетических установках, содержат растворимые и нерастворимые компоненты – продукты деления и коррозии. Эксплуатация трубопроводов и

оборудования приводит к накоплению жидких отходов как результат операций по их периодической дезактивации. Для того чтобы основной объем жидких отходов можно было сбросить в окружающую среду или использовать в замкнутом цикле, применяются различные способы обработки стоков. Они основаны на четырех главных методах: выпаривании, химическом осаждении и коагуляции, твердофазной репарации и ионном обмене.

Низкоактивные жидкие стоки (например, вода из охлаждающих бассейнов), после обработки с целью сведения к минимуму концентрации радионуклидов, могут быть сброшены в окружающую среду. **Высокоактивные жидкие отходы** образуются на первой стадии разделения перерабатываемого топлива. Эти отходы можно сконцентрировать выпариванием для хранения в охлаждаемых емкостях до окончательного захоронения. Желательно, чтобы такие жидкие отходы можно было, в конечном счете, перевести в твердую форму для хранения и захоронения. Для этого используют процессы остеклования, основанные на методах сплавления с металлом или с керамикой, в результате чего высокоактивные отходы превращаются, например, в боросиликатное стекло.

Радиоактивные твердые отходы представляют собой оболочки элементов, загрязненное оборудование, отработанные реагенты и др. В зависимости от природы твердых отходов для уменьшения объема и подвижности радиоактивных веществ применяют различные комбинации методов. Чтобы уменьшить объем **твердых низкоактивных отходов**, а также в качестве предварительной обработки их перед прессованием или сжиганием используют разрезание, измельчение и дробление. **Отходы средней активности** от переработки топлива могут храниться в ожидании капсулирования и окончательного захоронения. **Влажные отходы** (ионообменные смолы, фильтрующие среды, осадки) перед окончательным захоронением должны быть превращены в твердые продукты. Для этого используют цементирование, битуминизацию или сшивание с полимерами.

Существует два пути обращения с радиоактивными отходами:

Концентрирование отходов и их захоронение в таких местах биосферы или вне ее, когда исключается или сводится к безопасному минимуму контакт отходов с живыми организмами.

Рассеяние радионуклидов в окружающей среде в первую очередь в атмосфере и гидросфере до такой концентрации, которая считается безопасной в радиационно-экологическом отношении.

Первый путь принят во многих странах мира для высокоактивных отходов, 2-й путь – для отходов с низкой активностью.

7.4. Радиационные аварии

За время существования атомной энергетики на ее объектах в мире произошло более 300 аварий. Наиболее крупными и известными из них были аварии в Уиндскейле ныне Селлафильд (Великобритания) в 1957 году, на

Южном Урале в том же 1957 году, на АЭС в Три-Мэйл-Айленд (США) в 1979 году и на Чернобыльской АЭС в 1986 году. гораздо меньше известно о негласном «плановом» загрязнении [Симаков С.В. и др., 1998].

Радиационные аварии различаются по объему выброса, радионуклидному составу, по тяжести последствий этих выбросов и размерам территорий, подвергшихся загрязнению и т. д. Учитывая участвовавшие инциденты на атомных объектах, МАГАТЭ предложило *оценивать тяжесть радиационных аварий на энергетических реакторах по 7-балльной шкале:*

1 балл – Аномалия: нарушения нормальной работы реактора, не требующие защитных мер (ошибки операторов, отказ автоматики).

2 балла – Происшествие: техническое происшествие или аномалия, которая не вызвала серьезных последствий, но может потребовать защитных мероприятий в дальнейшем.

3 балла – Серьезное происшествие: выброс радиоактивности в окружающую среду превышает допустимый уровень. Кратковременно дозы за пределами объекта достигают десятков мЗв. Защитные меры вне АЭС не требуются. Высокий уровень радиации и/или локальное загрязнение вследствие повреждения оборудования или неправильного управления. (Пример: гибель подводной лодки «Комсомолец», 1989). Переоблучение обслуживающего персонала (индивидуальные дозы превышают 50 мЗв).

Происшествие, при котором выход из строя систем защиты может привести к аварии, или ситуация, при которой защитные системы не способны предотвратить аварию. (Пример: Ванделло, Испания, 1989).

4 балла – Авария на объекте: радиация в прилегающей местности создает индивидуальную дозу в несколько мЗв. Локально требуются защитные меры, контроль (выборочный) местных продуктов питания. Повреждение активной зоны (механическое и/или частичное расплавление). Дозы у работников АЭС могут привести к острой лучевой болезни (порядка 1 Зв). (Пример: Сент-Лорен, Франция, 1980).

5 баллов – Авария, опасная для прилегающей территории: выброс продуктов деления, радиологически эквивалентный 10^{14} – 10^{15} Бк йода-131. Требуются местные защитные мероприятия (укрытия и/или эвакуация из пораженной местности). (Пример: Уиндскейл, Великобритания, 1957 г.).

Серьезное повреждение активной зоны реактора (разрушение и/или частичное расплавление). (Пример: Три-Мэйл-Айленд, США, 1979 г.).

6 баллов – Серьезная авария: выброс продуктов деления, эквивалентный 10^{15} – 10^{16} Бк йода-131. Требуются широкомасштабные мероприятия для предотвращения серьезных последствий для здоровья.

7 баллов – Катастрофа: выброс значительной части активной зоны со смесью коротко- и долгоживущих продуктов деления в количестве, эквивалентном более чем 10^{16} Бк йода-131. Возможны острые лучевые поражения. Радиобиологические эффекты на большой территории, иногда охватывающей несколько стран. Долговременные последствия для

окружающей среды. (Пример: Южный Урал, СССР, 1957 г., Чернобыль, СССР, 1986 г.) [Люцко А.М. и др., 1996].

В России наиболее известно состояние дел с жидкими радиоактивными отходами комбината «Маяк» в Челябинской области на Южном Урале. 27 сентября 1957 года из-за неполадок в системе охлаждения бетонных емкостей, содержащих высокоактивные отходы, химический взрыв выбросил в атмосферу около 10^{17} Бк радиоактивных продуктов деления (главным образом ^{90}Sr). Они рассеялись и осели в Челябинской, Свердловской и Тюменской областях. Жители населенных пунктов, где уровень загрязнения многократно превысил предельно допустимые нормы, были эвакуированы. Еще и сейчас вдоль «кыштымского следа» существуют территории с концентрацией активности выше 10 МБк/м^2 . Катастрофа на Южном Урале еще не изучена до конца и нельзя назвать ее последствия.

В октябре того же 1957 года на другом военном заводе, производящем оружейный плутоний, в Великобритании (Уиндскейл, ныне Селлафильд), из-за частичного расплавления активной зоны реактора в окружающую среду было выброшено $7,5 \cdot 10^{14}$ Бк йода-131, $2,2 \cdot 10^{13}$ Бк цезия-137 и другие изотопы. С территории около 500 км^2 власти эвакуировали население, запретив использовать воду и молочные продукты местного производства. После распада радиоактивного йода через полтора месяца эвакуированные, получив компенсацию за ущерб, смогли вернуться домой. Сейчас в Селлафильде, на месте закрытого военного штаба, существует всемирно известный экскурсионный центр, где можно познакомиться с проблемами ядерной энергетики, правилами радиационной безопасности, устройством реактора и использованием ионизирующих излучений.

Катастрофа на Чернобыльской АЭС, произошедшая 26 апреля 1986 года, по своим масштабам беспрецедентна, а по радиоэкологическим последствиям сравнима лишь с южноуральской.

Еще одним источником загрязнения окружающей среды радиоактивными веществами являются **транспортные реакторы** на атомоходах и атомных подводных лодках. При их нормальной работе уровень загрязнения невелик, однако и здесь время от времени происходят аварии (аварии американской подводной лодки «Трайидент» в середине 60-х годов и советской подводной лодки «Комсомолец» в 1990 г. лишь наиболее известные из них). Даже при затоплении судна с не разрушенным реактором неизбежна его коррозия в морской воде и рано или поздно радионуклиды попадут в окружающую среду. Та же судьба ожидает и контейнеры с радиоактивными отходами, которые до ноября 1993 г. наша страна сбрасывала в окружающие моря – Карское, Японское, Баренцево [Люцко А.М. и др., 1996].

Поступление радиоизотопов в окружающую среду возможно и в результате **деятельности промышленных и исследовательских реакторов**, а также при утере источников радиоактивного излучения (обычно ^{137}Cs или ^{60}Co), используемых в различных приборах. Только за 1982 – 1990 гг. в г.

Москве сотрудниками Геоцентра выявлено 765 участков локального радиоактивного загрязнения [Симаков С.В. и др., 1998].

В результате последствий радиационных аварий в настоящее время в России более 110 тысяч человек живут на территориях, которые по медицинским нормам должны быть необитаемой зоной [Дубинин, 1994].

8. Территории бывшего СССР с повышенной радиоактивной загрязненностью среды

8.1. Радиоактивные загрязнения, вызванные испытаниями ядерного оружия

Наиболее загрязняющие среду испытания атомных зарядов в России (СССР) велись на Семипалатинском полигоне (население прилегающих территорий 803 тыс. чел.), на Новой Земле, в Северном Ледовитом океане (общая площадь 83 тыс. км², арктическая пустыня, тундра).

В нашей стране осуществлено 715 взрывов, в том числе самое большое количество испытаний в атмосфере (215). Большинство этих взрывов проведено на Семипалатинском полигоне, а также на Новой Земле, где были проведены взрывы (особенно водородной бомбы в 1961 г.) самой большой мощности в мире. Радиоактивными цезием, стронцием, плутонием загрязнена тундра побережья Баренцева и Карского морей, Крайний Север Западной Сибири. Полигон и прилегающие к островам прибрежные воды и заливы используются и как могильник отработавших реакторов, в том числе первого в мире атомного ледокола «Ленин».

Максимальная активность радиоактивных выпадений регистрировалась в Андерме (Ненецкий округ), превышая фон в 11 тыс. раз. Величина радиоактивности в цепочке на территориях севернее 60° с. ш., «миграция радионуклидов – лишайник – северный олень – человек», превышает фоновую в 10 и более раз.

Помимо ядерных испытаний, в нашей стране проводились георазведочные и промышленные ядерные взрывы (по договору от 28.05.1976) при условии полной экологической безопасности. В СССР в мирных целях было проведено 115 подземных ядерных взрывов, в том числе 89 в России (16 в Западной Сибири, 15 в Астраханской области, 10 в Пермской области и от 2 до 5 в Башкирии, на Северном Кавказе, Мурманской и других областях).

Основой экологической безопасности здесь служила температура в точке взрыва ~10⁶°С, ведущая к вплавлению радиоактивных продуктов деления в состав литосферы. Взрывы велись в малообитаемых районах страны. Риск повышенного загрязнения подвергалось незначительное число близлежащих поселков, городов (несколько сотен человек).

Основная часть радионуклидов деления вплавлялась в породу, формируя газонепроницаемую емкость. Однако под действием подземных вод, перепадов температур в последующем возможна разгерметизация локальной радиоактивности и ее труднопрогнозируемая миграция.

Подобные взрывы признаны нерентабельными, наносящими труднопрогнозируемый ущерб окружающей среде, и в настоящее время не проводятся.

8.2. Аварийное радиоактивное загрязнение среды

Потенциальными источниками формирования аномальных антропогенных радиоактивных загрязнений среды являются атомные электростанции мира. За 1956–1990 гг. в нашей стране было построено 12 АЭС с 37 реакторами и 20 исследовательских реакторов.

Отечественные реакторы по системе защиты были признаны (Лондон, 1960) наиболее безопасными, и до аварии на Чернобыльской АЭС инцидентов на них не происходило. Тем не менее, типовые загрязнения среды даже при нормальном режиме работ неизбежны. Поэтому территории, непосредственно прилегающие к АЭС, реакторам, пунктам захоронений радиоактивных отходов, следует отнести к разряду с повышенной радиоактивностью среды. В последующем это подтвердилось рядом аварий на АЭС в США и Англии (20 аварий за 20 лет), а затем в нашей стране и в Японии.

Состав радиоактивного загрязнения среды на прилегающих к АЭС и исследовательским реакторам территориях тот же, что и при ядерных взрывах, авариях, но при значениях, в сотни раз меньших по сравнению с загрязнениями от испытаний ядерного оружия.

Радиоактивное загрязнение среды в крупных масштабах произошло в результате аварии на военном ядерном центре «Челябинск-40» (или «Маяк») в 1957 г. вследствие теплового взрыва одного из ядерных хранилищ. Радиоактивный выброс (облако) охватил значительную часть Челябинской области (с населением 3548 тыс. чел.) и прилегающие районы Тюменской, Курганской, Свердловской областей. Максимальная длина образовавшегося Восточно-Уральского радиационного следа составила 300 км. Загрязнение среды активностью свыше 0,1 Ки/км² (по стронцию-90, основному радионуклиду взрыва) охватило 23 тыс. км², 217 населенных пунктов с общей численностью населения 270 тыс. чел. Территория с плотностью загрязнения более 2 Ки/км² составила 1000 км² с населением 2,1 тыс. чел. С территорий, загрязненность которых превышала 2 Ки/км² (принятый предел), были переселены 10,2 тыс. чел.

Таблица 8.1

АЭС и исследовательские реакторы в России

АЭС (годы ввода в эксплуатацию)	Число реакторов	Местоположение и численность жителей
Балаковская (1985)	3	город-порт Балаково на Волге, 180 тыс. жителей
Белоярская (1980)	1	пос. Заречный Свердловской обл., несколько сотен жителей

Билибинская (1974-1976)	4	пос. Билибино Чукотского автономного округа (горнорудная промышленность), несколько сотен жителей
Калининская (1976)	2	ж.-д станция «Удомля». Деревообрабатывающий завод, несколько сотен жителей
Кольская (1974)	4	пос. Полярные Зори Мурманской обл., горнорудная промышленность, несколько сотен жителей
Курская (1974-1975)	4	пос. Курчатова Курской обл. на реке Сейм, несколько сотен жителей
Ленинградская (1973-1985)	4	Ленинградская (1973-1985) г. Сосновый Бор Ленинградской обл., машиностроительный завод, 53 тыс. жителей
Нововоронежская (1971-1980)	3	г. Нововоронеж Воронежской обл., несколько сотен жителей
Смоленская (1985-1990)	3	пос. Десногорск Смоленской обл., несколько сотен жителей
Обнинская (1956)	1	г. Обнинск Калужской обл., 91 тыс. жителей
Томская (1958)	5	Северск (Томск-7), Томская обл., 107 тыс. жителей
Красноярская	3	Красноярск-26, Красноярская обл., около 90 тыс. жителей
Исследовательские реакторы	9	Москва (Химки, Севастопольский, Сокольнический р-ны)
	3	Санкт-Петербург, г. Сосновый Бор, Ленинградской обл.
	1	Обнинск (учебный центр по ядерной энергетике)
	7	г. Димитровград Ульяновской обл., НИИ атомных реакторов, 116 тыс. Жителей
	1	пос. Спутник, Томск (НИ ТПУ)

Помимо аварийной загрязненности, на территории района площадью 30–40 км² (санитарно защитная зона междуречья Теча – Мишелях) было сосредоточено более 200 могильников: с радиоактивностью 4 млн Ки – вплавлены в стекло; с 150 млн Ки – в спецхранилищах и емкостях; с 200 млн Ки – сброшены в озеро Карачай, Старое Болото, пойму реки Течи (отделенной к настоящему времени от реки дамбой).

Авария на Чернобыльской АЭС, приостановившая развитие ядерной энергетики мира, вследствие «радиационного страха», произошла 26 апреля 1986 г. в ходе эксперимента с недозванным отключением систем блокировки. Два взрыва вынесли в среду радиоактивность ядерного топлива реактора и продуктов его деления на высоту 600–1200 м. Первичный выброс в виде газов и аэрозолей ¹³⁷Cs (¹³⁴Cs) составил 2·10⁶ Ки, ³H – 2·10⁷ Ки при незначительной доле других радионуклидов.

Оставшаяся активность сочилась в течение последующих 10 суток, загрязняя среду. Население об этом не оповещалось (сообщалось об управляемости аварией), должные меры защиты приняты не были.

На АЭС в момент взрыва работало 200 чел. и 900 чел. (ночная смена) находились на расстоянии 5 км от аварийного реактора, на строительстве 5-го и 6-го блоков АЭС. В момент взрыва погибли два человека. В течение первых трех дней 399 чел. были отправлены в Москву и Киев с подозрением на острую лучевую болезнь.

Таблица 8.2

Суммарная активность некоторых радионуклидов, выброшенных в атмосферу ЧАЭС (по литературным данным)

Нуклид	Период полураспада	Суммарная активность выброса, Ки	Доля, процент от	
			количества в реакторе	суммарной активности выпадений к 1993 г.
^{137}Cs	30 лет	2,3	31	89,4
^{134}Cs	2 года	1,4	31	4,4
^{131}I	8 суток	1798	55	-
^{90}Sr	29 лет	0,46	4	1,9

Территориальное распределение радиоактивного загрязнения шло неравномерно. Радиоактивным выпадениям, повысившим радиационный фон не более чем в 5–10 раз за счет короткоживущих изотопов, подверглись территории Польши, Германии (ГДР), Италии, Швейцарии, Франции, Бельгии, Нидерландов. К началу мая аналогичные выпадения регистрировались в Великобритании, Греции, Израиле, Кувейте, Турции. Но наиболее массивным загрязнением были подвержены 13 областей России, Белоруссии, Украины: Минская, Брестская, Ровненская, Могилевская, Гомельская, Житомирская, Киевская, Черкасская, Черниговская, Брянская, Калужская, Орловская, Тульская. Суммарная площадь районов с загрязнением $> 40 \text{ Ки/км}^2$, потребовавших срочной эвакуации свыше 130 тыс. чел., составила 7000 км^2 (2000 км^2 в России). Общая площадь цезий-стронций-плутониевой и короткоживущей йодной радиоактивной загрязненности в России составила 147 тыс. км^2 с 4270 населенными пунктами и общей численностью населения ~ 3 млн чел. Треть населения территорий с резко изменившимся составом среды (783 тыс.) – дети. Для дезактивации территорий было снято около 200 тыс. м^3 грунта, снесены и захоронены несколько деревень.

Наиболее сильно в России пострадали Брянская, Калужская, Тульская области, а также ряд районов Воронежской и Липецкой областей (табл. 8.3).

Области России с загрязнением более 1 Ки/км²

Область	Число населенных пунктов	Процент загрязненных почв области
Белгородская	37	8
Брянская	1177	34
Воронежская	21	1,5
Калужская	338	17
Курская	171	4,4
Ленинградская	44	1
Липецкая	85	8
Орловская	525	40
Рязанская	378	15
Смоленская	47	0,5
Тульская	1447	47

Примечание. Средний уровень современного (глобального) фонового загрязнения среды по ¹³⁷Cs составляет 0,08 Ки/км: по Sr – 0,045; плутонию – 0,005 Ки/км².

Критическими радионуклидами загрязнений являются цезий (79,3 % от суммарной радиоактивности среды); стронций (19,8 %) и микровкрапления плутония (0,9 %).

В *Белоруссии* доля территорий, радиоактивность которых превышала (по данным Международной программы по последствиям Чернобыльской аварии) 1 Ки/км², составила 22 % (20 % населения). Общая площадь загрязненности – 80 %. Из зон отселения и отчуждения было срочно эвакуировано 24,7 тыс. чел., 33 лечебно-профилактических учреждения осуществляли экстренное медицинское обслуживание эвакуированных.

На *Украине* загрязнению подверглось около 30 % территорий. Наиболее пострадавшим, потребовавшим экстренной медицинской помощи, оказалось Полесье. Радиоактивность Овручинского, Ивановского, Полесского районов достигала здесь 40 Ки/км², накапливаемые эквивалентные дозы – 48,6 м³в год. Общая численность населения республики, получившего повышенные лучевые нагрузки (по данным 1991 г.), составила 1,53 млн чел.

К локальным, менее значительным территориальным загрязнителям следует отнести ремонтные заводы и базы атомных кораблей, хранилища ядерного оружия и другие объекты. На таких объектах (побережье Северного Ледовитого океана, Мурманская, Архангельская, Ленинградская, Московская, Пермская, Новосибирская, Читинская области и Дальний Восток) были зафиксированы случаи повышения радиоактивности внутри объектов или выявлены участки локального повышения радиоактивности. Однако последствий локальных загрязнений зарегистрировано не было.

8.3. Радиационная обстановка в Ставропольском крае

Основными факторами, определяющими радиационную обстановку на территории края, являются:

- естественная радиоактивность;
- привнесенная радиоактивность (в виде отходов, образующихся при добыче, транспортировке и переработке нефти и газа, термальных, питьевых и минеральных вод, радиоактивных руд, строительных материалов);
- радиационные аварии.

Природная радиоактивность территории края определяется преимущественно современными ландшафтами и особенностями геологического строения этой части региона.

Большая часть территории края (90 %) представлена степной ландшафтной зоной с лугово-черноземными и каштановыми типами почв и, в незначительной мере, полупустынной ландшафтной зоной (крайний восток и юго-восток края) с серо-коричневыми почвами и серо-зёмами. Примерно на 8 % территории края мощность экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД ГИ) составляет 10–12 мкР/ч, что характерно для участков развития глинистых толщ майкопской серии, содержащими прослой детрита (костные остатки рыб) с повышенным содержанием урана. Районы с такими значениями уровня гамма-фона находятся в основном в южной и юго-западной частях края (Кочубеевский, Андроповский, Предгорный, Минераловодский и отчасти Шпаковский и Георгиевский районы). Кроме того, аналогичные по величине МЭД ГИ спорадические участки имеют место и в других районах края (Советский, Курской, Левокумский, Нефтекумский, Буденновский, Арзгирский, Ипатовский, Новоалександровский).

На оставшиеся 2 % площади территории края приходятся уровни гамма-фона с МЭД ГИ более 12 мкР/ч. Это связано с развитием магматических пород кислого состава (породы гранитоидного, трахитового и липаритового составов) и приурочены к горным районам и району гор-лакколитов особо-охраняемого эколого-курортного района Кавказских Минеральных Вод.

В регионе Кавказских Минеральных Вод радиационная обстановка обусловлена суммарным воздействием на окружающую среду природных, природно-техногенных и техногенных факторов.

Природные факторы связаны со своеобразием геологического строения региона и, в первую очередь, выходящими на дневную поверхность 17 разобщенных лакколитообразных тел гранитоидного состава, обладающих повышенным уровнем гамма фона, которые прорывают толщу эоценовых и майкопских отложений. Повышенным уровнем гамма-фона обладают и склоновые отложения вокруг гор-лакколитов, а также травертиновые образования по периметру гор Железной и Машук.

Природно-техногенные факторы связаны с использованием до 60–70-х годов высокордиоактивных гранитоидных материалов из карьеров гор

Змейка, Кинжал, Шелудивая. Существенную роль в формировании общего радиационного фона данного региона играют хемогенные отложения минеральных источников – травертины, расположенные, но склонам гор-лакколитов, уровень радиоактивности которых варьирует в пределах 30–50 мкР/ч и более.

Техногенные источники повышенной радиационной опасности связаны с газонефтедобывающей отраслью. На территории Нефтекумского, Левокумского, отчасти Буденновского районов находится около 40 газонефтяных месторождений. Пролиты на грунт водонефтяной смеси, размещение пластовых вод в отстойниках и на полях испарения, являющихся по удельной активности слабоактивными жидкими радиоактивными отходами, накопление радиоактивных солей в насосно-компрессорных трубах (НКТ) и другом нефтяном оборудовании, реализация местному населению и организациям радиоактивных труб привела к накоплению в регионе нефтедобычи радиоактивных отходов.

В 2004 году были продолжены комплексные геоэкологические работы на территории нефтепромыслов восточного Ставрополя, в том числе и радиационно-экологические исследования на Величаевско-Колодезном месторождении УВС.

В результате проведенных работ установлено, что радиоактивные загрязнения преимущественно связаны с трубами и различными металлоконструкциями из них, а также с почво-грунтами площадок эксплуатируемых скважин, отстойников и полей фильтрации дебалансных вод.

Для утилизации насосно-компрессорных труб в ОАО «Роснефть» и НК «Ставропольнефтегаз» создана специально оборудованная площадка в пос. Затеречном, где в настоящее время хранится более 40 тыс. штук насосно-компрессорных труб.

Отсутствие ограничений на реализацию утилизированных насосно-компрессорных труб населению и различным организациям и дальнейшее их использование для строительства различного рода инженерных сетей (водоводы, газоводы и пр.) и строительных конструкций (опоры, элементы детских и спортивных площадок, ограждения и т. п.) являются существенным фактором техногенного радиоактивного воздействия на объекты окружающей среды, а также на население во многих городах и поселках края.

Для нормализации и контроля радиационной обстановки в крае с целью ограничения облучения населения как от природных, так и техногенных (антропогенных) источников ионизирующего излучения необходимо проведение всего комплекса радиационно-экологических исследований по ее оценке с привлечением компетентных организаций:

- районирование территории края по степени потенциальной радоноопасности;

- радиационно-экологический мониторинг селитебных территорий городов и поселков;
- радиационно-экологическое обследование месторождений строительных материалов, месторождений углеводородного сырья.

9. Миграция радионуклидов. Распространение радионуклидов в атмосфере

9.1. Физические и химические формы существования радионуклидов (общие аспекты)

Радионуклиды могут существовать в различных физических и химических формах в зависимости от условий выброса и переноса, а также свойств, участвующих при этом элементов. Самое общее деление – это газы, аэрозоли и частицы.

Инертные газы, например, благородный газ криптон – ^{87}Kr , ^{88}Kr , удаляются из атмосферы только в результате естественного радиоактивного распада.

Радиационноспособные вещества, такие, как ксенон – ^{133}Xe , ^{135}Xe и элементарный йод – ^{129}I , ^{131}I , который может физически или химически взаимодействовать с другими веществами, например, адсорбируясь на поверхности аэрозолей.

Частицы, несущие радионуклиды (барий – Ba, лантан – La, стронций – Sr), возникают как в результате изначального выброса частиц, так и при последующей конденсации из газа. Частицы с высокой специфической активностью (так называемые «горячие частицы») могут образовываться при взрывах ядерных зарядов и авариях реакторов. По физическим характеристикам частицы могут быть сферические оплавленные силикатные частицы грунта или конструкций, пылевидными частицами, частицами из матриц тепловыделяющих элементов реакторов и др.

Радионуклиды конденсируются также и на естественных аэрозолях. Размер частиц радионуклидных аэрозолей колеблется 0,001–800 мкм: аэрозоли (цезий – Cs и теллур – Te, 0,5–1,0 мм). Растворимость колеблется от долей процентов до 100 %.

При выбросах искусственно созданных радионуклидов их последующая эволюция определяется физическими и химическими свойствами, проявляемыми в биогеохимических процессах.

9.2. Процессы переноса радионуклидов в атмосфере

Попавшие в атмосферу радионуклиды подвергаются влиянию различных физических процессов, которые и определяют их дальнейшую судьбу (рис. 9.1). Наиболее важные с точки зрения дозиметрии процессы – это рассеяние радиоактивных продуктов в атмосфере и последующее их удаление из атмосферы.

Рассеяние радионуклидов, поступивших в планетарный пограничный слой (нижние несколько километров атмосферы), обусловлено как ветровым

переносом (адвекция), так и перемешиванием (диффузия), происходящими в локальном и в глобальном масштабе. Первоначально радионуклиды рассеиваются благодаря локальной циркуляции атмосферы. Этот процесс занимает несколько секунд или минут и приводит к распространению их в горизонтальной плоскости в пределах нескольких километров. Разбавление и перемешивание вызываются турбулентными вихрями и сдвигами ветра. В вертикальном направлении эти вихри ограничены размерами слоя перемешивания, а в горизонтальном они распространяются до синоптических размеров крупномасштабных погодообразующих систем.

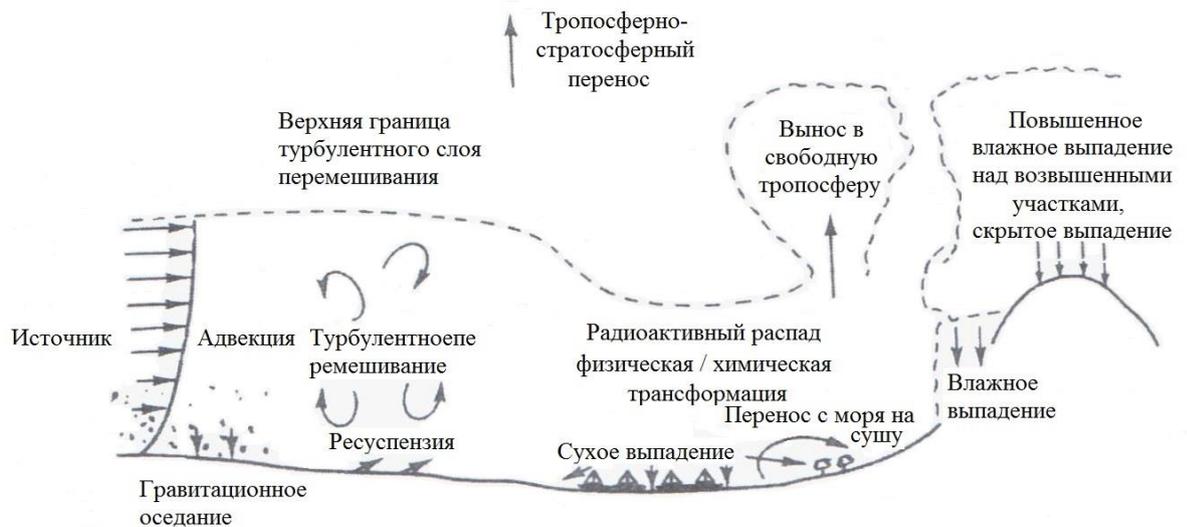


Рис. 9.1. Процессы, оказывающие влияние на радионуклиды в атмосфере

Флуктуации ветра (вихри), большие, чем размер облака, стремятся перенести по ветру целое облако и не рассеять его» тогда как вихри, весьма близкие по размеру к облаку, приводят к быстрому росту последнего и разбавлению радиоактивности. Таким образом, атмосферная турбулентность (диффузия) состоит из широкого спектра вихрей, охватывающих расстояния от тысячи километров до размера молекул. Интенсивность турбулентного перемешивания атмосферы в первую очередь зависит от неоднородности подстилающей поверхности, сдвигов ветра по высоте и вертикального распределения температур в атмосфере. Следовательно, можно ожидать большей интенсивности турбулентного движения над пересеченной местностью, нежели над равниной, и в периоды, когда сильный нагрев солнечным светом приводит к вертикальной температурной неустойчивости.

Ветровые системы, как в стратосфере, так и в тропосфере преимущественно зональные, т. е. ориентированные с запада на восток или с востока на запад. Потoki воздуха в тропосфере в северных широтах движутся в основном с запада на восток, при этом скорость ветра возрастает с высотой вплоть до уровня струйных течений. Интенсивность самих струйных течений варьирует в зависимости от места и высоты. В более

низких широтах наиболее часты восточные ветры. В тропосфере низких широт также может иметь место меридиональный перенос. В этом случае потоки воздуха поднимаются над экватором, движутся по направлению к полюсам и опускаются к поверхности земли в субтропических областях. Движение по направлению к экватору компенсирует движение в сторону полюсов в высоких широтах.

Зональные потоки воздуха видоизменяются под влиянием циклонов и антициклонов, в результате образуется «вихревая» ветровая система, в которой есть компоненты, движущиеся с севера на юг. Кроме того, ближе к земной поверхности над определенными территориями наблюдаются региональные ветровые системы, например, муссоны в районе Индийского океана, вызываемые неравномерным нагревом суши и моря. Существуют также ветровые системы, изменяющие направление в зависимости от сезона.

Анализ данных по обнаружению радиоактивных осколков показывает, что в случае испытаний в средних и высоких широтах передвижение в основном осуществляется западными ветрами, возможно, под влиянием струйных течений. Время полного переноса радионуклидов вокруг Земли составляет примерно 10–14 суток. Быстрое зональное движение, вызванное струйными течениями, приводит к тому, что распространение радиоактивных веществ максимально на той широте, где проводится испытание, и снижается в более низких и высоких широтах, при этом географическое расстояние особой роли не играет.

9.3. Фракционирование радионуклидов

В период формирования аэрозольных частиц в стратосфере и тропосфере происходит так называемое фракционирование радионуклидов, т. е. в период конденсации испарившегося во время взрыва вещества имеет место избирательный захват изотопов формирующимися частицами. При фракционировании смесь изотопов в атмосферных выпадениях изменяется в зависимости от расстояния и времени переноса продуктов деления в атмосфере. Фракционирование радионуклидов определяется мощностью ядерного взрыва и местом его проведения.

Изотопы тугоплавких элементов цирконий (^{95}Zr), церий (^{144}Ce), вольфрам (^{181}W) и др. в результате конденсации и коагуляции включаются в состав крупных твердых частиц. Радиоактивные изотопы ^{90}Sr и ^{137}Cs не принимают участия в процессе конденсации, они адсорбируются на поверхности мелких частиц и парах влаги с образованием мелкодисперсных аэрозолей.

Зона переходных зародышевых частиц. Это очень мелкие частицы – продукты конденсации паров и конверсии газов в твердые образования. Они представляют собой первичные частицы, образовавшиеся таким образом, и являются недолго живущими образованиями. Аэрозольное вещество, образовавшееся из элементов с умеренной летучестью (например, цезий) при высокотемпературных авариях (например, в Чернобыле), будет

выбрасываться в основном в виде пара с последующей быстрой конденсацией в аэрозоль, где максимум распределения будет приходиться именно на эту зону. Элементы, высвобождающиеся и газообразной форме, а затем переходящие в менее летучую форму (например, йод), также связываются в основном с частицами этой юны благодаря высокому отношению площади поверхности к объему у очень мелких частиц.

Зона аккумуляционных частиц. Аэрозоли, состоящие из переходных зародышей частиц, по природе своей неустойчивы в отношении таких механизмов роста, как коагуляция и конденсация паров, следовательно, существует тенденция к их росту, ведущая к образованию аккумуляционных частиц. Высокая скорость коагуляции зародышей частиц способствует образованию аккумуляционных частиц, при этом их численная плотность падает, и дальнейшая коагуляция идет очень медленно. Другим фактором, благоприятствующим существованию аккумуляционных частиц, служит неэффективность процессов выведения для частиц таких размеров. Для более мелких частиц одинаково предпочтительно как сухое, так и мокрое оседание в силу высокой диффузионной способности таких аэрозольных частиц, тогда как на более крупные частицы действуют инерционные и гравитационные силы, что ведет к эффективному сухому выведению. Таким образом, аккумуляционная зона находится в области минимума на кривой эффективности как для сухого, так и для мокрого оседания. Когда вымывание ни в слое облаков, ни под ним не эффективно.

Зона гигантских частиц механического происхождения. Для распределения аэрозольных частиц по массе в окружающем воздухе характерен минимум в области 2–3 мкм; частицы большего размера называют «гигантскими» или «механически образованными». Последнее название отражает то обстоятельство, что первичные аэрозоли такого размера образуются в основном вследствие механического трения, а не из газа или пара. Радиоактивность, характерная для этих более крупных частиц, может быть не связана с механическим разрушением; процессы коагуляции и конденсации в равной мере могут приводить к присоединению радиоактивного вещества к крупным, находящимся в воздухе частицам. Конденсация паров может способствовать образованию частиц с неактивной сердцевинной и радиоактивной наружной оболочкой. Гигантские частицы довольно быстро оседают под воздействием сил гравитации. Столь же эффективно удаляются из атмосферы под влиянием процессов, зависящих от сил инерции.

Процессы аэрозольной коагуляции затрагивают частицы всех размеров, хотя наиболее быстро они идут у мелких частиц при высокой численной плотности. Смещение факела, содержащего радиоактивные частицы, с окружающим воздухом ведет к коагуляции радионуклидов с аэрозольным веществом окружающего воздуха. В результате изменяются распределение аэрозоля по размерам частиц и его физико-химическое поведение.

Аэрозольные переходные зародышевые частицы быстро теряются в результате оседания, либо трансформируются в частицы более крупных размеров. Поэтому они обычно наблюдаются только рядом с источником. «Гигантские» частицы тоже образуются довольно локально (в том числе и из-за ресуспензии), атмосферные турбулентные процессы могут переносить их по воздуху на значительные расстояния: на десятки, сотни, а в исключительных случаях на тысячи километров. Основная же часть аэрозольного вещества, переносимого на значительные расстояния, связана с частицами аккумуляционной зоны. Эти аэрозоли обладают очень низкой скоростью оседания, обычно 0,01–0,1 см/с. Поэтому время жизни с точки зрения сухого оседания составляет 12–120 суток в пограничном слое высотой 1 км. На практике, наиболее типичная продолжительность жизни достигает 7–30 дней.

Аэрозольные частицы в условиях высокой относительной влажности подвержены гигроскопическому росту – решающему процессу при образовании облаков и вымывании осадками. Быстрее всего частицы растут за счет поглощения воды водорастворимыми солями, которые могут присутствовать в составе частиц.

Иногда аэрозольные частицы могут приобретать электрический заряд, который заметно влияет на их поведение.

Фракционирование радионуклидов в радиоактивных выпадениях приводит к неравномерному очищению атмосферы от продуктов деления. Это, прежде всего, обусловлено тем, что скорость оседания частиц различного размера неодинакова. Крупные частицы выпадают быстрее, мелкие – медленнее.

9.4. Осаждение радиоактивных аэрозолей на земную поверхность

В зависимости от источника и условий формирования радиоактивных осадков характер выпадений и их физико-химические свойства сильно различаются, что сказывается на степени и размерах загрязняемой территории. Радиоактивные вещества могут выпасть в течение первых суток вблизи места взрыва, образуя локальные выпадения, или, поступив в верхние слои атмосферы, задержаться в стратосферных и тропосферных резервуарах. Стратосферный и тропосферный резервуары – источник повсеместных (глобальных) выпадений радиоактивных веществ.

В результате наземных ядерных взрывов мощностью менее 1 Мт доля локальных выпадений составляет 80 %, а от воздушных взрывов такой же мощности все 100 % представлены тропосферными выпадениями. При мощности более 1 Мт значительная часть радиоактивных аэрозолей попадает в стратосферный резервуар (от наземного взрыва – 20 %, от воздушного – 99 %). Радиоактивные выпадения от наземных ядерных взрывов представляют собой оплавленные частицы грунта, на котором произведен взрыв. При проведении взрывов на почвах, сформированных на подстилающих силикатных породах, образуются крупнодисперсные остеклованные частицы,

практически нерастворимые. При проведении взрывов на почвах, образовавшихся на карбонатных почвообразующих породах, формируются хорошо растворимые радиоактивные частицы независимо от их дисперсности.

После наземного ядерного взрыва радиоактивные частицы, находящиеся в нижних слоях атмосферы, осаждаются на растительный: почвенный покров в течение нескольких часов. Это объясняется сравнительно большим размером радиоактивных частиц при наземных ядерных взрывах (1–0,01 мм). Вначале выпадают более крупные частицы, затем – более мелкие и в конце пути радиоактивного облака – самые мелкие частицы. Крупные частицы в основном оседают под действие силы тяжести.

При попадании радиоактивных аэрозолей в тропосферу происходит их глобальное «размывание» и перемещение током воздушных масс с большой скоростью, преимущественно по географическим параллелям от места взрыва. Тропосферный резервуар очищается сравнительно быстро, период полуочистки колеблется в пределах от 2 до 3 недель. Пребывание в тропосфере долгоживущих радионуклидов обычно не превышает 30 суток в результате вовлечения аэрозолей в процессы формирования облаков. В ряде случаев наблюдается более высокая скорость выпадения ^{90}Sr и ^{137}Cs из нижних слоев атмосферы – в течение 5 суток.

Радиоактивные выпадения стратосферного происхождения, попадая в тропосферу, в дальнейшем оседают на поверхность земли в основном в результате вымывания атмосферными осадками. Гравитационное оседание частиц, ушедших в стратосферу, происходит крайне медленно, на протяжении десятилетий. Среднее время пребывания радиоактивных веществ в стратосфере зависит от высоты и мощности взрыва, географической широты места проведения взрыва, времени года и метеорологических условий. Состав радионуклидов ядерного происхождения за время циркуляции в стратосфере меняется. Короткоживущие радионуклиды (наибольшая часть взрыва) распадаются, оставляя место цезий-стронциевым источникам глобального малоинтенсивного загрязнения среды.

Переход стратосферных радионуклидов в тропосферу с последующим осадением происходит преимущественно на широте 25–30 градусов в обоих полушариях с максимумом в Северном полушарии (рис. 9.2). Наибольшая часть выпадений (стратосфера – тропосфера – земная поверхность) смещается на широту 40–50°. При проведении взрывов в более высоких географических широтах среднее время пребывания в нижних слоях атмосферы обычно меньше (Северное полушарие – около 6 месяцев), чем при проведении ядерных взрывов в средних широтах (2–3 года).

Динамика глобальных выпадений меняется в течение года. Максимум приходится на нее ну и начало лета (1 и 2 кварталы – в Северном и 4 – в Южном полушариях). В средних широтах 60 % суммарного отложения радионуклидов за год приходится на весенние и летние месяцы. Скорость отложения радионуклидов измеряется в кБк на 1км^2 за единицу времени. (В

изменения собственно функций и структуры атмосферы радиационные загрязнения этого ряда существенного вклада не вносят).

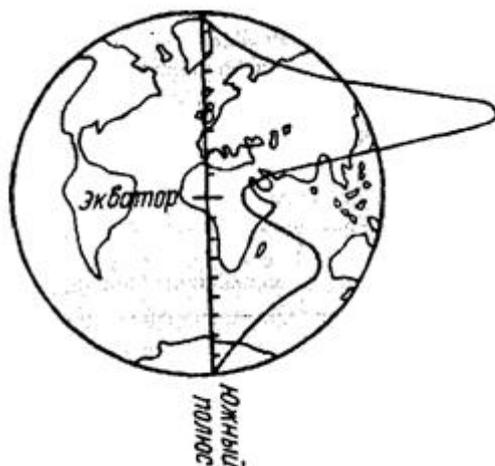


Рис. 9.2. Широтное распределение глобальных радиоактивных выпадений (для мелких аэрозолей, заброшенных в верхнюю атмосферу)

Выделяют два пути осаждения радионуклидов из атмосферы: мокрый и сухой.

При *мокром выпадении* радионуклиды поступают на поверхность земли с дождем, снегом, туманом. Вымывание радионуклидов атмосферными осадками обусловлено не только захватом радионуклидных частиц падающими каплями, но, прежде всего тем, что сами частицы, попав в зону облаков, становятся центрами конденсации. При мокром выпадении радионуклидов их размер равен 0,02–0,2 мкм. Интенсивность данного процесса, который определяет длительность пребывания вещества в атмосфере, может в значительной степени обуславливать характер поля выпадений и концентрации, переносимых по ветру веществ.

Удаление радиоактивных частиц и газов из атмосферы через выпадение осадков зависит от сложных микрофизических и микрохимических процессов. Эти процессы являются функцией условий как внутри, так и вне несущих природные облака слоев. К ним относятся образование капель на ядрах конденсации, диффузия газов и твердых частиц в облачные и дождевые капли, аэродинамический и электростатический захват, термофорез и диффузиофорез.

Сухое выпадение состоит в выпадении самих аэрозольных частиц и определяется в основном гравитационными силами, вертикальным движением воздушных масс, турбулентной диффузией. Процесс зависит от топографии района, высоты над уровнем моря и т. д. Удаление из атмосферы посредством сухого выпадения играет большую роль в пределах лежащего у поверхности слоя, где переносимая ветром радиоактивность может приходить в контакт с поверхностью посредством различных механизмов. Это диффузия, гравитационное оседание, столкновения, захват,

электростатические эффекты, диффузиофорез и термофорез. Эти процессы чрезвычайно сложны и мало изучены, поэтому их обычно моделируют через скорость осаждения, которую определяют, как поток осаждаемого вещества, деленный на концентрацию в воздухе.

Соотношение между сухим и мокрым отложением зависит от климатических условий. В местах с сухим климатом будет преобладать сухое осаждение, в местах, где отмечается повышенная влажность воздуха и часты осадки – мокрое осаждение.

Повторное загрязнение атмосферы радионуклидами

Выпавший на поверхность радиоактивный материал может впоследствии снова перейти в атмосферу под влиянием ветра и механических воздействий, обусловленных деятельностью человека. Процесс повторного перехода в суспензию может продолжаться над загрязненной территорией в течение длительного времени. Считается, что скорость ресуспензии зависит от типа почв, размеров частиц, влажности поверхности, силы ветра у поверхности и атмосферной стабильности, однако они также варьируют в пределах нескольких порядков величины [Уорнер Ф. и др., 1999; Люцко А.М. и др., 1996].

10. Поведение радионуклидов в почве

10.1. Миграция радионуклидов в почве

Радиоактивные вещества, попадающие в атмосферу, в конечном счете, концентрируются в почве. Они могут частично вымываться из почвы и попадать в грунтовые воды. Однако почва довольно прочно удерживает попадающие в нее радиоактивные вещества. От поведения радионуклидов в почве зависит их дальнейшая судьба: размеры вымывания их с осадками, миграция по почвенному профилю, степень перехода в прочносорбированное (фиксированное) состояние и интенсивность поступления в растения. Чем полнее радионуклиды поглощаются почвенным поглощающим комплексом ППК, чем прочнее они закрепятся в поглощенном состоянии, тем меньше будут вымываться с осадками, мигрировать по профилю почвы и в относительно меньших количествах будут поступать в растения.

Миграцию радионуклидов в почве можно рассматривать как непрерывно повторяющийся ряд процессов сорбции и десорбции под влиянием различных факторов, приводящих к их векторному переносу, рассеиванию и концентрированию.

Факторы, влияющие на миграцию радионуклидов разнообразны по природе и степени влияния. К ним относятся:

- физико-химические свойства радионуклидов;
- формы их нахождения в почве;
- физико-химические свойства почв (присутствие в почвенном растворе посторонних или конкурирующих катионов; величина рН; наличие в

растворе мигрирующих коллоидов; комплексообразующая способность растворенных органических веществ и др.);

- климатические и геоморфологические свойства (смена почв с глубиной, гидрология, характер подстилающих пород);

- тип растительности;

- хозяйственная деятельность человека.

Радионуклиды, входящие в состав первоначально осажденных частиц, будучи необратимо сорбированными почвенными частицами или находясь в ионообменных позициях в этих частицах, подвержены процессам, сопряженным с миграцией самих этих частиц. Те же радионуклиды, которые находятся в почвенном растворе или входят в органические комплексы, подвержены процессам, сопряженным с движением растворов [Анненков Б.Н. и др., 1991; Уорнер Ф. и др., 1999].

Важнейшие процессы, ответственные за миграцию радионуклидов в почве:

- сорбция;

- ресуспензия;

- перенос вещества (массоперенос и биотурбация);

- выщелачивание.

Сорбция. Возможность переноса радионуклидов в почвенном профиле зависит от их химической и биологической «доступности». Химически растворимая фракция радионуклидов в почве, доступная для переноса в потоке вещества, не всегда биологически доступна. Наиболее распространенным подходом в оценке величины сорбции является использование коэффициента распределения K_d , определяемого как отношение концентрации радионуклидов в твердой фазе (Бк/г сухой массы) и их концентрации в жидкой фазе растворов (Бк/мл). Радионуклиды с высокими значениями K_d (например, плутоний, цезий) в определенных условиях обычно незначительно мигрируют в почве и обладают большим потенциалом для ресуспензии, тогда как радионуклиды с низкими значениями K_d (например, стронций) активнее мигрируют в почве и обладают незначительной вероятностью быть вовлеченными в процесс ресуспензии.

Ресуспензия. Ресуспензия радионуклидов, связанных с частицами почвы, представляет собой механизм их выноса из рассматриваемой системы путем эрозии под воздействием воды или ветра и последующего загрязнения ими поверхности растений. Механизм ресуспензии обычно описывается с помощью эмпирического коэффициента ресуспензии (КР), определяемого как отношение концентраций радионуклидов в воздухе (Бк/м³) и на поверхности земли (Бк/м²).

Перенос вещества. Перенос вещества может проходить под воздействием физических механизмов (например, при передвижении частиц почвы через макропоры), а также в результате деятельности роющих организмов. Биотический перенос радионуклидов роющими организмами

или же в результате их жизнедеятельности может представлять собой весомый и быстрый путь миграции радионуклидов в поверхностном слое почвы. Для тех радионуклидов, которые внедряются в почвенные частицы и поэтому не выщелачиваются, вторичное распределение по почвенному профилю будет осуществляться в основном посредством массопереноса.

Выщелачивание – это вынос растворимого компонента из пористого твердого вещества просачивающейся водой. Определить выщелачивание радионуклидов из почвенного профиля в процессе выщелачивания достаточно трудно даже с помощью сложных моделей.

Скорость самоочищения почв от радионуклидов зависит от скорости их радиоактивного распада и миграционной способности. В тяжелых (глинистых и тяжелосуглинистых) почвах радионуклиды в течение длительного времени находятся в верхнем 10-сантиметровом слое целинных почв или в пахотном слое освоенных почв. В песчаных почвах они в течение первых десятилетий просачиваются в более глубокие слои и могут проникать в грунтовые воды. Миграция радионуклидов осуществляется с поверхностным стоком и ветровыми потоками, что приводит к расширению ареалов загрязнения.

10.2. Формы нахождения радионуклидов в почвах

Среди многообразия форм выделяют водорастворимую, обменную, необменную и прочносвязанную необменную. Под водорастворимой понимают ту часть радионуклидов, которые экстрагируются из почвы дистиллированной водой. Радионуклиды в обменной форме экстрагируются 1 н. раствором ацетата аммония, в необменной форме – 6 н. раствором соляной кислоты. Радионуклиды в необменной прочносвязанной форме способны экстрагироваться только смесью плавиковой и азотной кислот.

Среди этих форм наибольшую роль играют первые две, поскольку они способны усваиваться растениями и, следовательно, мигрировать по биологической цепочке. Каждый из радионуклидов присутствует в почве в водорастворимой, обменной и необменной формах одновременно, однако соотношение между этими формами для разных радионуклидов существенно различается.

Имеется классификация, которая построена в зависимости от наличия факторов, оказывающих влияние на поведение радионуклидов в системе почва-раствор (Тимофеев-Ресовский).

1. Zn, Cd, Co – обменный тип поведения, в почве могут закрепляться вследствие сорбции почвенными минералами – органоминеральные комплексы.

Na, Rb, Sr – обменный, механизм закрепления – ионный обмен. Характеризуются относительно слабым закреплением и высокой подвижностью. Важный фактор миграции – присутствие в растворе других катионов. В области микроконцентраций изменение их количества не влияет на процессы сорбции-десорбции.

Cs – имеет признаки обменного и необменного типа. Максимально важен признак миграции – изменение собственной концентрации.

Ce, Zn, Nb, Fe, Ru – многоморфный тип поведения, десорбция из почвенного фильтрата <10%, вытеснение катионами слабое, увеличение pH уменьшает их сорбцию.

Ag – многоморфный с переменной валентностью.

Радионуклиды, являясь изотопами химических элементов, характеризуются теми же свойствами, что и их стабильные изотопы.

10.3. Поглощение и закрепление радионуклидов почвами

Количественными критериями, описывающими процессы взаимодействия радионуклидов с почвами, являются полнота поглощения (сорбция) их ППК и прочность закрепления в поглощенном состоянии.

Емкость поглощения почвы зависит от содержания в ней высокодисперсных частиц. Фракция почвы, частицы которой крупнее 0,001 мм, обладает емкостью поглощения от 0,12 до 13,4 мг-экв., а фракция частиц меньше 0,001 мм – от 20,6 до 107,4 мг-экв. на 100 г. Почвы, содержащие большее количество высокодисперсных частиц (размером менее 0,001 мм), характеризуются высокой емкостью поглощения.

Радионуклиды в почве присутствуют в микроколичествах. Следовательно, в процессе поглощения микроколичества радионуклидов не конкурируют за места на поверхности сорбента, так как по отношению к ним насыщенность сорбента всегда остается очень низкой. В то же время, изменение концентрации макроэлементов в такой системе может существенно повлиять на распределение микроколичеств радионуклидов между раствором и сорбентом. Твердая фаза почвы довольно полно поглощает все радионуклиды (80–99 %), за исключением ^{106}Ru (50–60 %).

Об относительной подвижности радионуклидов в почве судят по *прочности закрепления* их в поглощенном состоянии, т. е. по их количеству, вытесненному из почвы водой или растворами различных солей. При сравнении способности радионуклидов к вытеснению из поглощенного состояния катионами солей наблюдаются более резкие различия в поведении в почвах микроколичеств радионуклидов.

Например, если сопоставить прочность закрепления в поглощенном состоянии долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs , то оказывается, что они неодинаково вытесняются из почвы. Из всех почв ^{90}Sr вытесняется в большем количестве, чем ^{137}Cs . Оба этих радионуклида поглощаются почвами по типу ионно-обменной сорбции. Однако поглощенный ^{137}Cs закрепляется прочнее, чем ^{90}Sr . Часть ^{137}Cs поглощается почвой в необменной форме.

На разных почвах прочность закрепления поглощенных радионуклидов неодинакова. Более прочно они закрепляются в черноземе. В дерново-подзолистой супесчаной почве радионуклиды находятся в наиболее подвижном состоянии.

10.4. Свойства почв, влияющие на поведение радионуклидов

К свойствам почвы, влияющим на поведение радионуклидов в почве, относятся кислотность почвенного раствора, величина емкости поглощения почв, состав обменных катионов, содержание органического вещества, гранулометрический и минералогический состав почв и др.

Реакция среды и состав обменных катионов – факторы, определяющие степень поглощения и прочность закрепления радионуклидов при их попадании в почву.

1) Кислотность почвенного раствора существенно влияет на процессы поглощения и закрепления радионуклидов почвой, следовательно, и на интенсивность перехода радионуклидов из почвы в растения. Из кислых почв радионуклиды поступают в растения в больших количествах, чем из почв слабокислых, нейтральных или слабощелочных. При увеличении кислотности почвы снижается прочность закрепления ППК ^{90}Sr и ^{137}Cs и соответственно возрастает интенсивность поступления их в растения. При повышении рН ряд радионуклидов переходит из ионной формы в различные гидролизные комплексные соединения, что снижает их доступность для растений. Кислотность оказывает и косвенное влияние на сорбцию почвами радионуклидов, изменяя емкость катионного обмена. Дерново-подзолистые почвы характеризуются высокой исходной кислотностью и слабой насыщенностью основаниями. Добавление извести в такую почву резко повышает долю прочно закрепленных радионуклидов в почве и способствует их переводу в необменное состояние [Анненков Б.Н. и др., 1991].

Известкование кислых почв не только создает условия для лучшего роста растений, но и является одновременно средством существенного уменьшения поглощения радионуклидов растениями из почвы. В среднем для большинства сельскохозяйственных растений минимум накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs отмечался при $\text{pH}_{\text{кк1}} - 6,7$, что на 0,7 выше агрохимического оптимума [Путятин Ю.В. и др, 2005].

2) Обменные ионы

Обменные ионы составляют небольшую часть от общего содержания химических элементов в почвах. Их количество измеряется единицами и десятками мг-экв на 100 г почвы.

На сорбционно-десорбционные процессы оказывают влияние присутствующие в почвенном растворе обменные катионы. Каждая почва в естественном состоянии содержит определенное количество обменно-поглощенных катионов. Преобладающими в ППК и играющими большую роль в почвенных процессах и формировании физико-химических свойств почв являются катионы: Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , Al^{3+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , в незначительных количествах Mn^{2+} , Fe^{2+} , а также Li^+ , Sr^{+2} и др. В большинстве почв среди них преобладает Ca^{2+} , второе место занимает Mg^{2+} , в некоторых почвах в поглощенном состоянии в значительном количестве содержится H^+ и обычно относительно немного Na^+ , K^+ , NH_4^+ и Al^{3+} . Общее количество всех поглощенных (обменных) катионов называется емкостью катионного обмена

(ЕКО), которая выражается в мг-экв на 100 г почвы. ЕКО сильно зависит от гранулометрического состава (чем тяжелее, тем выше ЕКО), от минералогического и химического состава почв, и увеличивается с ростом рН.

В поглощенном состоянии могут находиться и анионы (SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- и др.) на положительно заряженных участках коллоидной мицеллы.

На основании данных по сорбции можно выделить специфический вытеснитель или катион, который вытесняет данный изотоп в большей степени, чем другие. Такие вытеснители для ^{65}Zn , ^{137}Cs , $^{60}\text{Co} - ^{64}\text{Cu}$, для ^{85}Rb , $^{137}\text{Cs} - ^{42}\text{K}$, для $^{90}\text{Sr} - ^{45}\text{Ca}$. Чем больше в почве обменных катионов – элементов-носителей, тем меньше биологическая подвижность радионуклидов, и наоборот.

Степень сорбции радионуклидов зависит не только от количества обменных катионов, но и от содержания их в растворе. С увеличением концентрации сопутствующих катионов в растворе, уменьшается количество радионуклидов, сорбированных твердой фазой почвы (т. е. снижает сорбцию радионуклидов). Однако данная зависимость для разных радионуклидов различна.

3) Гранулометрический состав почв

На сорбционные процессы радионуклидов в почвах влияет гранулометрический состав почв. Это связано с тем, что отдельные фракции механических элементов различаются по химическому и минералогическому составу, а также по физико-химическим и физическим свойствам. Наиболее резкие различия наблюдаются между фракцией ила (<0,001) и остальными фракциями. Доля разных фракций в гранулометрическом составе почв неодинакова.

Установлено, что гранулометрический состав почвы больше влияет на прочность закрепления микроколичеств радионуклидов, чем на величину их поглощения. Тяжелыми почвами (тяжелосуглинистые и глинистые) поглощенные радионуклиды, особенно ^{137}Cs , сильнее закрепляются, чем легкими (песчаные и супесчаные). С уменьшением размера фракций почвы прочность закрепления ими ^{90}Sr и ^{137}Cs повышается. Наиболее прочно закрепляются радионуклиды илистой фракцией.

С уменьшением размеров частиц снижается содержание оксида кремния, возрастает количество полуторных оксидов железа и алюминия и, что особенно важно для процессов сорбции радионуклидов, повышается содержание гумуса и обменных катионов кальция, магния и калия.

4) Минералогический состав почв

Известно, что отдельные фракции почв различаются не только размером частиц, но и физическими, химическими свойствами и минералогическим составом.

Содержание в илистой фракции почв минералов монтмориллонитовой группы, а также слюд и гидрослюд – одна из основных причин более прочного закрепления микроколичеств ^{90}Sr и ^{137}Cs этой фракцией.

Наибольшей поглотительной способностью по отношению к макроколичествам радионуклидов, как и к макроэлементам, обладают минералы монтмориллонитовой группы и группы гидрослюд. Минералы каолиновой группы и группы слюд характеризуются меньшей сорбционной способностью по отношению к макро- и макроколичествам катионов, находящихся в почве.

Различия в полноте сорбции радионуклидов и в степени их закрепления разными минералами обусловлены, прежде всего, неодинаковой структурой кристаллической решетки минералов. Минералы монтмориллонитовой группы благодаря строению кристаллической решетки отличаются интрамицеллярным поглощением и поэтому не только более полно сорбируют макроколичества радионуклидов, но и более прочно закрепляют их в поглощенном состоянии, чем минералы других групп.

Различают интрамицеллярное и экстрамицеллярное поглощение.

Интрамицеллярное поглощение – это вхождение катионов внутрь кристаллической решетки минералов. *Экстрамицеллярное поглощение* – поглощение катионов на поверхности слоев кристаллической решетки минералов. Минералы монтмориллонитовой группы поглощают 97–98 % радионуклидов, гидрослюды – 80–88 %, полевой шпат – 10–50 % ^{90}Sr от внесенного. ^{137}Cs более прочно сорбируется почвами, чем ^{90}Sr , что связано с прочной сорбцией радиоцезия минеральной частью, особенно высокодисперсными фракциями, содержащими минералы монтмориллонитовой группы и группы гидрослюд.

5) В почве содержание органического вещества невелико и колеблется от 2 до 10–12 %. Органическое вещество почвы имеет сложный состав: неразложившиеся, полуразложившиеся растительные остатки, микроорганизмы и гумус. Органическое вещество может оказывать существенное влияние на миграцию радионуклидов. Влияние почвенного органического вещества на миграцию радионуклидов зависит от их взаимодействия с отдельными компонентами органического вещества, может проявляться различным образом, в зависимости от физико-химических свойств радионуклидов и свойств органического вещества.

Некоторые компоненты гумуса (лигнин, белки и др.) могут содержать функциональные группы (NH_2 -, OH -, COOH -) которые способны образовывать координационные связи с металлами. В зависимости от свойств радионуклидов могут образовываться комплексные соединения, обладающие различной растворимостью. Чаще всего, органические вещества с радионуклидами образуют относительно легко растворимые соединения. Таким образом, комплексообразование вызывает ускоряющее действие на скорость миграции радионуклидов. Наличие органического вещества в почве способствует увеличению поглощения ^{90}Sr и снижает сорбцию ^{137}Cs .

Наибольшим содержанием органического вещества обладают мелко пылеватые и илистые частицы. В более крупных фракциях (средней и

крупной пыли) содержание гумуса резко падает, во фракции мелкого песка гумуса практически нет.

б) Динамика свойств почвы во времени

С течением времени после попадания радионуклидов в почву изменяются их физико-химические формы, радионуклиды становятся менее доступными растениям, происходит так называемый процесс их «старения» в почвах (вхождение их в кристаллическую решетку глинистых минералов, ионный обмен, химическое осаждение). В течение года постоянно меняются температура и влажность, от которых зависит миграция радионуклидов. Эти показатели влияют на изменение валентности отдельных элементов и радионуклидов, степень их подвижности и количество потребления растениями и микроорганизмами.

Большая часть радионуклидов при взаимодействии с почвой довольно быстро переходит из водорастворимой формы в обменную. Затем часть радионуклидов переходит из обменной в необменную форму.

Таблица 10.1

Соотношение форм радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве

Время взаимодействия	Обменная форма	Необменная форма	Фиксированная форма
1 год ^{90}Sr	93 %	6 %	1 %
^{137}Cs	50 %	29 %	21 %
5 лет ^{90}Sr	85 %	12 %	3 %
^{137}Cs	22 %	13 %	65 %
7 лет ^{90}Sr	76 %	20 %	4 %
^{137}Cs	21 %	9 %	70 %

Формы нахождения радионуклидов в почве определяют дальнейшее поведение их в почвенном покрове и миграцию по почвенному профилю.

7) Наличие живого вещества

В состав живой фазы почв входят почвенные водоросли, грибы, бактерии, актиномицеты, мезо- и микрофауна, вирусы и фаги. Взаимодействие с радионуклидами почвенных микроорганизмов и неживого органического вещества имеет различия. Микроорганизмы поглощают ионы радионуклидов, включают их в метаболические процессы и после отмирания возвращают их в несвязанном состоянии. Похоже на сорбцию радионуклидов органическим веществом, но есть отличия. Микроорганизмы избирательно поглощают химические соединения и радионуклиды. Поглощение радионуклидов микроорганизмами связано с их развитием (при благоприятных условиях).

8) Определенный вклад в миграцию радионуклидов вносит их передвижение по корневой системе растений. Действие этого фактора во многом определяется количеством и массой корневых систем, и

количественно сравнивают с величиной конвективного переноса и диффузией. В случае малого объема и массы корневых систем – не влияют на процессы миграции. По корневой системе растений мигрируют водорастворимые и обменные фракции радионуклидов.

Кроме этого, на миграцию радионуклидов влияет *хозяйственная деятельность человека*.

9) Диффузия и конвективный перенос

Формы нахождения радионуклидов в почвах (обменные, необменные и прочно фиксированные), физико-химические свойства почв и агрометеорологические условия влияют на механизм миграции, диффузии в почвенном растворе и твердой фазе почвы и конвективный перенос с током воды при фильтрации через почву атмосферных осадков.

Диффузия радионуклидов в почве – самопроизвольное выравнивание их концентрации в системе при соприкосновении с почвенными частицами путем проникновения молекул одного вещества в другое. Диффузионным путем передвигаются радионуклиды в водорастворимой и обменной форме.

Конвекция радионуклидов в почве – перенос их массы движущимися потоками пара или жидкости. Конвективный перенос важен для тех радионуклидов, которые находятся в почве в водорастворимом и частично в обменном состоянии. Один из факторов, влияющий на миграцию радионуклидов путем конвективного переноса – избыточная влажность.

Все формы радионуклидов в почвах, включая необменные и прочно фиксированные фракции, способны переноситься с коллоидными частицами.

Скорость диффузии зависит от типа почв и их свойств, а также от влажности и температуры почв. Различные радионуклиды в почвах одного и того же типа имеют разную скорость миграции. Величина коэффициента диффузии ^{137}Cs ($5,4 \cdot 10^{-10} - 5,8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$) значительно ниже, чем ^{90}Sr ($0,4 \cdot 10^{-7} \dots 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$).

Мероприятия по предотвращению и снижению токсикологического действия радионуклидов и тяжелых металлов направлены на снижение их подвижности в почвах и поступления в растения. К ним относятся известкование кислых почв, внесение органических и минеральных удобрений, внесение мелиорантов – высокоемкостных минералов (искусственных и природных цеолитов), захоронение загрязненного слоя на глубину 40-50 см и др.

11. Поступление радиоактивных веществ в растения

Важнейшую роль в проникновении радионуклидов в растения играют два фактора: растворимость (от нее зависит биологическая доступность) и биологическая подвижность соединений, в которые входят радионуклиды. *Биологическая подвижность* – это способность радионуклида избирательно накапливаться живыми организмами и перемещаться в пищевых цепях. Наибольшей биологической подвижностью обладают биогены – химические элементы, абсолютно необходимые для существования живых организмов и

обязательно входящие в состав их тканей. Таких элементов около двадцати: кислород, углерод, водород, кальций, калий, фосфор, магний, сера, хлор, натрий, железо и др. Высокой биологической подвижностью обладают радиоактивные элементы, химические свойства которых сходны со свойствами биогенов (например, йод, цезий, стронций и др.).

Существуют два пути поступления радиоактивных веществ в растения: корневой и некорневой или аэральный (воздушный).

11.1. Некорневой путь поступления радиоактивных веществ в растения

Воздушное (аэральное) радиоактивное загрязнение растений происходит в результате выпадения радиоактивных осадков из атмосферы. В стратосферных и тропосферных выпадениях, в осадках от подводных и надводных ядерных взрывов, а также в продуктах аварийных выбросов ядерно-топливных систем радионуклиды находятся в растворимой, доступной для усвоения растениями форме. Среди них встречаются биологически подвижные ($^{129,131}\text{I}$, ^{14}C , ^3H , ^{22}Na , $^{89,90}\text{Sr}$, $^{134,137}\text{Cs}$). Для некоторых из таких радионуклидов внекорневое поступление является основным, как, например, для радиоуглерода (^{14}C), который переходит в растения из углекислого газа в процессе фотосинтеза.

Особенность некорневого пути поступления заключается в том, что при непосредственном оседании радиоактивных частиц из различных слоев атмосферы происходит загрязнение наземной массы растений всеми выпавшими радионуклидами. Дальнейшая миграция радиоактивных аэрозолей, выпавших из атмосферы на поверхность Земли, зависит от их физико-химических свойств.

Радиоактивные частицы, выпадающие из атмосферы, не полностью задерживаются на растениях. Часть их оседает на поверхности почвы, минуя растения. Степень удержания радиоактивных веществ на растениях характеризуется величиной первичного удержания.

Первичное удержание – это отношение количества осевших на растения радионуклидных частиц к общему их количеству, выпавшему из атмосферы на данную площадь. *Коэффициент первичного удержания* определяется соотношением плотности выпадений (количество радиоактивности выпавшей на единице площади – A_p) и плотностью радиоактивного загрязнения растительной массы (A_r):

$$K = A_r / A_p.$$

Первичное удержание радиоактивных частиц надземной растительной массой варьирует от нескольких процентов до 95 %. Удерживающая способность растительного покрова зависит от фитомассы, морфологии растений, размеров и агрегатного состояния радиоактивных частиц, метеорологических условий в момент выпадения радиоактивных осадков. Установлено наличие тесной зависимости между урожайностью надземной

массы и величиной первичного удержания радиоактивных осадков растительностью.

В процессах первичного взаимодействия радионуклидных аэрозолей с поверхностью растений большое значение имеют их физико-химические свойства и дисперсность.

Так, первичное удержание водорастворимых форм радиоактивных веществ, выпадающих в виде дождя, в 4–7 раз выше, чем удержание твердых радиоактивных нерастворимых частиц, размером 30–70 мкм. С увеличением размера частиц уменьшается их удержание растениями.

Попавшие на поверхность растений радионуклиды слабо закрепляются. Сразу после их осаждения происходит снижение уровня загрязнения растений. Удаление радионуклидных осадков с поверхности растений идет по следующим причинам:

Воздействие внешних факторов (ветер, осадки).

Радиоактивный распад короткоживущих изотопов.

3. В результате биологических процессов, связанных с ростом и развитием растений (увеличение биомассы, опад отмерших частей, загрязненных органов растений).

Снижение радиоактивности растений, обусловленное 1-м и 3-м факторами, называется *полевыми потерями*. Скорость удаления радиоактивных веществ с поверхности растений выражают *периодом полупотери* – это время, в течение которого количество активности на поверхности растений уменьшается на 50 %. Период полупотери, как и в целом, полевые потери, определяется физико-химическими свойствами радионуклидов, биологическими особенностями растений и метеорологическими факторами. Максимальное снижение активности при аэрозольном загрязнении растений – первые 2–3 суток. Для более мелких частиц – больше, чем для крупных.

После первых 7 суток влияние (1) на потери радиоактивных частиц незначительны, полевые потери за этот период составляют 70–90 % от общего количества. Радиоактивные осадки, выпавшие в виде твердых оплавленных частиц, удаляются быстрее, чем аэрозольные формы радионуклидов. Общим законом является то, что величина радиоактивного загрязнения растений и скорость полевых потерь с течением времени снижаются.

Характер процесса потерь радионуклидов, задержанных растительностью, довольно сложен. Практически существует две фракции радионуклидов, сорбированных растениями, которые существенно отличаются прочностью фиксации. Наиболее быстро теряется та часть радионуклидов, которая остается в свободном, несвязанном, состоянии на поверхности кутикулы (кутикула – бесцветная пленка бесструктурного вещества, непроницаемая ни для воды, ни для газов). Именно за счет скорости потери этой фракции в основном и определяется первый период полупотери. Затем начинается потеря более прочно закрепленной части

радионуклидов. Процесс потерь, фиксированных радионуклидов в основном определяется их физико-химическими свойствами и биологическими особенностями растений.

Радиоактивные вещества, выпавшие на поверхность почвы из атмосферы и осевшие с поверхности растений, могут служить существенным источником повторного механического их загрязнения уже после прекращения выпадения радиоактивных осадков. Загрязнение растений радиоактивной пылью происходит при поднятии ее с поверхности земли ветром, пасущимися животными, при разбрызгивании каплями дождя и обработке или уборке урожая сельскохозяйственными машинами [Анненков Б.Н., 1991].

Высокой подвижностью в растениях обладают радионуклиды Cs, I и Th, низкой – радионуклиды Sr, Se и Ba. Через листья в растения проникает от 20 % до 60 % ^{137}Cs , а ^{90}Sr – всего лишь сотые доли процента [Белов А.Д. и др., 1999]. Естественный травостой удерживает 30–40 % выпавшего количества гамма-излучающих нуклидов и около 30 % ^{137}Cs . Сеяные многолетние травы удерживают соответственно 20–40 % и 7–15 %.

Большая часть ^{90}Sr , выпавшего из атмосферы, концентрируется в месте оседания, внутри растения он «малоподвижен». Поэтому концентрация этого радионуклида во внешних листьях капусты может в 5–6 раз превышать концентрацию в самом кочане, а в ботве картофеля она может быть в 80 раз выше, чем в клубнях. Зерно сельскохозяйственных культур с закрытыми семенами (горох, кукуруза) при выпадениях ^{90}Sr из атмосферы на поверхность растений практически не загрязняется.

В то же время аэральное загрязнение некоторых сельскохозяйственных растений аэрозолями ^{90}Sr и ^{137}Cs весьма опасно. Это практически все ягоды, фрукты, овощные культуры, товарная часть продукции которых не защищена (капуста, томаты, огурцы).

Цезий (^{137}Cs) загрязняет урожай не только механически, но, как аналог калия, включается в метаболизм, передвигается в растения, накапливается в урожае.

Йод (^{131}I) очень активно перемещается по растению. Попадая в организм человека и сельскохозяйственных животных, он накапливается в щитовидной железе, которая постоянно производит йод содержащие гормоны и концентрирует в себе йод, в том числе и радиоактивный. Довольно много йода концентрируется в молоке, вместе с которым он может попадать в организм человека. Из-за высокой активности ^{131}I очень опасен. Однако вследствие короткого периода полураспада (около 8 суток) его содержание в почве, растительности, кормах, животных и сельскохозяйственной продукции очень быстро снижается.

Радионуклиды эффективнее проникают в растения при мокрых выпадениях, так как при высокой влажности устьица растений открываются, причем через устьица проникают не только биологически активные нуклиды.

По той же причине при сухих выпадениях эффективность перехода радиоактивных веществ в растения значительно возрастает после дождя.

Большое значение в накоплении растениями радионуклидов имеет фаза вегетации. Листья молодых растений поглощают радионуклиды в больших количествах, чем листья растений, заканчивающих рост и развитие.

Накопление радионуклидов зависит и от возраста растений, так как старые стебли и листья дольше подвергались действию выпадений. Поэтому регулярно поедаемая скотом, и возобновляющаяся трава пастбищ менее активна, чем нетронутый травостой.

С накоплением радионуклидов в течение нескольких лет связана и более высокая радиоактивность хвои, чем листвы листопадных деревьев средней полосы.

Существуют и заметные различия в способности адсорбировать радионуклиды на поверхности растений. Связано это с морфофизиологическими особенностями покровов. Чем больше на листьях волосков, четче выражено жилкование, рассеченность и рельеф поверхности, тем больше задерживается на них радионуклидов. Чем выше гидрофобность поверхности, тем меньше на нем задерживается влага с растворенными и ней нуклидами. Так, активность листьев картофельной и свекловичной ботвы, которые легко смачиваются, выше активности плохо смачиваемых листьев белокочанной капусты или красного клевера.

При некорневом загрязнении растительности радионуклидами переход их из корма в организм животных и продукцию животноводства, как правило выше, чем при корневом поступлении.

11.2. Корневой путь поступления радиоактивных веществ в растения

Почва является мощным «фильтром», задерживающим значительные количества радионуклидов. Эта ее особенность связана со свойством почвенных частиц, особенно глинистых и гумусовых, адсорбировать на себе радиоактивные вещества, резко снижая их подвижность и вероятность перехода в растения.

Для оценки поступления радионуклидов из почвы в растения используют **коэффициент накопления (КН):**

содержание радионуклида в единице массы растений

содержание радионуклида в единице массы почвы

Для большинства радионуклидов коэффициент накопления меньше 1, так как биологически активными срединих являются только ^3H , ^{40}K , ^{14}C , ^{22}Na . Кроме них, хорошо усваиваются растениями ^{90}Sr – химический аналог кальция, и ^{137}Cs – химический аналог калия. Эти радионуклиды вместе со своими неизотопными носителями избирательно поглощаются организмами из окружающей среды.

Влияние особенностей почв района выпадений на накопление радионуклидов растениями

Различные типы почв обеспечивают значительные различия в поступлении радиоактивных веществ в растения – чем выше адсорбция радионуклида почвой, тем меньше его поступает в растительность.

Адсорбирующая способность почв зависит от их химического состава, кислотности, структуры дисперсности. Роль химического состава проявляется в конкуренции за «право адсорбции» на частицах почвы со стабильными изотопами или химическими аналогами, а от рН зависит растворимость нуклидов. Так, стронций, рубидий и цезий в кислых почвах примерно в 10 раз доступнее для растений, чем в известковых. Черноземы характеризуются высоким содержанием глин и гумуса, которые обладают большой емкостью поглощения радионуклидов, а легкие супеси – низкой емкостью. Накопление радиоактивных веществ растениями равномерно снижается в ряду почв: супеси, дерново-подзолистые, серые лесные, сероземы, каштановые, черноземы [Симаков С.В. и др., 1998].

Большинство искусственных радионуклидов прочно сорбируются почвенным поглощающим комплексом и включаются в биологический круговорот в сравнительно небольших количествах. Исключение составляют ^{65}Zn , ^{89}Sr и ^{90}Sr , отличающиеся наибольшей подвижностью в системе «почва – растение». Из большинства типов почв поступление ^{137}Cs в растения, как правило, меньше или соизмеримо с поступлением ^{90}Sr . Но в определенных почвенно-климатических условиях перенос ^{137}Cs из почв в растения может значительно превосходить перенос ^{90}Sr . На легких по механическому составу песчаных почвах накопление ^{137}Cs растениями в 40–50 раз больше, чем ^{90}Sr .

Из растворов поглощение корнями растений радионуклидов происходит в больших количествах, чем из почв. По интенсивности поступления из водных растворов в растения пшеницы радионуклиды располагаются в следующем порядке: $^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr} > ^{144}\text{Ce} > ^{106}\text{Ru} > ^{95}\text{Zr}$. При этом ^{90}Sr и ^{137}Cs активно перемещаются по всему растению, а ^{106}Ru и ^{95}Zr накапливаются преимущественно в корнях и далее практически не транспортируются. По сравнению с водными растворами поступление радионуклидов в растения из почвы резко уменьшается. Это уменьшение для ^{90}Sr составляет примерно 20 раз, для ^{137}Cs и ^{144}Ce – сотни и даже тысячи раз.

Влияние биологических особенностей растений на накопление ими радиоактивных веществ

Разные виды растений очень сильно различаются по способности накапливать радионуклиды, что, с одной стороны, обусловлено особенностями их физиологии и биохимии, с другой – морфологией растений (общая площадь поверхности листьев, сорбирующая способность покровов, характер распределения корней в почве и т. п.). Кроме того, существуют значительные различия в концентрации радиоактивных веществ в тканях, которые могут различаться по этому показателю в 10–30 раз.

Чем больше в растениях в норме содержится кальция, тем сильнее при недостатке кальция они поглощают из почвы стронций. Аналогичная, хотя и не столь строгая зависимость существует для пары «калий-цезий».

Кроме того, поступление радионуклидов зависит от распределения корневых систем в почве, продуктивности растений, продолжительности вегетационного периода и других биологических особенностей. Стронций (^{90}Sr) и ^{137}Cs интенсивнее накапливаются бобовыми, чем злаковыми. Травянистые растения большинства других семейств чаще занимают по этому показателю промежуточное положение.

В различных частях растения радионуклиды накапливаются неравномерно, поэтому разные корма, приготовленные из одного вида растения (солома, отруби и зерно, например), содержат неодинаковое их количество. Наиболее интенсивно радионуклиды накапливаются в листьях и стеблях, слабее – в корневой системе, еще меньше их содержится в генеративных органах растений (цветках, плодах, семенах).

После аварии в течение первого сезона вегетации больше всего радионуклидов на единицу сухой массы урожая накапливается в овощах и фруктах с незащищенными плодами и ягодами (капуста, томаты, огурцы, кабачки, яблоки, смородина и т. п.), меньше их в корнеплодах (свекла, морковь), затем идут бобовые с защищенными семенами (горох, соя), за ними картофель. Меньше всего загрязняется товарная продукция зерновых культур. Причем в озимых зерновых радионуклиды накапливаются в 2–2,5 раза меньше, чем в яровых (это связано с более высокой урожайностью).

Влияние агротехники на переход радионуклидов в растения

Способы обработки почв и мелиорации сильно влияют на агрохимические и водно-физические свойства почвы, что изменяет интенсивность перехода радионуклидов из почвы в растения.

Так, орошение резко увеличивает скорость этого процесса – в 1,5–3 раза при поверхностных способах полива: напуском, по бороздам, по чекам, и в 100–1000 при дождевании.

На поглощение радионуклидов растительностью влияет и характер их распределения в верхнем слое почвы. Специальные приемы обработки почвы позволяют значительно сократить поступление радиоактивных веществ в растения. В частности, при заглубленной вспашке с фрезерованием без переворота пласта снижается концентрация радиоактивных веществ за счет их более равномерного распределения в почве. При заглубленной вспашке с переворотом пласта происходит захоронение загрязненного почвенного слоя за пределами распространения основной массы корней, что уменьшает поступление радионуклидов в растения примерно в 10 раз.

Значительное снижение радиоактивной загрязненности растительности обеспечивает внесение удобрений. Этот эффект обусловлен улучшением условий питания растений и связанным с этим увеличением биомассы («эффект разбавления»).

Уменьшению поступления ^{90}Sr в растения (до 2–3-кратного) способствует внесение известковых удобрений, что объясняется конкуренцией стронция и кальция при их усвоении корневыми системами, а также уменьшением растворимости (а, следовательно, подвижности и

биологической доступности) соединений стронция при повышении рН, вызванном известкованием.

Внесение минеральных азотных удобрений либо не оказывает существенного влияния на усвоение растениями радионуклидов, либо даже увеличивает его. Объясняется это увеличением потребности в калии и кальции, наличие которых становится лимитирующим фактором, что влечет за собой возрастание поступления в растение их химических аналогов – цезия и стронция.

Добавление в почву чистых органических удобрений в виде навоза, перегноя, низинного торфа уменьшает поступление стронция и цезия в фитомассу в 2–3 раза. Связано это с тем, что органическое вещество почвы обладает способностью сорбировать на себе радионуклиды.

В общем можно сказать, что мероприятия, способствующие повышению плодородия почв и получению максимального урожая, одновременно способствуют уменьшению накопления в растительности радионуклидов.

11.3. Факторы, влияющие на накопление радионуклидов в растительных кормах и периоды в развитии радиационной ситуации

Важнейшими среди них являются следующие:

- общее количество выпавших радионуклидов;
- состав выпадений (физико-химические свойства выпавших нуклидов);
- особенности почв района выпадений;
- способы агротехники, применяемые в данном районе;
- видовые и сортовые особенности растения.

При радиационной аварии в агропромышленном комплексе выделяют *несколько периодов в развитии радиационной ситуации*.

Первый период – период йодной опасности. Он наблюдается сразу после выброса радионуклидов в атмосферу. Вследствие короткого периода полураспада изотопов йода этот период непродолжителен и завершается в течение нескольких месяцев. При поедании животными загрязненных йодом кормов происходит его интенсивный переход в молоко и мясо.

Второй период начинается после распада короткоживущих радионуклидов и сопровождается преимущественно некорневым загрязнением кормовых угодий. Заканчивается этот период с завершением первого послерадиационного срока вегетации растений.

Третий период радиоэкологической ситуации в агропромышленном комплексе начинается со второго срока вегетации растений после радиационных выпадений. В этот период основным путем поступления радионуклидов в растения является корневой. Продолжительность периода может быть несколько десятков лет, если в составе аварийных выбросов присутствует большое количество долгоживущих изотопов ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{239}Pu и др. [Белов А.Д. и др., 1999].

11.4. Миграция радионуклидов в травяных и лесных экосистемах

Большинство искусственных радиоизотопов прочно сорбируются почвенным поглощающим комплексом, поэтому эффективно включаются в биологический круговорот только цинк, стронций и цезий, а так как ^{65}Zn образуется обычно в небольших количествах, то практическое значение имеют в основном два изотопа: ^{90}Sr и ^{137}Cs .

Особенности накопления, миграции, почвенной адсорбции радионуклидов, видового состава и продуктивности растительности пастбищных экосистем обуславливают существенные различия между ними по накоплению радионуклидов в пастбищной растительности и их переходу в организм сельскохозяйственных животных.

Наиболее безопасными в районах радиоактивного заражения являются **окультуренные пастбища**. Этому способствует то, что на них производится комплекс агротехнических мероприятий, таких, как обработка почвы, при которой радионуклиды распределяются в поверхностном слое и лучше закрепляются на измельченных частицах почвы; удобрение и известкование, обеспечивающие понижение pH и улучшение адсорбции нуклидов почвенными частицами. Кроме того, весь агротехнический комплекс способствует повышению продуктивности растительности, при этом удельная концентрация радиоактивных веществ в надземной фитомассе уменьшается.

Достаточно быстро снижается концентрация радионуклидов в травостое **заливных лугов**. С одной стороны, повышенная влажность почвы на них способствует большей растворимости и подвижности радионуклидов и их переходу в растения. С другой – этому противостоит большая продуктивность растительности и высокие темпы оборота органического вещества – большая часть органики заливных лугов ежегодно перегнивает, и нуклиды, входящие в ее состав, переходят в почву и в значительной мере исключаются из биологического круговорота.

Опаснее в подобной ситуации проводить выпас на **суходольных пастбищах**. Здесь ежегодно до 60–80 % органики может не утилизироваться, оставаясь на поверхности в виде ветоши, которая тоже способна адсорбировать радионуклиды, но при этом они остаются доступными для сельскохозяйственных и диких животных.

Важную роль играет также продуктивность пастбища и степень сомкнутости травостоя. Это связано с тем, что сельскохозяйственные животные во время выпаса заглатывают частицы почвы, содержащей связанные радионуклиды. Так, за сезон через желудок коровы в лесостепной зоне проходит порядка 600 кг почвы, через желудок овцы или козы – 70–80 кг. Чем беднее пастбище, тем ниже приходится животным скусывать растения и тем больше нуклидов попадает им в желудочно-кишечный тракт.

Для снижения опасности вовлечения радионуклидов в животноводческие пищевые цепи применяют скашивание трав в течение

двух недель после разового выпадения с их последующей уборкой и захоронением.

Радиоактивное загрязнение лесных фитоценозов

При попадании радиоактивных веществ на территории лесных массивов значительная часть радионуклидов опускается и задерживается кронами деревьев, осаждаются на листьях, хвое и коре, другая их часть попадает под полог деревьев в травяной покров, лесную подстилку и почву. Доля радионуклидов, задерживающихся в пологе леса, варьирует в зависимости от состава, сомкнутости, формы и фазы вегетации древесной растительности. На опушке леса с наветренной стороны до 50 м в глубь леса их задерживается 2–10 раз больше, чем в лесных массивах. Плотность радиоактивного загрязнения в наветренных опушках иногда в 30 раз выше, чем на открытых территориях.

В наземной части древесно-кустарниковой растительности при внешнем загрязнении радионуклиды частично проникают в их внутренние ткани. В результате через год после выпадения радиоактивных веществ доля их в кронах, особенно в лиственных насаждениях, снижается в несколько раз. Соответственно возрастает загрязненность лесной подстилки и почвы. На глубине до 5 см сосредоточивается более 90 % радионуклидов. В хвойных лесах самоочищение происходит медленнее. Обычно на это требуется 3–4 года.

Перемещаясь в лесной подстилке и почве, радионуклиды ими прочно фиксируются. Обычно они проникают до глубины 10 см. В последующем лес надежно предотвращает перенос радионуклидов с водой и ветром, способствуя тем самым стабилизации радиоэкологической обстановки на загрязненных землях. Однако со временем в загрязненном лесу усиливается процесс корневого поступления радионуклидов в лесную растительность. Так, через 6 лет после чернобыльских выпадений содержание радионуклидов в древесине возросло в 5–15 раз. Поступление радионуклидов в древесную растительность из почвы зависит от ряда факторов: физико-химических свойств радионуклидов, биологических особенностей древесных пород и условий их произрастания.

12. Поступление радиоактивных веществ в организм сельскохозяйственных животных

12.1. Факторы, определяющие степень поражения организма животных

На организм сельскохозяйственных животных воздействует ионизирующая радиация из внешних и внутренних источников. *Источниками внешнего облучения* являются радионуклиды, распределенные в различных компонентах окружающей среды (приземном слое атмосферы, почве, растительности, подстилке, жилых и производственных сооружениях и т. д., а также осевшие на шерсть и кожу). *Источниками внутреннего*

облучения служат радионуклиды, инкорпорированные (включенные) в различные части тела, органы и ткани животных.

Основными факторами, определяющими степень поражения, являются: уровень загрязнения (количество выброшенных или выпавших радионуклидов), характер распределения загрязняющих веществ в окружающей среде, степень сродства элементного состава нуклидов к живому веществу и вид возникающих внешних и внутренних излучений.

12.2 Пути поступления радиоактивных веществ в организм животных

Существует три пути поступления радиоактивных веществ в организм: с кормом и водой через пищеварительный тракт, с воздухом через дыхательную систему и через кожные покровы.

Продукция животноводства является одним из основных источников поступления радиоактивных веществ в организм человека. Так, по данным Научного комитета ООН по действию атомной радиации, во многих регионах молоко является главным источником поступления в организм ^{131}I (до 70–90 %), мясо и мясопродукты – ^{137}Cs (до 60–80 %), с мясом и молоком в организм поступает до 40–60 % от общего поступления ^{90}Sr .

Хотя радионуклиды могут поступать в организм тремя путями: через желудочно-кишечный тракт, через органы дыхания и через кожу, основным путем их проникновения является пероральный (от 96 до 100 %), поэтому мы рассмотрим преимущественно его. При этом необходимо учитывать, что пероральное поступление с водой играет второстепенную роль из-за слабой растворимости большинства соединений, в которые входят радионуклиды.

Соотношение значимости различных путей поступления радионуклидов в организм животных примерно следующее: желудочно-кишечный тракт – 1000; органы дыхания – 1; кожа – 0,0001.

При попадании нуклидосодержащих пылевых частиц в дыхательные пути основная их часть не доходит до альвеол, задерживаясь слизью мерцательного эпителия и движением его ресничек выводится в носоглотку. Впоследствии большая часть этой слизи заглатывается животными и попадает в желудочно-кишечный тракт.

Перенос энергии пищи от ее источника-автотрофов (растений) – через ряд организмов, происходящий путем поедания одних организмов другими, называется пищевой цепью. При каждом очередном переносе большая часть (80–90 %) потенциальной энергии теряется, переходя в тепло. Поэтому чем короче пищевая цепь (чем ближе организм к ее началу), тем больше количество энергии, доступной для популяции. Пищевые цепи можно разделить на два основных типа: пастбищная цепь, которая начинается с зеленого растения и идет далее к пасущимся растительноядным животным (т. е. к организмам, поедающим живые растительные клетки или ткани) и к хищникам (организмам, поедающим животных), и детритная цепь, которая от мертвого органического вещества идет к микроорганизмам, а затем к

детрито-фагам и к их хищникам. Пищевые цепи не изолированы одна от другой, а тесно переплетаются друг с другом, образуя так называемые пищевые сети.

Для количественного описания перемещения радиоактивных веществ по пищевым цепям используются различные коэффициенты, в частности коэффициент накопления/дискриминации (КН/КД) – отношение содержания нуклида в единице массы организма к содержанию этого же нуклида в единице массы организмов предыдущего трофического уровня (для сельскохозяйственных пастбищных животных – в травяной растительности).

При длительном (хроническом) поступлении радиоактивных веществ применяют специальный коэффициент, который носит название кратность накопления (F). Он представляет собой отношение содержания радионуклида в органе или ткани (С) к ежесуточному поступлению этого нуклида в организм (Q).

$$F = CM/Q,$$

где F – количество радионуклида, поступающего в организм животных ежедневно, Бк;

C – концентрация радионуклида в органе или ткани, Бк/кг; M – масса органа или ткани, г.

12.3. Всасывание радионуклидов в желудочно-кишечном тракте

Важнейшую роль в пероральном поступлении играет механизм всасывания нуклидов в желудочно-кишечном тракте. Основным местом их всасывания у свиней является желудок, а у крупного рогатого скота, овец и коз – рубец, книжка и тонкий кишечник. При этом скорость и эффективность резорбции нуклидов у свиней с их однокамерным желудком выше, чем в четырехкамерных желудках жвачных.

По величине резорбции в желудочно-кишечном тракте сельскохозяйственных животных радиоизотопы могут быть расположены в ряд: йод, цезий, кальций, стронций, цинк, кобальт, железо, марганец, барий, рутений, цирконий, церий, иттрий, плутоний. ^{131}I , ^{137}Cs , ^{45}Ca , $^{89,90}\text{Sr}$, ^{65}Zn , ^{60}Co , ^{59}Fe , ^{54}Mn , ^{140}Ba , ^{106}Ru , ^{95}Zr , ^{144}Ce , ^{90}Y , ^{239}Pu .

Для оценки биологической подвижности радионуклида используют коэффициент всасывания:

$$f_{\text{BC}} = A/B \times 100\%,$$

где A – количество перешедших в кровь радионуклидов, Бк;

B – количество радионуклидов, поступивших с суточным рационом, Бк.

Все элементы I (щелочные) и VII (галогены) основных групп Периодической системы, а также все элементы 1 (H) и 2 (Li, B, C, N, O, F) периодов, за исключением Be и инертных газов, почти полностью всасываются в желудочно-кишечном тракте. Слабее, хотя и достаточно хорошо всасываются элементы II главной группы (Mg, Ca, Sr, Ba, Ra).

Элементы всех других групп, за немногими исключениями, всасываются весьма плохо.

Существует высокая изменчивость поступления радиоизотопов в организм в зависимости от вида и возраста животного. У моногастричных животных и птиц коэффициенты всасывания значительно выше, чем у жвачных. Например, взрослые коровы, овцы, козы, свиньи и куры усваивают соответственно 8, 7, 6, 19 и 59 % радиостронция и 60, 57, 69, 100 и 67 % радиоцезия.

Молодые особи усваивают радионуклиды интенсивнее, чем взрослые. Кроме того, фиксация нуклидов в организме у них происходит полнее. Уменьшение всасываемости радионуклидов в желудочно-кишечном тракте связано с меньшей потребностью взрослого организма в минеральных веществах, а также ухудшением проницаемости мембран кишечной стенки.

12.4. Распределение и метаболизм радиоактивных веществ в организме

Всосавшиеся в желудочно-кишечном тракте радионуклиды разносятся кровью по всем органам и тканям. Распределение нуклидов по органам и тканям тесно связано с их природой и ритмом поступления в организм. Щелочноземельные радиоизотопы (^{7}Be , ^{45}Ca , ^{90}Sr , ^{140}Ba , ^{140}Ra) концентрируются в минеральном компоненте костной ткани, редкоземельные (^{48}V ванадий, ^{75}Se селен, ^{76}As мышьяк, ^{125}Sb сурьма, ^{238}U уран) – в печени и ретикулоэндотелии, йод – в щитовидной железе, а ^{137}Cs , щелочные металлы, тритий и радиоуглерод распределяются в организме более равномерно.

При длительном поступлении радионуклидов в организм их концентрация в органах может быть значительно выше, чем при разовом (до 30–50 раз). В условиях длительного поступления рано или поздно наступает момент, когда уровень поступления изотопа оказывается равен его выведению. Для ^{90}Sr такое равновесное состояние наступает на 5–7 сутки у крупного и мелкого рогатого скота и на 30–90 сутки у свиней и кур. Для ^{137}Cs оно наступает позднее: у овец и коз к 105 суткам, у крупного рогатого скота – к 150 суткам с начала поступления.

Накопление радиостронция в организме животных при его хроническом поступлении зависит от состояния кальциевого обмена. При дефиците кальция его место занимает стронций. Насыщение кальцием дефицитного по этому элементу рациона позволяет уменьшить поступление ^{90}Sr в организм в 2–4 раза. Однако этот эффект достигается лишь в том случае, если кальция до этого в кормах явно не хватало.

Сходная зависимость характерна для метаболизма радиоцезия. Так, известно, что у животных, таких, как КРС, козы и овцы, питающихся грубыми и сочными кормами, богатыми калием, химическим аналогом которого является Cs, коэффициенты накопления в организме ^{137}Cs значительно меньше, чем у кур, свиней, собак и человека.

12.5. Выведение радионуклидов из организма животных

Радионуклиды, поступившие в организм, выводятся через желудочно-кишечный тракт, почки, легкие, кожу и молочную железу. К этим путям можно добавить выведение радионуклидов с плодом при родах и с яйцом у кур-несушек.

Ведущим путем выведения для большинства радиоизотопов является желудочно-кишечный тракт. Помимо выведения с экскрементами не всосавшихся в ЖКТ радионуклидов, этим путем выделяются и экскретирующиеся через стенки желудка и кишечника стронций, рубидий и другие изотопы. Изотопы йода и цезия экскретируются из организма преимущественно через почки. При этом существуют видовые, возрастные и физиологические особенности выведения разных нуклидов. Например, ^{137}Cs у жвачных выводится преимущественно через желудочно-кишечный тракт, а у свиней – с мочой. Актирующие коровы через молочную железу выводят всего лишь 3,2 % ^{131}I , в то время как овцы и козы – 20,5 и 40 %.

Выведение радиоизотопов из организма сельскохозяйственных животных с молоком имеет большое практическое значение, так как молоко и молочные продукты являются важными источниками поступления радионуклидов в организм человека. По степени перехода радионуклидов в молоко радиоизотопы образуют ряд: $^{131}\text{I} > ^{43}\text{Ca} > ^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr} > ^{99}\text{Mn} > ^{106}\text{Ru} > ^{140}\text{Ba} > ^{144}\text{Ce}$. При этом интенсивность выведения того или иного изотопа существенно колеблется и определяется в основном формами, в которых он находится в организме.

Для количественного описания скорости, с которой организм освобождается от радионуклидов, используют специальный показатель – период полувыведения (Т). Различают *биологический период полувыведения* ($T_{\text{биол}}$ – время, в течение которого концентрация нуклида снижается вдвое в результате процессов метаболизма, и *эффективный период полувыведения – время*, за которое из организма выбывает 50 % первоначального количества нуклидов как за счет метаболического выведения, так и за счет физического распада.

Быстрее всего организм освобождается от радионуклидов, накапливающихся в мягких тканях, таких, как цезий, йод, молибден. Остеотропные радионуклиды, такие, как стронций, выводятся гораздо медленнее. Так, у крупного рогатого скота для ^{137}Cs $T_1 = 3$ сут. $T_2 = 46$ сут, в то время как для ^{90}Sr T_1 превышает 3000 сут (Т – период полувыведения).

Так как содержание радионуклидов в продукции животноводства находится в прямой зависимости от содержания их в растениях и почвах, то для составления прогноза вероятностного поступления радионуклидов в рацион животных необходимо располагать данными о количественном переходе разных радионуклидов из почв в корма и продукцию животноводства. Это осуществляется с помощью коэффициентов перехода – отношение содержания радионуклида в каждом последующем звене пищевой цепи к предыдущему.

13. Действие ионизирующих излучений на биологические объекты. Прямое и косвенное действие ионизирующих излучений

13.1. Общие аспекты действия ионизирующего излучения

Ионизирующие излучения, обладают высокой биологической активностью. Они способны вызывать ионизацию любых химических соединений биосубстратов, образование активных радикалов и этим индуцировать длительно протекающие реакции в живых тканях. Поэтому результатом биологического действия радиации является, как правило, нарушение нормальных биохимических процессов с последующими функциональными и морфологическими изменениями в клетках и тканях животного и человека.

В механизме биологического действия ИИ на живые объекты условно можно выделить два основных этапа.

Первый этап – первичное (непосредственное) действие излучения на биохимические процессы, функции и структуры органов и тканей.

Второй этап – опосредованное действие, которое обусловливается нейрогенными и гуморальными сдвигами, возникающими в организме под влиянием радиации.

В настоящее время признаны две теории механизма первичного (непосредственного) действия ионизирующей радиации – теории прямого и косвенного действия излучений на составляющие молекулы вещества.

13.2. Прямое и косвенное действие ионизирующих излучений

Прямое действие ионизирующих излучений – такие изменения, которые возникают в результате поглощения энергии излучения самими молекулами, а поражающее действие связано с актом возбуждения и ионизации атомов и макромолекул (т.е. с утерей или приобретением электрона самими рассматриваемыми молекулами («мишенями»).

Косвенное (непрямое) действие ионизирующих излучений – изменения молекул клеток и тканей, вызванные продуктами радиационного разложения (радиолиза) окружающей эти молекулы воды и растворенных в ней низкомолекулярных соединений, а не энергией излучения, поглощенной самими исследуемыми молекулами.

На основе представления о прямом действии ИИ возникла теория мишени и попаданий. Эта теория объясняла наличие в клетке жизненно важного центра (гена или ансамбля генов) – мишени, попадание в которую одной или нескольких высокоэнергетических частиц атомной радиации достаточно для разрушения и гибели клетки. Попадание в мишень – вероятностное событие. Дальнейшим развитием теории прямого действия излучений явилась стохастическая (вероятностная) теория. Она, так же, как и теория мишени, учитывает вероятностный характер попадания излучения в чувствительный объем клетки, но в отличие от нее еще учитывает и состояние клетки как биологического объекта, лабильной динамической системы [Белов А.Д. и др., 1999].

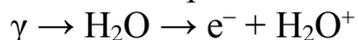
При косвенном действии ИИ наиболее важен процесс радиолиза (радиационного разрушения) воды, потому что вода составляет основу важнейших структур клетки (80–90 %). Именно в воде растворены белки, нуклеиновые кислоты, ферменты, гормоны и другие жизненно важные вещества, являющиеся основными компонентами клетки, которым легко может быть передана энергия, первоначально поглощенная водой [Белов А.Д. и др., 1999].

Под действием ионизирующего излучения в клетке начинаются физико-химические процессы, в результате которых образуются химически высокоактивные соединения, радикалы и ионы, повреждающие биологические структуры организма и вызывающие рассогласование его функций [Симак С.В. и др., 1998].

Воздействие ионизирующей радиации на живое вещество проходит в три фазы: в физическую – длится 10^{-13} – 10^{-16} с; в фазу первичных физико-химических превращений – 10^{-6} - 10^{-9} с; в фазу химических реакций – 10^{-5} - 10^{-6} с.

Физическая фаза по существу – один из моментов прямого действия ИИ на молекулярные и биологические структуры клетки. При взаимодействии ИИ (гамма-кванты, заряженные частицы, и т. д.) с электронными оболочками атомов происходит возбуждение и ионизация атомов или молекул вещества, через которые излучения проходят. При этом на один акт ионизации приходится 10–100 возбужденных атомов, которые в процессе рекомбинации излучают избыток энергии в виде характеристического рентгеновского излучения.

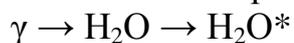
В физическую фазу происходит взаимодействие ИИ с молекулой воды, в результате чего выбивается электрон с внешней орбиты атома и образуется положительно заряженный ион воды:



«Выбитый» электрон присоединяется к нейтральной молекуле воды, образуя отрицательный ион воды:

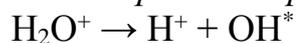


При эффекте возбуждения образуется нейтрально заряженная молекула воды с избытком энергии, привнесенной ИИ:



Физико-химические свойства ионизированных и возбужденных молекул воды будут отличаться от молекул воды электрически нейтральных. Продолжительность существования таких молекул очень короткая; они распадаются (диссоциируют), образуя высокореактивные свободные радикалы водорода и гидроксила (H^* и OH^*); наступает вторая фаза радиолиза воды.

Фаза первичных физико-химических реакций:



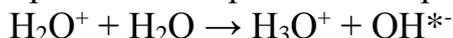
Гидроксильные радикалы (OH^*) - сильные окислители, а радикал водорода (H^*) – восстановитель. Образование свободных радикалов может идти и другим путем. Выбитый из молекулы воды под действием излучения электрон может присоединиться к положительно заряженному иону воды с образованием возбужденной молекулы:



Избыточная энергия этой молекулы расходуется на ее расщепление с образованием свободных радикалов водорода и гидроксила:

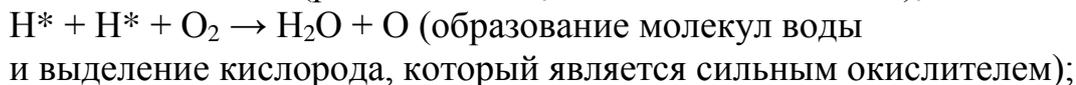


Ионизированная молекула воды (H_2O^+) может реагировать с другой нейтральной молекулой воды (H_2O), в результате чего образуется высокореактивный радикал гидроксила (OH^*):



На этом заканчивается физико-химическая фаза и развивается третья фаза действия ионизирующего излучения.

Фаза химических реакций. Обладая очень высокой химической активностью за счет наличия неспаренного электрона, свободные радикалы взаимодействуют друг с другом или с растворенными в воде веществами. Реакции могут идти следующими путями:

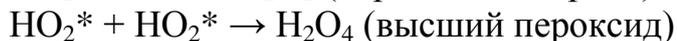
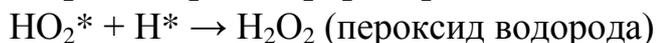
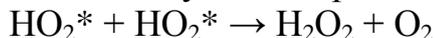


При наличии в среде растворенного кислорода O_2 возможна реакция образования гидропероксидов:



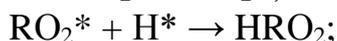
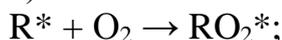
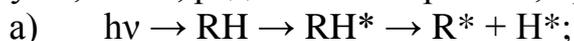
Эта реакция указывает на роль кислорода в повреждающем эффекте ИИ.

Гидропероксиды могут взаимодействовать между собой, образуя пероксиды водорода и высшие пероксиды, которые обладают высокой токсичностью, но они очень быстро разлагаются в организме ферментом каталазой на воду и кислород:



Появление свободных радикалов и их взаимодействие составляют этап первичных химических реакций воды и растворенных в ней веществ, а в случаях облучения животных и растений – и биологических молекул.

Энергия излучения может поглощаться и непосредственно молекулами органических соединений. При этом также образуются возбужденные молекулы, ионы, радикалы и перекиси, при реакциях типа:



- б) $h\nu \rightarrow \text{RH} \rightarrow \text{RH}^+ + \text{e}^-$;
 в) $h\nu \rightarrow \text{RH} \rightarrow \text{R}^- + \text{H}^+$
 г) $\text{RH} + \text{H}^* \rightarrow \text{R}^* + \text{H}_2$
 д) $\text{RH} + \text{OH}^- \rightarrow \text{R}^* + \text{H}_2\text{O}$

Возможна также диссоциация органических молекул или присоединение к ним радикала. В результате они либо разрушаются, либо инактивируются, теряя свои биологические свойства.

Энергия излучения, поглощенная молекулой белка или нуклеиновой кислоты, может передаваться ее структурами, разрушая молекулу в определенных, наиболее уязвимых местах по вышеприведенной схеме.

Таким образом, первичные процессы, происходящие в организме непосредственно в момент действия излучения, заключаются в образовании возбужденных молекул, ионов, радикалов и перекисей (рис. 13.1).

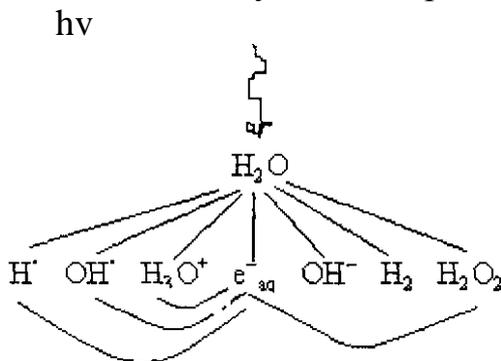


Рис. 13.1. Продукты радиолитиза воды

На биологической стадии воздействия эти высокоактивные в химическом отношении соединения вступают в реакции с компонентами сложных биохимических систем живого организма, что приводит к нарушениям химических процессов и структур клеток и, как следствие, – к нарушению функций на уровне целостного организма.

Величина прямого и непрямого действия в первичных радиобиологических эффектах различных систем неодинаковая. В абсолютно чистых сухих веществах будет преобладать прямое, а в слаборастворенных – косвенное действие радиации. У животных, поданным МА Кузина, примерно 45 % поглощенной энергии излучения действует непосредственно на молекулярные структуры – прямое действие, а остальные 55 % энергии непрямо действие.

13.3. Эффект разведения и кислородный эффект

О различии прямого и косвенного действия радиации на биологические объекты и величине их влияния на развитие лучевого поражения можно судить по двум феноменам – эффекту разведения и кислородному эффекту.

Эффект разведения

При косвенном действии радиации, независимо от разведения раствора, абсолютное число поврежденных молекул остается постоянным, а доля их от общего числа изменяется обратно пропорционально их концентрации.

При прямом действии радиации число инактивированных молекул при заданной дозе увеличивается пропорционально концентрации раствора, а их доля от общего числа молекул остается постоянной.

Кислородный эффект

В развитии первичных реакций при облучении биообъектов большое значение имеет концентрация кислорода в среде. С повышением его концентрации в окружающей среде и объекте облучения усиливается эффект лучевого поражения, и наоборот, при понижении концентрации кислорода наблюдается уменьшение степени лучевого поражения. Выраженность кислородного эффекта у разных видов излучений неодинаковая и зависит от их линейной передачи энергии (ЛПЭ); с повышением ее эффект уменьшается. При действии излучений с малой плотностью ЛПЭ наблюдается наибольший эффект, а при воздействии излучений с высокой ЛПЭ он полностью отсутствует.

В присутствии кислорода происходит значительное усиление косвенного действия продуктов радиолиза воды и низкомолекулярных органических соединений. Свободные радикалы, взаимодействуя с кислородом, образуют гидропероксиды, пероксиды и высшие пероксиды, которые оказывают токсическое действие на организм. Наличие кислорода в облучаемой среде усиливает также прямое действие радиации. При попадании гамма-кванта в молекулу органического вещества так же, как и в случае с водой, образуются активные радикалы в результате ионизации и возбуждения молекул. Эти радикалы, взаимодействуя с кислородом, образуют гидропероксиды и пероксиды (ROO^*), которые приводят к глубокому изменению молекул [Белов А.Д. и др., 1999].

14. Радиационные повреждения ДНК и проявления лучевого поражения на уровне клетки

При облучении клетки поражаются все ее структуры. Вероятность поражения тех или иных молекул определяется их размером: чем крупнее молекула, тем, естественно, больше вероятность ее повреждения. Именно поэтому в качестве основной мишени радиационного поражения клетки рассматривается ДНК.

С позиций радиобиологии важен факт теснейшего пространственного расположения различных частей одной и той же молекулы ДНК в интерфазной клетке и в хромосоме и, кроме того, близкое расположение молекул ДНК, принадлежащих разным хромосомам.

14.1. Виды радиационных повреждений ДНК

В результате прямой ионизации самой молекулы ДНК и ее атаки радикалами OH^* происходит разрыв химических связей между атомами. Разрыв связей в сахарофосфатном скелете нарушает непрерывность нити ДНК. Если разорвана одна из нитей, говорят об *однонитевом или одиночном*

разрыве. Совпадение разрывов противоположных нитей ДНК в одной точке приводит к появлению *двойных (двунитевых)* разрывов.

Известно, что **одиночные разрывы** постоянно возникают в клетке и без всякой связи с облучением, просто вследствие тепловой нестабильности ДНК, а также в результате некоторых окислительных и ферментативных процессов. Более того, одиночные разрывы даже необходимы: при репликации ДНК молекула должна быть расплетена на участке синтеза, для чего одна нить должна иметь возможность вращаться относительно другой, чего невозможно достичь без ее разрыва.

Предполагается, однако, что *при* облучении возникают не только одиночные разрывы, аналогичные возникающим спонтанно, но еще появляются «комплексные», при которых в скелете ДНК рядом находится сразу несколько разорванных связей; такие разрывы репарируются хуже, чем возникающие в нормальных условиях.

Двойные разрывы образуются как при случайном пространственном совпадении одиночных разрывов в противоположных нитях ДНК (вероятность которого возрастает с увеличением накопленной дозы редкоизирующего излучения), так и вследствие одномоментного повреждения обеих нитей при выделении в данном микрообъеме клетки большого количества энергии. Даже при действии редкоизирующих излучений выделение энергии по объему клетки происходит не абсолютно равномерно, а дискретными порциями разной величины, так что в примерно равном объеме атомам может быть передано от нескольких электрон-вольт до нескольких сот электрон-вольт. При действии плотноизирующих излучений общее число разорванных межатомных связей будет таким же, однако они будут менее равномерно распределены по длине молекулы ДНК. Общее число очагов поражения будет меньшим, зато «тяжесть» (концентрация разорванных межатомных связей на единицу микрообъема) каждого из них будет больше. Таким образом, при действии плотноизирующих излучений число двойных разрывов на единицу дозы оказывается выше, чем при действии редкоизирующих видов радиации. Так как одиночные разрывы репарируются гораздо лучше, чем двойные, тяжесть поражения клетки с увеличением доли двойных разрывов возрастает. Именно это и служит причиной более высокой относительной биологической эффективности плотноизирующих излучений.

Нарушение непрерывности молекулы ДНК препятствует считыванию с нее генетической информации (если разрыв приходится на транскрибируемый участок генома), а также нормальной репликации ДНК и последующему распределению генетического материала между клетками. Разрыв скелета может сопровождаться разрывом связей в той части молекулы дезоксирибозы, которая не участвует в построении скелета ДНК. Такое повреждение рассматривается одновременно и как разрыв, и как повреждение нуклеотида.

Разрывы скелета ДНК частично элиминируются самостоятельно, частично с помощью систем ферментативной репарации. Репарация не всегда заканчивается восстановлением исходной молекулы. Вместо воссоединения разорванной связи может возникнуть связь между свободными концами двух противоположных нитей молекулы ДНК, между свободными концами в местах разных разрывов одной и той же нити ДНК и даже между свободными концами разных молекул ДНК. Такое разнообразие новых связей является следствием того, что нити ДНК в ядре упакованы весьма плотно. Неправильное воссоединение разрывов приводит к возникновению хромосомных перестроек (аббераций).

14.2. Восстановительные процессы в облученной клетке

За миллионы лет эволюции живые организмы выработали специальные механизмы исправления поврежденных в результате действия ионизирующей радиации клеточных элементов. Такой процесс называется репарация (восстановление).

Принято выделять два вида репараций – от сублетальных и от потенциально летальных повреждений.

Сублетальные повреждения – нарушения, которые сами по себе не вызывают гибель организма (клетки), но увеличивают ее вероятность. Примером сублетальных повреждений может служить поражение клеточных мембран или органелл (кроме ядра).

Потенциально летальные повреждения – нарушения, которые сами по себе способны вызывать гибель организма или клетки, но в определенных условиях могут быть отрепарированы. Например, двойные разрывы ДНК являются абсолютно летальными повреждениями, если клетка вступила в митотическое деление. Однако они могут быть репарированы за время, оставшееся до деления клетки. Если этот период (интерфазу) искусственно удлинить, то вероятность успешной репарации увеличивается. Замедление темпов клеточного деления можно достичь, например, понижением температуры или введением специальных химических веществ – ингибиторов деления.

Первичные повреждения в молекулах ДНК удаляются и замещаются нормальными структурами в результате трех процессов:

- 1) Возвращения молекулы ДНК к исходному состоянию.
- 2) Вырезания поврежденного участка и замещения его нормальным.
- 3) Рекомбинированного восстановления – в обход поврежденного участка.

Репарация от радиационных повреждений ДНК осуществляется ферментами, постоянно участвующими в метаболизме клетки, в том числе в восстановлении от повреждений нерадиационной природы (химической, термической, стрессовой, ошибок считывания и т.д.).

Известно несколько различных по своим механизмам репарационных систем.

Фотореактивация заключается в устранении одного из типов повреждений ДНК – пиримидиновых димеров. После попадания кванта радиации в молекулу пиримидинового основания (тимина, цитозина или урацила) в ней разрывается двойная связь между 5-м и 6-м атомами углерода. Если два разрыва происходят в двух соседних молекулах тимина, то разорванные связи могут замкнуться друг на друге, образуя прочную ковалентную связь между двумя основаниями – димер тимина. Аналогично возникают димеры цитозина или тимин-цитозин и т.д. После этого расхождение нитей ДНК и, следовательно, самоудвоение ДНК или считывание закодированной в ней информации становится невозможным.

У растений такие дефекты устраняет фермент фотолиаза, названный так из-за того, что он использует энергию видимого света или ближней ультрафиолетовой радиации (300–600 нм).

Темновая система репарации значительно сложнее. В процессе темновой репарации ДНК выделяют 2 этапа.

1) Выщепление поврежденного участка (димера пиримидинового основания и олигонуклеотидного фермента) с помощью ферментов нуклеаз.

2) Застройка образовавшегося пробела с помощью комплементарного участка противоположной нити ДНК при участии комплекса ферментов, основными из которых у эукариот являются β - и γ -ДНК-полимеразы, а у прокариот – ДНК-полимераза-1 и полинуклеотидлигазы.

Существует еще целый ряд менее изученных репарационных систем, действующих в разные фазы клеточного цикла.

Поскольку постлучевая репарация – процесс ферментативный, ее интенсивность, и судьба облученной клетки зависят от общего уровня клеточного метаболизма и активности ферментов. Следовательно, важную роль в поддержании эффективности систем репарации играет общий уровень метаболизма, в первую очередь – белкового обмена. Это связано с тем, что при недостаточном поступлении в организм незаменимых аминокислот нарушается синтез белков, в том числе и ферментов. Поэтому полноценное белковое питание играет важную роль в системе постлучевых терапевтических мероприятий. Для нормального обмена веществ важна также сбалансированность рациона по витаминам и минеральным элементам.

14.3. Задержка прохождения клеточного цикла

Жизненный цикл клетки, период от одного деления до другого, подразделяется на четыре фазы: предсинтетический период (G_1), период синтеза ДНК (S-период), постсинтетический период (G_2) между окончанием синтеза ДНК и вступлением клетки в митоз (M). Схема генерационного цикла представлена на рисунке (14.1).

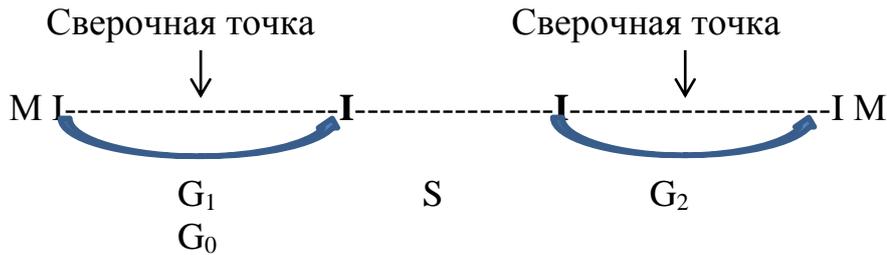


Рис. 14.1. Схема митотического цикла:

M – митоз; G_1 , – предсинтетический (по отношению к синтезу ДНК) период; S – стадия синтеза ДНК; G_2 – постсинтетический период; G_0 – период покоя

Общая длительность цикла культивируемых *in vitro* опухолевых клеток человека, с которыми проводится основная масса радиобиологических экспериментов, составляет около 24 ч, при длительности периода $G_1 \approx 10$ ч. Клетки опухолей человека лимфоидного происхождения могут иметь цикл короче 10 ч.

Быстро делящиеся клетки, особенно стволовые, имеют укороченный период G_1 , в то время как дифференцированные клетки имеют столь длинный период G_1 , что его обозначают как G_0 и называют стадией покоя.

В медленно обновляющихся тканях большинство клеток находится в G_0 периоде, т. е. периоде покоя; его длительность составляет недели, месяцы и даже годы (например, клеток ЦНС). «Покоящиеся» клетки – это резерв репопуляции, они переходят к синтезу ДНК и делению в случае гибели от различных причин части клеточного пула. Таков, например, механизм посттравматической регенерации тканей или возобновления роста опухоли после ее облучения.

В клеточном цикле имеется несколько так называемых контрольных точек, «чекпойнтов» (англ. check point – пост контроля на границе), при прохождении которых ферментативные системы проверяют ДНК на повреждения, и в случае их выявления активируют ингибиторы циклинзависимых киназ, что замедляет переход клеток из одной фазы в другую. Вероятно, замедление перехода дает больше возможности для репарации повреждений ДНК, возникающих в процессе нормальной жизнедеятельности клетки. При нанесении клетке значительного количества повреждений эта система также приводит к задержке прохождения цикла, но, по-видимому, не может обеспечить необходимый уровень восстановления. Блок в прохождении цикла нагляднее всего проявляется в виде задержки наступления первого постлучевого митоза. Фиксация поведения облученных клеток с помощью специальных видов видеосъемки показывает, однако, что при одной и той же дозе облучения клетки с длительной задержкой продвижения по циклу (более поздним наступлением митоза) впоследствии погибают с большей вероятностью, чем клетки с меньшей задержкой.

14.4. Радиационная задержка клеточного деления

Снижение числа делящихся клеток после облучения было замечено уже вскоре после открытия рентгеновских лучей, что послужило одним из оснований к их применению для подавления опухолевого роста. Задержка в наступлении очередного деления наблюдается почти у всех клеток облучаемой популяции, причем ее длительность зависит от дозы ионизирующего излучения.

В ходе многочисленных исследований было установлено, что длительность задержки деления у некоторых видов клеток меняется в зависимости от стадии клеточного цикла, в которой они находились при облучении, у других она относительно постоянна при облучении во время всей интерфазы.

Например, при наблюдении за клетками рака мочевого пузыря человека в течение нескольких генерационных циклов были получены следующие данные. При облучении этой популяции клеток из 231 клетки сохранили способность к делению в ряду нескольких поколений всего 12 клеток, потомство которых образовало колонии, состоящие из более чем 50 клеток каждая. В этой группе клеток задержка в прохождении цикла была относительно небольшая, они вошли в деление через 17–22 ч после предыдущего ($19 \pm 2,5$ ч). У остальных клеток, которые в дальнейшем погибли, облучение привело к значительной задержке наступления первого митоза. У клеток, облученных в период G_1 , задержка митоза составила около 7 ч, в поздней S- и G_2 -фазе она достигла 20–25 ч; наибольшую задержку испытывали клетки, подвергшиеся облучению в середине S-периода – в среднем она была равна 35 ч. Часть клеток погибла в интерфазе, причем не по апоптотическому пути, а по некротическому.

Различным видам клеток свойственны разные реакции на облучение.

Пока известны только отдельные факты, ответственные за задержку в прохождении клеточного цикла. Существенная роль в этом отводится системе обнаружения дефектов ДНК в контрольных точках цикла во время прохождения клеткой периодов G_1 и G_2 . Раньше считалось, что задержка в продвижении по циклу дает клетке больше времени для репарации ДНК перед S-фазой или митозом, когда целостность молекулы ДНК особенно значима для нормальной жизнедеятельности. Однако данные о более длительной задержке в наступлении митоза у погибающих впоследствии клеток по сравнению с сохраняющими клонотенный потенциал указывают, по-видимому, на более глубокое повреждение ДНК данной клетки.

Причины значительной задержки деления у клеток, облученных в середине S-фазы, неясны. Высказано лишь предположение, что она может быть связана с периодом клетки от репликации эухроматина к репликации гетерохроматина (эухроматин, составляющий около 90 % ДНК клетки, транскрипционно активен и в интерфазе находится в деконденсированном состоянии; гетерохроматин транскрипционно неактивен и в интерфазном ядре находится в конденсированной форме, что различимо при световой

микроскопии). Однако изучению дифференциальной чувствительности эу- и гетерохроматина к облучению еще только начинают уделять внимание, и данное предположение лишь указывает на то, что этот вопрос поднимается в литературе.

В практическом плане, например, при планировании экспериментов с определением хромосомных aberrаций в облученных клетках и выборе времени их фиксации, упрощенно принимается, что для асинхронной популяции нелимфоидных клеток задержка в наступлении митозов составляет 1 ч на 1 Гр дозы излучения.

14.5. Мутации и хромосомные aberrации

Формирование под влиянием радиации разрывов ДНК является первым шагом формирования ХА. Именно «пропущенные» репарационными системами или неправильно восстановленные разрывы реализуются в форме различных типов ХА. Некоторые из них могут быть летальными и будут успешно «отфильтрованы» на протяжении нескольких клеточных делений, а другие же оказываются нелетальными и могут запускать каскад генетических явлений, в число которых входит и малигнизация клеток.

Повышенный выход частоты ХА может быть связан не столько с индукцией мутагенеза, сколько с ослаблением репарационных механизмов. Предполагается, что ряд заболеваний, в том числе и эндокринные патологии (сахарный диабет, (онко)патологии щитовидной железы, аутоиммунный тиреоидит и др.), сопряжены с возникновением нарушений на молекулярном уровне и их фенотипической реализацией в многокомпонентной системе ферментативных механизмов, обеспечивающих репарацию ДНК, уровень эффективности которой является определяющим критерием для сохранения генетической стабильности клетки.

Возникающие в клетке aberrации подразделяют на хромосомные и хроматидные. *Хромосомные aberrации* возникают в случае, когда клетка подверглась облучению на предсинтетической стадии цикла или в S-период, но до начала удвоения определенного участка своего генома. При неверном воссоединении оторванных друг от друга фрагментов ДНК такое нарушение воспроизводится во время репликации (удвоения). Итогом является образование дицентрических, кольцевых хромосом и ацентрических колец, что может сопровождаться появлением ацентрических фрагментов (парных фрагментов).

Хроматидные aberrации возникают в клетке, облученной уже после завершения репликации всей ДНК или того ее участка, разрыв которого и приведет к формированию aberrации. Разрыв одной из хроматид проявляется в виде ее укорочения и образования одиночного ацентрического фрагмента. Разрыв обеих хроматид может проявиться различным образом – образованием двух фрагментов, их слиянием в один или соединением сестринских хроматид.

Аберрации, сопровождающиеся образованием ацентрических фрагментов, дицентрических и кольцевых хромосом, получили название *нестабильных*, так как приводят к гибели самой облученной клетки или ее ближайших потомков из-за невозможности равномерного распределения генетического материала между дочерними клетками. Перестройки, сопровождающиеся только перемещением участков пораженных хромосом, когда весь генетический материал остается связанным с центромерой и может распределяться между дочерними клетками, относят к стабильным аберрациям, так как они могут передаваться в ряду клеточных поколений, сохраняясь в организме в течение многих лет. Примером являются **транслокации**, когда участок генома перемещается в новое для него место, но продолжает функционировать. Такие транслокации возникают при неверном соединении участков как одной и той же хромосомы, так и нескольких хромосом вследствие трех и большего числа разрывов в геноме одной клетки.

Изучение транслокаций стало возможным благодаря разработке методов дифференцированной окраски отдельных участков хромосом (метод G-дифференциальной окраски). В настоящее время одним из наиболее современных методов анализа хромосомных перестроек является использование флуоресцентной метки, присоединенной к фрагментам ДНК, комплементарным для ДНК определенных участков генома. Для него обычно используют английское название – FISH.

Наиболее широко хромосомные аберрации используют в биодозиметрии для оценки поглощенных доз при облучении человека. Тест проводят в культуре лимфоцитов периферической крови. Первостепенную роль при биодозиметрических исследованиях играет учет именно дицентрических и кольцевых хромосом, возникновение которых специфически сопряжено с воздействием радиации или очень небольшой группы радиомиметиков. При этом необходимо учитывать наличие парных фрагментов (при их отсутствии в клетках первого митоза можно говорить о наличии указанных аберраций в стволовой клетке, так как в процессе дифференциации вероятность потери фрагментов выше, чем центрических маркеров). Количество маркеров радиационного воздействия возрастает в зависимости от дозы согласно линейно-квадратичному закону ($Y = \alpha D + \beta D^2$). По мере увеличения дозы возрастает число разрывов ДНК и соответственно вероятность их взаимодействия между собой, которая зависит от квадрата дозы. При смертельной для человека дозе редкоизионизирующих излучений 4,5–5 Гр на каждый делящийся лимфоцит приходится в среднем одна аберрация. Метод дает возможность оценить полученную дозу, начиная с 0,25 Гр.

Особую трудность для анализа представляют клетки с множественными аберрациями. Частота их растет пропорционально дозе и зависит от типа излучения. Высокоэнергетические α и β -частицы вызывают существенно более значимое увеличение частоты таких клеток по сравнению

с γ -квантами. Существует предположение, что на основании указанного различия возможно провести биологическую идентификацию источника излучения.

Из ацентрических фрагментов хромосом, которые из-за отсутствия центромера не были распределены по ядрам дочерних клеток и остались в цитоплазме, образуются так называемые микроядра, представляющие собой глыбки хроматина, располагающиеся в цитоплазме интерфазной клетки. Количество микроядер на клетку коррелирует с дозой излучения и также как хромосомные аберрации используется в качестве показателя для целей биодозиметрии.

14.6. Индукция и реализация программируемой смерти клетки (апоптоза)

Еще одним следствием повреждения молекул ДНК является включение процесса программируемой клеточной смерти – *апоптоза*. Многие виды клеток после облучения погибают как по апоптотическому, так и по некротическому пути, но ряд клеток, прежде всего лимфоидного происхождения, погибает в основном путем апоптоза. Клетки лимфоидного происхождения значительно более радиочувствительны, чем клетки любого другого происхождения. Их более ранняя гибель и высокая радиочувствительность объясняются запуском механизма программируемой смерти при таком уровне поражения ДНК, который сам по себе приводит клетку к гибели с гораздо меньшей вероятностью.

Апоптотическая смерть клетки в принципе является нормальным для организма процессом, участвующим в онтогенезе, дифференцировке, реакции на генотоксические внешние воздействия. Апоптотическая смерть – один из наиболее важных способов сохранения организмом своего гомеостаза, роль которого особенно велика в противодействии злокачественному перерождению. Именно путем апоптоза происходит удаление трансформированных клеток. В клетке существует механизм выявления нарушений в структуре ДНК, сопряженный с выдачей сигнала на систему ее разрушения. Так работает опухолевый супрессор, белок p53, продукт гена p53, который воспринимает информацию о повреждении молекулы ДНК и затем активирует каскад ферментативных реакций внутриклеточной трансдукции сигналов апоптоза, запускающих ферменты, разрушающие определенные (но не все) клеточные структуры.

На молекулярном уровне выделяют три стадии апоптоза – стадию выявления нарушений в структуре клеточных компонентов и индукции сигнала к апоптотической смерти, стадию «принятия решения» и стадию «исполнения приговора». Сигналом к индукции апоптоза служит либо повреждение ДНК (обнаруживаемое с участием белка p53), либо повреждение митохондриальных мембран, ведущее к выходу из митохондрий в цитоплазму цитохрома C.

На второй стадии процесса действует несколько про- и анти-апоптотических модуляторов, и сигнал к апоптозу может быть заблокирован. Если трансдукция сигнала не прервана, то инициируется третья, завершающая стадия апоптотической гибели клетки – активируются эффекторные («киллерные», «казнящие») каспазы. *Каспазы* – это цистеиновые протеиназы, расщепляющие белки по остаткам аспарагиновой кислоты.

Клеточная мембрана в процессе развития апоптоза образует быстро возникающие и исчезающие выпячивания, так называемые *блебы* (от англ. *bleb* – волдырь). Затем клетка округляется, а через некоторое время распадается на «апоптотные тела», которые содержат хроматин, митохондрии и лизосомы и окружены остатками клеточной мембраны.

Считается, что потеря клеткой апоптотического потенциала является одной из предпосылок злокачественного перерождения. Наиболее часто этому способствует выключение гена p53.

Предполагается, что гибель по апоптотическому пути может происходить при повреждениях ДНК, не являющихся препятствием к жизнедеятельности клетки. Основанием к такому выводу служит судьба лимфоидных клеток, погибающих по апоптотическому пути при более низких дозах, чем клетки, в основном погибающие по некротическому пути. Некротический путь гибели реализуется при уровне поражений, несовместимых с жизнедеятельностью клетки. Пока не ясно, связана ли разная эффективность выявления повреждений ДНК с различием в индукции или в осуществлении апоптоза.

При апоптозе ДНК распадается на строго определенные фрагменты, при некрозе – на участки различной длины. При некрозе ядерная и клеточная мембраны разрушаются на самых ранних этапах гибели, при апоптозе даже апоптотные тела окружены мембранами. Внутриклеточные органеллы сохраняются и видны в апоптотических телах, при некрозе они полностью разрушаются. Ингибирование синтеза АТФ, т.е. лишение клетки энергетического потенциала, препятствует развитию апоптоза, но не влияет на некротические процессы.

14.7. Генетическая и геномная нестабильность

Неправильная репарация ДНР сопряжена также с формированием феномена генетической нестабильности вследствие формирования репликационно ошибочного генотипа. Механизмы формирования этого явления достаточно многочисленны. Так, причинами генетической нестабильности могут быть неправильно репарированные повреждения ДНК: измененная последовательность оснований; микроделеции теломерных участков хромосом; активация генов, связанная с факторами роста, протеинкиназы К, интерлейкина-2, белка p-53, фактора некроза опухолей, протоонкогенов. Продукты этих генов влияют на отдаленные события в

поврежденных клетках — мутагенез, канцерогенез, репарацию - и на отдаленную гибель [Хрисанфова Е.Н. и др., 2002].

РИНГ — это форма нестабильности генома, возникающая в результате воздействия ИИ. К ее проявлениям относят отсроченную репродуктивную гибель клеток (отдаленные летальные мутации), дестабилизацию хромосом, соматические мутации, амплификацию генов и изменение радиочувствительности [Мазурик В.К. и др., 2001; Пелевина И.И. и др., 2003]. В работе С. Mothersill и др. (1998) были выделены два признака РИНГ, как общие свойства пролиферирующих клеток. Один из них характеризует явление в целом, как долговременное понижение вероятности роста и деление облученных клеток без возникновения мутаций в генетическом материале (иными словами, нестабильность генома — это возрастание вероятности мутационных изменений). Другой подчеркивает, что клетки, обладающие после воздействия радиации геномной нестабильностью, генерируются с высокой частотой, хотя и не образуют однородного клона, а повреждения генома, которые в них обнаруживаются, случайны, непредсказуемы по частоте, времени проявления и выраженности.

РИНГ может передаваться многим поколениям клеток, образуемым путем репликации, причем генетические изменения, наблюдаемые в клетках дочерних поколений, отличаются от возникших изменений в «родительской», то есть в самой облученной клетке. Радиация, в сущности, увеличивает частоту, с которой в выживших облученных клетках, точнее, в образуемых ими клеточных популяциях при нормальном функционировании возникают спонтанные генетические изменения [Little J.V., 1998].

Дестабилизация хромосом давно уже рассматривается как первый и прямой признак общей нестабильности генома. В силу различных причин общее число клеток с абберациями хромосом с каждым митозом убывает. При этом клоны с хромосомной нестабильностью могут восстанавливать стабильность в следующей клеточной популяции, сохраняя тот же уровень нестабильности или становиться еще более нестабильными [Ponnaija V., 1998].

Доля клеток с хромосомными абберациями среди потомства клеток, подвергнутых воздействию γ - или α -излучения в дозах 0,5, 1 или 3 Гр, после 30 удвоений была достоверно выше, чем в соответствующем контроле. Тип хромосомных аббераций (хроматидные разрывы, фрагменты и малые хромосомы) свидетельствовал о передаче хромосомной нестабильности в поколениях. Экспрессия нестабильности по этому показателю снижалась между 30-м и 72-м удвоениями популяции после облучения в дозах 0,5 и 3 Гр и сохранялась до 72-го удвоения после облучения в дозе 1 Гр. При действии α -частиц экспрессия хромосомной нестабильности в потомстве клеток была более выраженной и почти не изменялась во времени. По мнению С. Mothersill и др. (2000), нестабильные хромосомные абберации, характерные для РИНГ, могут приводить к апоптозу и вносить свой вклад в формирование отсроченной репродуктивной гибели/летальных мутаций в клетках HPV- G.

По мнению авторов, не существует прямой корреляции и простых соотношений между двумя такими проявлениями РИНГ, как отсроченная репродуктивная гибель и хромосомные aberrации. В то же время корреляция отмечается между отсроченной репродуктивной гибелью и возрастанием числа клеток с микроядрами при РИНГ.

15. Радиочувствительность животных

15.1. Видовая и популяционная радиочувствительность

Реакции животных на проникающее излучение весьма многообразны и определяются параметрами излучения и особенностями организма. Поэтому у животных разных видов, и даже у индивидуумов одного и того же вида, радиочувствительность будет неодинаковой. Она зависит от возраста, пола, упитанности, температуры, наличия или отсутствия кислорода и других факторов, существующих на момент облучения.

Для обозначения радиационной чувствительности животных используют величины летальных доз (ЛД). Это минимальные дозы облучения, которые вызывают смерть 50 % (ЛД_{50/30}) и 100 % (ЛД_{100/30}) облученных животных в течение 30 дней.

Противоположным радиочувствительности свойством организма является радиорезистентность – устойчивость к действию ионизирующих излучений.

Причины различной радиочувствительности по видам животных пока объяснить не удастся. Нет ни одной гипотезы, более или менее объясняющей этот феномен. Одно ясно, что млекопитающие – животные и человек – обладают наибольшей чувствительностью к облучению по сравнению с птицами, рыбами, земноводными и др [Белов А.Д. и др., 1999].

Таблица 15.1

Видовая радиочувствительность: ЛД_{50/30}, для различных систематических групп и видов организмов

Биологический вид	Доза ЛД _{50/30} , Гр	Биологически й вид	Доза ЛД _{50/30} , Гр
Человек	2,5-4	Птицы	8-20
Обезьяна	2,5-6	Рыбы	8-20
Собака	1,5-3	Змеи	80-200
Осел	2,5-4	Насекомые	10-100
Кролик	9-10	Растения	10-1500
Хомяк	9-10		
Мыши разных линий	6-15		
Крысы разных линий	7-9		

Вероятно, большая радиочувствительность более высокоорганизованных организмов связана со сложностью их биохимической и физиологической организации, радиационные нарушения которой вызывают развитие различных патологий. Причем принцип большей устойчивости сложных систем за счет дублирования функций здесь не работает из-за того, что ионизирующая радиация действует одновременно на все, в том числе и регуляторные, системы организма на всех уровнях организации.

Кроме того, наиболее высокоорганизованные животные – птицы и млекопитающие – гомойотермны (гомойотермность – способность животных поддерживать постоянную температуру тела), а повышенная температура тела способствует интенсификации радиобиологических реакций и усиливает поражение [Симак С.В. и др., 1998].

В радиочувствительности организмов внутри одного вида и одной популяции имеются индивидуальные различия, обусловленные различиями в уровне обменных процессов, состоянием компенсаторных механизмов (репарационных систем), общей активностью животных во время лучевого воздействия [Симак С.В. и др., 1998]. В любой популяции 50 % особей имеют средние значения показателя радиочувствительности. В популяции существует хоть малое количество сверхрадиочувствительных и сверхрадиорезистентных особей. Если на популяцию действуют малые дозы ионизирующих излучений, то к ней чувствительны самые радиочувствительные особи. С повышением дозы увеличивается число особей радиочувствительных к радиации.

Адаптация популяций к радиации возможна. Чем выше плодовитость и чем чаще смена поколений, тем легче адаптация. Но адаптация человеческой популяции к радиации неосуществима и недопустима. Для популяции гибель одной особи незначительна, а даже желательна, чем мутация, т. к. мутация несет с собой генетический груз.

15.2. Радиочувствительность органов и тканей

Различие радиочувствительности проявляется и в органах, составляющих организм как целое. Клетки одного органа также имеют неодинаковую степень чувствительности и способность к регенерации после лучевого поражения.

Степень радиочувствительности тканей характеризуют по функционально-биохимическим и морфологическим признакам. Органы по функционально-биохимическим признакам, определяющим сорбционный показатель тканей, выявляемый при их витальном окрашивании, можно распределить по радиочувствительности в следующей убывающей последовательности: большие полушария и ствол головного мозга, мозжечок, гипофиз, надпочечники, семенники, печень, селезенка, легкие, почки, сердце, мышцы, кожа и костная ткань.

По морфологическим признакам развивающихся пострadiационных изменений органы разделяются на три группы:

- 1) органы, чувствительные к радиации: лимфоузлы, лимфатические фолликулы ЖКТ, красный костный мозг, ЖКТ, вилочковая железа, селезенка, половые железы. Морфологически регистрируемые изменения в них возникают уже при облучении дозой 0,25 Гр;
- 2) органы, умеренно чувствительные к облучению: кожа, глаза;
- 3) органы, резистентные к действию ионизирующего излучения: печень, легкие, почки, сердце, кости, сухожилия, нервные стволы и др. Первичные морфологические изменения в них отмечаются при облучении дозой 1 Гр и более.

Из-за различной чувствительности органов для организма не безразлично, будет ли облучаться все тело равномерно либо часть его или организм получит общее, но неравномерное облучение. Общее равномерное облучение вызывает наибольший радиобиологический эффект. Экранирование при облучении даже небольшого участка тела повышает устойчивость организма к воздействию радиации. Выраженный защитный эффект проявляется при экранировании участка кости с красным костным мозгом, например, головки одной из бедренных костей [Белов А.Д. и др., 1999].

15.3. Половые различия в радиочувствительности

Радиочувствительность кур заметно ниже, чем петухов (12 и 10 Гр соответственно). Вероятно, эта зависимость распространяется и на другие виды птиц. Представления о половых различиях в радиочувствительности млекопитающих до настоящего времени не устоялись. Имеются указания на то, что выживаемость быков выше, чем коров, однако в других работах эти различия не подтверждаются. Для свиней и ослов показано отсутствие различий в чувствительности самцов и самок. Правда, в период течки резистентность самок несколько повышается, что, вероятно, связано с защитным эффектом эстрогенов. Однако такие повышенные физиологические нагрузки, как беременность и роды значительно снижают радиорезистентность животных. Это связано с тем, что при беременности происходит угнетение всех звеньев иммунной системы.

15.4. Возрастная радиочувствительность

В ходе онтогенеза радиочувствительность организма млекопитающих и птиц значительно изменяется. Наиболее чувствительны молодые, растущие животные. Это связано с тем, что в их тканях преобладают активно делящиеся и потому радиочувствительные клетки. После окончания периода роста и созревания радиорезистентность значительно возрастает, а к старости опять снижается. Так, для крупного рогатого скота в возрасте 3 дней летальная доза составляет 1,5 Гр, 3–5 месяцев – 4 Гр, для взрослых животных – 5,5 Гр и для старых – 2–4 Гр. Причиной этого является общее снижение

уровня обменных процессов у старых животных и связанное с этим снижение эффективности систем постлучевой репарации [Симак С.В. и др., 1998].

16. Основные эффекты облучения животных и человека

16.1. Непосредственные и опосредованные эффекты облучения

По механизмам развития последствий принято выделять непосредственные, опосредованные эффекты облучения.

Непосредственные эффекты облучения

Непосредственные эффекты облучения развиваются в период, следующий практически сразу за моментом облучения. Возникают они в результате прямого поражения молекулярно-клеточных структур и систем организма. К ним относятся острая и хроническая лучевая болезнь, поражения ключевых систем организма млекопитающих (система кроветворения, желудочно-кишечный тракт, ЦНС и др.).

Опосредованные эффекты облучения.

Не все эффекты облучения связаны с изменениями, происходящими непосредственно в клетках, оказавшихся мишенями электромагнитной волны или частицы высокой энергии. Непосредственно после облучения живой ткани в ней могут развиваться процессы, результатом которых является появление новых, *опосредованных* эффектов, непосредственно не вызванных лучом. К таким опосредованным эффектам облучения относятся: токсический эффект, иммунодефицит и инфекции, аутоиммунные процессы.

Токсический эффект. Все рассмотренные выше теории исходят из предположения, что лучевое поражение вызывается повреждением клеток и тканей, которые непосредственно подверглись действию радиации. Однако часть эффектов облучения не может быть объяснена таким образом и имеет более сложный механизм.

Так, в экспериментах по переливанию крови или даже одной кровяной сыворотки от облученного животного необлученному у последнего развиваются сглаженные симптомы лучевой болезни. При этом, ни один орган, отвечающий за развитие лучевой болезни, воздействию ионизирующей радиации не подвергался. Объяснением наблюдаемых эффектов может служить появление в крови каких-то химических веществ, которые и вызывают лучевые симптомы. Специальные исследования показали, что этими веществами являются как продукты распада облученных и погибших клеток (свободные радикалы, освободившиеся внутриклеточные ферменты и др.), так и продукты извращенного облучением метаболизма. Фактически этот эффект является разновидностью интоксикации. Следует иметь в виду, что, хотя гуморальный (неклеточный) токсический эффект усиливает лучевое поражение, ведущую роль в развитии лучевой болезни играют поражения клеточных структур

Аутоиммунные процессы. Одним из эффектов облучения является увеличение проницаемости тканевых барьеров. После гибели и лизиса

пораженных клеток продукты их распада – радиотоксины, среди которых оказывается немало слабоизмененных или неизмененных белков, характерных для самого облученного организма, – в значительных количествах оказываются в кровяном русле. Но в нормальной ситуации в крови их быть не должно. Иммуная система организма осуществляет постоянный контроль наличия в тканях чужеродных, измененных или отмерших компонентов-антигенов, отвечая на их появление образованием специфических антител. После облучения происходит выработка антител против собственных белков, оказавшихся в составе радиотоксинов – аутоенсибилизация. Ее последствия имеют двойкий характер. С одной стороны, дезактивация и удаление из организма радиотоксинов уменьшает токсический эффект и снижает степень поражения. С другой – появление в организме большого количества антител, специфичных к собственным клеткам на фоне увеличения проницаемости тканевых барьеров может приводить к серьезным повреждениям собственных тканей и органов организма.

Таким образом, за непосредственные эффекты облучения отвечают погибшие клетки, а за отдаленные – потомки видоизмененных выживших клеток.

16.2. Детерминированные эффекты облучения

По величине поглощенной дозы эффекты делятся на детерминированные и стохастические.

Детерминированные эффекты (нестохастические) – клинически значимые непосредственные лучевые реакции, связанные с клеточными утратами. Все детерминированные эффекты являются пороговыми, т. е. возникают только при достижении определенной дозы и усиливаются с ее увеличением.

Доза 0,2-0,5 Гр:

а) ранние, вскоре после облучения – проявляются в виде острой лучевой болезни (при общем облучении), либо при поражении отдельных органов, например, кожи виде лучевых эритемы, ожогов и язв;

б) отсроченные, спустя месяцы, годы – стерильность, катаракта, нефрокардиосклероз;

в) поздние, спустя годы, при больших дозах – фиброзы, нейропатии, поражения костей (клинически значимы, их степень зависит от дозы при местном и общем облучении).

Доза 0,1–1 Гр. Поздние детерминированные эффекты при малых дозах: различные функциональные нарушения сердечно-сосудистой, нервной и других систем, отмеченные через 50 лет среди японцев, переживших ядерную бомбардировку (радиационная природа подобных эффектов нуждается в подтверждении и изучении).

Лучевая болезнь животных и человека.

Лучевая болезнь (ЛБ) – определенный комплекс проявлений поражающего действия ионизирующих излучений на организм.

Факторы, от которых зависит многообразие проявлений лучевой болезни:

- Вид облучения (общее или местное, внешнее или от инкорпорированных радиоактивных веществ);
- Временной фактор (острое, пролонгированное или хроническое, однократное или фракционированное и т. д.);
- Пространственный фактор (равномерное или неравномерное облучение);
- Объем и локализация облученного сегмента тела и поверхности кожи.

Характерная черта острой лучевой болезни (ОЛБ) – волнообразность клинического течения, в чем можно усмотреть своеобразную последовательность проявления поражения отдельных систем организма.

Периоды течения ОЛБ: период формирования, период восстановления и период исходов и последствий.

Фазы первого периода ОЛБ: 1) общей первичной реакции; 2) кажущегося клинического благополучия (скрытая, или латентная, фаза); 3) выраженных клинических проявлений (фаза разгара болезни); 4) раннего восстановления.

Степени тяжести ОЛБ: в диапазоне доз 1–6 Гр различают четыре степени тяжести ОЛБ человека: ОЛБ I (легкой) степени (1–2 Гр); ОЛБ II (средней) степени (2–4 Гр); ОЛБ III (тяжелой) степени (4–6 Гр). При дозах выше 6 Гр ОЛБ оценивают, как крайне тяжелую, IV степени (выделяют переходную, кишечную, церебральную и токсемическую формы. Две последние формы ОЛБ развиваются при дозах в несколько десятков Гр, причем гибель наступает в течение двух суток от тяжелейшего капилляротоксикоза, приводящего, в частности, к несовместимому с жизнью острому повышению внутричерепного давления).

Вероятность развития острой лучевой болезни той или иной степени тяжести четко связана не только с величиной, но и с мощностью дозы, уменьшаясь по мере пролонгирования облучения во времени.

Формы развития IV степени тяжести острой лучевой болезни

При дозах 6–10 Гр развивается *переходная* форма болезни, протекающая с тяжелым костномозговым синдромом и выраженным поражением кишечника, адекватное лечение может в редких случаях обеспечить выживание.

При дозах 10–20 Гр возникает типичная форма *кишечного* поражения, заканчивающаяся смертельным исходом через 8–16 суток.

При дозах 20–80 Гр развивается *токсемическое* поражение с клиническими проявлениями в виде сосудистых расстройств и метаболических нарушений, смерть наступает на 4–7-е сутки, поражение нервной системы носит вторичный характер.

Наконец, *при дозах выше 80 Гр* возникает *церебральная* форма поражения (коллапс, судороги и другие неврологические расстройства), завершающаяся смертью в первые часы – три дня.

Фаза первичной общей реакции первого периода острой лучевой болезни

Первичная реакция организма человека возникает в зависимости от дозы в первые минуты – часы и проявляется во всех случаях при дозах облучения, превышающих 2 Гр. Появляются тошнота, рвота, усиливающиеся после приема жидкости, исчезает аппетит. Иногда ощущается сухость и горечь во рту. Пострадавшие испытывают чувство тяжести в голове, головную боль, общую слабость, иногда сонливость. Продолжительность фазы 1–3 дня.

Наибольшее диагностическое, а в некоторых случаях и прогностическое значение имеет время появления тошноты и рвоты, а также наличие и продолжительность диспептического синдрома, увеличение и отечность слюнных желез, гиперемия кожи. У лиц, наиболее тяжело пострадавших, первичная реакция возникает через 0,5–3 часа и продолжается в течение 3–4 дней.

Неблагоприятными в прогностическом отношении признаками первичной реакции, предопределяющими очень тяжелое течение болезни (а, следовательно, свидетельствующими о суммарной дозе излучения >10 Гр), являются: развитие шокоподобного состояния с падением артериального давления, кратковременная потеря сознания, субфебрильная температура, понос.

В пунктате костного мозга удастся обнаружить четкие изменения, более заметные на 2-е–3-е сутки: уменьшение общего числа миелокариоцитов, снижение митотического индекса и исчезновение молодых генераций клеток. При цитологическом исследовании костного мозга человека, так же, как и у животных, дегенеративные изменения могут быть обнаружены уже в первые часы после облучения. Характерно появление аберраций в лимфоцитах костного мозга и периферической крови.

Из биохимических изменений можно отметить при дозах >4 Гр повышение в крови уровня сахара и билирубина и снижение содержания хлоридов крови, а также аминоацидурию (вследствие повышенного распада белка разрушающихся клеток) и гиперамилазему в результате поражения слюнных желез.

Клинические проявления первой фазы ОЛБ являются не только следствием прямого повреждения радиочувствительных систем (лимфопения, задержка клеточного деления, уменьшение числа или исчезновение молодых форм кроветворных клеток, а возможно, и аминоацидурия), но свидетельствуют и о наличии преходящих, вторичных ранних сдвигов в нервно-регуляторных и гуморальных взаимоотношениях.

Лишь в крайне тяжелых случаях возникают кратковременные нарушения сознания, неспособность удержать позу. Первичная реакция

наблюдается у некоторых видов животных. Наиболее типичны ее проявления у собак. Кролики погибают «под лучом» при дозах 12–15 Гр. Первичная реакция на облучение у мышей и крыс внешне менее выражена, возможно, в связи с отсутствием у них рвотного центра.

Фаза кажущегося клинического благополучия при ОЛБ

Через 2–4 дня симптомы первичной реакции исчезают и самочувствие больных улучшается или даже нормализуется. Болезнь вступает во вторую фазу, называемую *скрытой или латентной стадией* ОЛБ, из-за отсутствия клинически видимых признаков болезни. Продолжительность латентной фазы зависит от тяжести поражения (дозы излучения) и составляет у человека 30 суток. При очень тяжелых формах поражения (при дозах 10 Гр) она вообще отсутствует.

Из клинических признаков уже во время скрытой фазы отмечают выпадение волос (если доза превышает эпиляциюную), неврологическая симптоматика постепенно сглаживается. Благополучие является лишь клиническим понятием. При исследовании крови в это время обнаруживается уже в ранние сроки лимфопения, в конце скрытой фазы тромбоцитопения, а также снижение числа нейтрофилов и ретикулоцитов. В костном мозге аплазия ярко выражена уже в первые дни, на 2–3-й неделе при цитопении появляются первые признаки регенерации в костном мозге. В этот же период отмечается и подавление ранних стадий сперматогенеза, может наблюдаться выпадение цикла месячных.

Фаза выраженных клинических проявлений ОЛБ

Спустя 1–4 недели после облучения самочувствие больных вновь ухудшается, нарастает слабость, повышается температура, увеличивается скорость оседания эритроцитов (СОЭ). Латентная фаза заболевания сменяется фазой разгара болезни. Наиболее типичны для нее инфекционные осложнения, протекающие на фоне длящегося более двух недель агранулоцитоза. Вместе с возможными проявлениями кровоточивости они представляют основную угрозу для жизни больных в этот период.

Морфологический состав крови в фазе разгара преимущественно состоит из лимфоцитов, все остальные элементы белой крови представлены единичными клетками или исчезают совсем. Это приводит к относительному лимфоцитозу при абсолютной лимфопении. К концу фазы (а при больших дозах и выраженном геморрагическом синдроме – раньше) выявляется и начинает прогрессировать анемия. При крайне тяжелых поражениях наблюдается летальный исход при глубокой аплазии кроветворной ткани. В остальных случаях в это время в костном мозге и лимфатических узлах, наряду с продолжающейся деструкцией, уже отчетливо выражены признаки регенерации.

В период разгара наблюдается также гипопропротеинемия и гипоальбуминемия, повышенное содержание основного азота и снижение количества хлоридов. Отражением нарушения обмена веществ и диспептических расстройств (потери аппетита и поносов) является резкое

снижение массы тела. У больных, получавших лечение, третья фаза заболевания продолжается от одной до трех недель, а затем в случаях с благоприятным исходом переходит в четвертую фазу – восстановление.

Фаза раннего восстановления при ОЛБ

Начало фазы восстановления характеризуется нормализацией температуры, улучшением самочувствия, появлением аппетита, восстановлением сна. Исчезает кровоточивость, ослабевают диспептические явления, восстанавливается масса тела. Происходит постепенная нормализация показателей крови, которая у выживающих больных начинается еще в разгаре заболевания как следствие регенерации костного мозга. Уже тогда в периферической крови появляются ранние формы клеток – ретикулоциты и молодые лейкоциты, вплоть до миелобластов, и регенераторные формы тромбоцитов. Однако анемия сохраняется и достигает максимума к 5–6-й неделе, затем число эритроцитов начинает увеличиваться и через 2–3 месяца приходит к исходному или пограничному уровню.

Продолжительность фазы восстановления 2–2,5 месяцев. К концу 3-го месяца от начала заболевания обычно самочувствие становится удовлетворительным, хотя отдельные проявления еще имеют место: рост волос возобновляется только к 4-му месяцу, сперматогенез восстанавливается лишь через 4–6 месяцев.

Различия в проявлениях ОЛБ у человека и животных

Попытки моделировать радиационный синдром человека на других млекопитающих с целью более полного исследования и проверки возможностей терапии показали, что с достаточной полнотой его воспроизвести невозможно [Флиднер Т., 1974]. Во-первых, дозы, достаточные для развития костномозгового синдрома у человека (2–3 Гр), не вызывают серьезных нарушений кроветворения у мышей, кроликов и крыс. Сходный синдром у этих видов животных развивается только после облучения соответственно в дозах 6, 7 и 8 Гр. Во-вторых, между человеком и животными наблюдаются большие различия во времени проявления типичных симптомов. У человека костномозговой синдром развивается на 4–5-й неделе, а у крыс, кроликов, мышей, обезьян, морских свинок, собак и свиней – на 2–3-й неделе после облучения. В-третьих, не совпадают и клинические симптомы, возникающие у животных и человека в период разгара болезни. У крыс, мышей, кроликов и морских свинок при среднелетальных дозах гранулоцитопения отмечается очень рано после облучения и находится уже на пути к восстановлению в период, когда тромбоцитопения только достигает наибольшей выраженности. Размеры тела человека приводят к тому, что облучение не является однородным. В некоторых ситуациях это накладывает отпечаток на клинические проявления, особенно когда величина дозы для отдельных сегментов тела различается в 2,5–3 раза.

Особенности острого лучевого поражения при неравномерном облучении

Рассмотрим два крайних случая неравномерного облучения: 1) общее неравномерное облучение; 2) преимущественно местное (локальное) облучение. В первом из них неравномерность поглощенной дозы создается в результате ослабления проникающего излучения по глубине или частичной защитой сегментов тела, во втором – вследствие экранирования (случайного или специального) основной массы тела или в результате локального радиационного воздействия. Между этими крайними примерами встречаются самые различные промежуточные варианты и их сочетания. Соответственно следует ожидать и многообразия клинических форм возникающих поражений.

Хроническая лучевая болезнь

Хроническая лучевая болезнь (ХЛБ) – это самостоятельная нозологическая форма лучевого поражения, развивающаяся в результате продолжительного облучения в дозах, суммарно достигающих 1,0–3,0 Гр при интенсивности облучения (мощности дозы) порядка 0,001–0,003 Гр/сутки. Сроки развития проявлений ХЛБ зависят от мощности дозы и варьируют от нескольких месяцев до 1–3 лет. ХЛБ, как и ОЛБ, характеризуется фазовым течением и особенностями проявления, связанными с неравномерностью облучения, а также возможным развитием отдаленных последствий.

ХЛБ при внешнем облучении представляет собой сложный клинический синдром с вовлечением ряда органов и систем, периодичность течения которого связана с динамикой формирования лучевой нагрузки, т. е. с продолжением или прекращением облучения. Своеобразие ХЛБ состоит в том, что в активно пролиферирующих тканях, благодаря интенсивным процессам клеточного обновления, длительное время сохраняется возможность морфологического восстановления тканевой организации. В то же время такие стабильные (в клеточно-кинетическом отношении) системы, как нервная, сердечно-сосудистая и эндокринная отвечают на хроническое лучевое воздействие сложным комплексом функциональных реакции и крайне медленным нарастанием незначительных дистрофических изменений.

После прекращения облучения наступает период восстановления, характеризующийся преобладанием репаративных процессов в наиболее радиопоражаемых тканях, а также нормализацией (иногда не полной) функциональных нарушений в других системах.

Лучевая болезнь животных

Легкая степень ЛБ развивается при поглощенной дозе 1,4–2,5 Гр, характеризуется кратковременным угнетением общего состояния животного, иногда отказом от корма, небольшим уменьшением количества лейкоцитов в крови, уменьшением количества лимфоцитов на 25–50 %.

Средняя степень ЛБ развивается при облучении дозой 2,5–4,0 Гр. При этом отмечается угнетение общего состояния животного, кратковременный отказ от корма, **небольшая лихорадка**, у овец с 5–8 дня начинает выпадать

шерсть. Содержание лейкоцитов в крови снижается на 50 % и более, лимфоцитов – на 75 % и более, через две недели уменьшается количество эритроцитов и тромбоцитов. На слизистых: оболочках могут быть кровоизлияния. При отсутствии *осложнений* происходит выздоровление.

Тяжелая степень ЛБ развивается при поглощенной дозе в 4,0–7,5 Гр. Проявляется тяжелым угнетением, повышением температуры тела, эпилепсией, резким уменьшением количества лейкоцитов, эритроцитов, тромбоцитов, кровоизлияниями. Всегда сопровождается различными осложнениями.

Крайне тяжелая степень ЛБ развивается при поглощенной дозе более 7,5 Гр. Протекает тяжело, животные погибают через 10–15 дней, а при очень больших дозах и ранее.

Диагностика лучевой болезни у сельскохозяйственных животных

Поскольку строго специфических признаков ОЛБ нет, диагноз ставят на основе анамнеза, дозиметрических данных, клинических признаков болезни, гематологических, морфологических иммунобиологических и других лабораторных исследований. При постановке диагноза большое значение приобретают гематологические показатели: содержание гемоглобина, эритроцитов в периферической крови, степень лейкопении, тромбоцитопении, скорость свертывания крови, миелограмма и другие реакции системы крови. Необходимо учитывать степень клинического проявления и патологоанатомические изменения, характерные для геморрагического синдрома.

Цитогенетические методы: определение частоты и типа аберраций хромосом в клетках крови, костного мозга, эпителия слизистых оболочек, зародышевого эпителия семенников и других органов. Иммунологические методы: иммунограмма и функциональные тесты. Полученные с помощью этих методов результаты дают возможность определить поглощенную дозу излучения (биодозиметрия), прогнозировать степень тяжести, исход и эффективность проведения лечебных мероприятий. При постановке диагноза ЛБ учитывают патологоанатомические изменения и гистохимические исследования отдельных органов и тканей. Для повышения достоверности диагноза и прогнозирования исхода используют по возможности большее число методов исследования.

К принципам и способам защиты сельскохозяйственных животных от ионизирующих излучений можно отнести диагностику и реализацию своевременной биохимической коррекции выявленных нарушений.

Рекомендуется проводить следующие защитные мероприятия для получения качественных продуктов питания при ведении животноводства на радиоактивно загрязненных территориях: сочетание конгрмер в земледелии, растениеводстве и животноводстве, обеспечивающее рациональную организацию кормопроизводства; использование в рационе ферроцианидсодержащих кормовых добавок и минералов; применение

антиоксидантов, блокаторов мембранного транспорта двухвалентных катионов, адаптогенов и физических факторов нерадиационной природы.

Поздние детерминированные эффекты, характеризующиеся медленным нарастанием и длительным течением. Они являются следствием гибели функциональных клеток тканей с низкими уровнями пролиферации и спонтанной гибели клеток. Последствия гибели этих клеток во многих случаях усугубляются постепенным отмиранием пораженных эндотелиальных клеток капиллярной сети, питающей эти ткани. Чаще всего подобные поздние детерминированные эффекты наблюдаются после лучевой терапии опухолей, проводимой с использованием высоких очагов доз излучения, в виде фиброзов, патологических переломов костей и различных нейропатий.

Отдаленные эффекты облучения

Спустя длительное время после лучевого воздействия, когда лучевая болезнь, казалось бы, окончательно прошла, в организме могут развиваться различные патологии. Их называют **отдаленными последствиями облучения**. У мышей, морских свинок и крыс они проявляются уже через месяц, у собак и лошадей – через год, у человека через 10–30 лет. К отдаленным последствиям облучения относятся помутнений хрусталика, нефросклероза, нарушения гуморального и клеточного иммунитета, снижение плодовитости, полная или временная стерильность и сокращение общей продолжительности жизни.

Одним из высокорациочувствительных органов **является орган зрения**. При облучении могут повреждаться любые части глаза, но наиболее чувствительной его частью является хрусталик. Наиболее распространенным эффектом является помутнение хрусталика – **катаракта**. Корпускулярные излучения с большой плотностью ионизации, в первую очередь α – и нейтронное, обладают гораздо более высоким катарактогенным действием, чем электромагнитные и β -излучения. Так, пороговой дозой рентгеновского излучения для возникновения катаракты является 8 Гр, а для нейтронов с энергией 7,5 МэВ порог может составлять 2–3 Гр.

Еще одним типичным отдаленным последствием действия радиации является **нефросклероз**. Он вызывается повреждениями почечной ткани и сосудов почек, которые играют ведущую роль в выведении радионуклидов из организма. При этом разрушенные участки почечной ткани замещаются соединительной тканью. Результатом этого могут быть проявления почечной гипертонии со стойким повышением артериального давления, альбуминурии, почечной недостаточности.

В зависимости от эффективной дозы облучения оно может иметь различное влияние на **продолжительность жизни** организма. Высокие дозы вызывают уменьшение продолжительности жизни тем сильнее, чем больше доза. Специальные эксперименты показали, что при однократном общем облучении в дозах более 2 Гр (до летальных) на каждые 4 Гр

однократного общего облучения продолжительность жизни сокращается на 3–5 %.

В определенном диапазоне доз ионизирующая радиация не оказывает значимого влияния на продолжительность жизни. И наконец, существуют данные о том, что небольшие дозы радиации (до 0,5 Гр) способны на 15–20 % увеличивать продолжительность жизни. Это наблюдается при воздействии малых количеств радионуклидов и хроническом облучении животных гамма-излучением. Малые дозы оказывают предохраняющий эффект при последующем облучении более высокими дозами, оказывают стимулирующее воздействие на некоторые функции организма, уменьшают возможность образования некоторых опухолей.

Характерными для отдаленной лучевой патологии являются также такие изменения покровных тканей, как изменение пигментации (обычно поседение), выпадение волос, уплотнение и атрофия эпидермиса, дисфункция потовых и сальных желез, волосяных фолликулов, потеря эластичности, фиброз дермы, повышенная чувствительность к травме и хроническое изъязвление.

Возникает законный вопрос: в чем причина отдаленных последствий облучения? Вероятнее всего, за эти последствия отвечают те клетки, которые подверглись действию радиации, но выжили, будучи отрепарированы. Такие клетки неизбежно несут в себе груз изменений, которые, проявляясь спустя определенное время, вызывают нарушения в функционировании потомков этой клетки, каждый из которых сохраняет исходное изменение.

16.3. Стохастические эффекты облучения

Для стохастических изменений характерно отсутствие зависимости от дозы облучения. С увеличением ее величины повышается лишь частота возникновения нарушений.

Стохастические (вероятностные) эффекты: а) злокачественные новообразования – рак и лейкозы, регистрируются спустя годы, десятки лет; б) генетические (наследственные) эффекты в потомстве, обнаруживаются сразу после рождения (практически риск ЗНО отмечен после 0,5 Гр, генетические эффекты у человека пока не зарегистрированы).

Одним из наиболее типичных отдаленных последствий облучения являются **злокачественные новообразования**. Так, среди японцев, переживших атомный взрыв в Хиросиме и Нагасаки, к 1980 гг. установлено; повышение частоты лейкозов, рака щитовидной и молочной желез, кожи, легких, желудка, толстой кишки, гортани, придаточных пазух носа, матки, яичников, яичек, множественной миеломы. Вероятность развития новообразований связана прямой зависимостью с дозой облучения, а в случае ядерного взрыва – с расстоянием до его эпицентра.

Одно из первых испытаний ядерного оружия было проведено в сентябре 1954 г. на Тоцком полигоне в Оренбургской области. В последующие годы наблюдалось повышение частоты онкологических

заболеваний в Бузулукском, Сорочинском и Тоцком районах Оренбургской области и Борском районе Самарской области, что связывается с отдаленными последствиями радиационного поражения.

Одной из наиболее распространенных пострадиационных раковых опухолей является **рак молочной железы**. Его вероятность связана не только с полученной дозой, но и с изменением гормонального статуса организма. Так, после удаления яичников вероятность развития опухолей молочной железы значительно снижается, а при успешной пересадке яичника от донора вновь возрастает.

При хроническом воздействии на дыхательную систему радиоактивных веществ, проникающих ингаляционным путем (радиоактивная пыль, радон или торон урановых рудников и производств) велика вероятность развития **рака легкого**. Подобное заболевание на протяжении сотен лет было бичом для шахтеров Чехии и Силезии, где оно получило название «болезнь рудокопов».

Характерной особенностью внешнего действия рентгеновского, нейтронного и β -излучения является развитие опухолей кожи и подкожной клетчатки спустя 10–30 лет после облучения. Особенно эффективно в этом отношении нейтронное излучение. На первых этапах развития рентгенологии, когда еще не знали о канцерогенных свойствах ионизирующих излучений, врачи-рентгенологи часто подвергались такому воздействию. Еще в 40-х годах на съездах рентгенологов можно было встретить пожилых врачей с ампутированными от лучевого рака пальцами.

16.4. Тератогенные эффекты облучения

Доза менее 0,1 Гр (доза облучения плода). Тератогенные эффекты: различные пороки развития и уродства, возникшие в результате облучения плода на разных стадиях закладки того или иного органа (будучи пороговыми по дозе, относятся к детерминированным, а по вероятности проявления того или иного эффекта к стохастическим).

Данные о действии на эмбрион и плод человека получены в результате изучения последствий лучевой терапии и исследовании детей, подвергшихся внутриутробному облучению в Хиросиме и Нагасаки. Общий вывод из этих наблюдений однозначен – **радиочувствительность плода высокая, и она тем больше, чем он моложе**.

У выживших детей повреждающее действие радиации проявляется в виде различных уродств, задержки физического и умственного развития или их сочетаний. Наиболее частые уродства – микроцефалия, гидроцефалия и аномалии развития сердца.

Пороки развития и уродства, возникающие в результате облучения *in utero*, объединяются термином **тератогенные эффекты**. С одной стороны, их можно рассматривать как стохастические эффекты, имея в виду вероятностный характер их проявления в зависимости от стадии эмбриогенеза, на которой произошло облучение. Однако правильнее их

отнести к разновидности соматических эффектов, так как они возникают у ребенка в результате его непосредственного облучения в состоянии эмбриона или плода. Во всяком случае, тератогенные эффекты не следует смешивать с наследственными эффектами, возникающими в неподвергавшемся непосредственному облучению потомстве облученных родителей.

Крайне высокая радиочувствительность организма в антенатальном, внутриутробном периоде развития легко объяснима, так как в это время он представляет собой конгломерат из делящихся и дифференцирующихся клеток, обладающих наибольшей радиочувствительностью.

При мозаике развивающихся центров, каждый из которых жизненно необходим для выживания эмбриона, облучение в дозах, летальных для любого центра, будет смертельным для всего организма в целом. В этом случае радиочувствительность эмбриона определяется наиболее чувствительной системой, находящейся в данный момент в состоянии активного развития.

Заслуживают внимания сведения о последствиях облучения матерей во второй половине беременности. К ним относятся данные о повышенной заболеваемости и смертности таких детей в Нагасаки, а также сообщения об аномалиях развития, наблюдавшихся при рентгенотерапевтических процедурах, проводимых на разных сроках беременности матерей. Так, облучение эмбриона человека в период первых двух месяцев ведет к 100 %-му поражению, а в период от 3 до 5 месяцев – к 64, в период от 6 до 9 месяцев – к 23 % поражения эмбриона.

17. Основы радиационной безопасности

17.1. Нормы радиационной безопасности (НРБ)

В нашей стране приняты важные федеральные законы: «*О радиационной безопасности населения*» и «*Об использовании атомной энергии*». Эти законы определяют правовые основы обеспечения охраны окружающей среды и радиационной безопасности населения.

На основании указанных законов разработаны и утверждены «*Нормы радиационной безопасности*» (НРБ-99; СП.2.6.2.758-99), регламентирующие требования законов в форме основного дозового предела, допустимого уровня воздействия ионизирующего излучения и других требований по ограничению облучения человека. Наиболее полно современные представления о радиационной безопасности изложены в публикациях МКРЗ № 26 и № 60.

Основная цель радиационной безопасности – исключить возникновение генетических эффектов и ограничить возникновение стохастических, сохраняя условия для производственной деятельности человека.

Для достижения этой цели в НРБ-99 заложены три основных принципа радиационной безопасности:

принцип нормирования – непревышение допустимого предела индивидуальных доз облучения граждан от всех источников ионизирующего излучения;

принцип обоснования – запрещение всех видов деятельности по использованию источников ионизирующего излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риска возможного вреда, причиненного дополнительным к естественному радиационному фону облучением;

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

Согласно НРБ-99 по допустимому уровню облучения все население разделено на **3 категории**:

Категория А – персонал (лица постоянно или временно непосредственно работающие с техногенными источниками излучений);

Категория Б – лица из персонала, находящиеся по условиям работы в сфере воздействия техногенных источников ионизирующего излучения;

Все население – население области, края, республики, страны.

Нормами радиационной безопасности установлены также **3 группы критических органов**:

1 группа (высокочувствительные органы) – все тело, гонады, красный костный мозг;

2 группа (средней чувствительности) – мышцы, щитовидная железа, жировая ткань, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталик глаза и другие органы, исключая относящиеся к I и III группам;

3 группа (наименее чувствительные) – костная ткань, кожный покров, кисти, предплечья, лодыжки и стопы.

В основу приведенной группировки критических органов положена вероятность развития в них отдаленных эффектов облучения. Под критическим органом при нормировании понимают орган, ткань, часть тела или все тело, облучение которого в данных условиях причиняет наибольший ущерб здоровью человека или его потомству.

Для каждой категории облучаемых лиц устанавливаются три класса нормативов:

I – основные пределы доз (ПД);

II – допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего излучения), являющиеся производными от основных пределов доз:

– пределы годового поступления (ПГП), Бк/год;

– среднегодовые допустимые объемные активности (ДОО), Бк/м³;

– уровни вмешательства (УВ), Бк/кг и др.

III – контрольные уровни. Речь идет о предельно допустимых выбросах (ПДВ) в атмосферу и предельно допустимых сбросах (ПДС) отходов.

Предел дозы – это величина годовой эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения, которая не должна превышать в условиях нормальной работы.

Предельно допустимая доза – наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за год, которое при равномерном воздействии в течение 50 лет не вызовет в состоянии здоровья персонала неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами.

Соблюдение предела годовой дозы предотвращает возникновение детерминированных эффектов, а вероятность предполагаемых стохастических эффектов находится при этом на приемлемом уровне. Все остальные ограничения, установленные НРБ (радиационный фон в помещениях, содержание радионуклидов в воздухе, воде, пище и проч.), определяются исходя из того, чтобы *не были превышены основные дозовые пределы*, исходя из суммы как внешнего, так и внутреннего облучения.

Таблица 17.1

Основные дозовые пределы, мЗв/год

Нормируемая величина	Персонал (группа А)	Лица из персонала (группа Б)	Население
Эффективная доза (в среднем за любые последовательные 5 лет)	20, но не более 50	5, но не более 12,5	1, но не более 5
Эквивалентная доза:			
в хрусталике глаз	150	37,5	15
коже	500	125	50
кистях и стопах	500	125	50

Цифра **1 мЗв в среднем за год от техногенных источников** является фундаментом обеспечения радиационной безопасности населения.

Основные пределы доз облучения не включают дозы природного и медицинского облучения, а также вследствие радиационных аварий. На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения.

Предел годового поступления (ПГП) – допустимый уровень поступления данного радионуклида в организм в течение года, который при монофакторном воздействии приводит к облучению условного человека ожидаемой дозой, равной соответствующему пределу годовой дозы (Бк/год). Нормируются разные значения ПГП: в зависимости от радионуклида, для персонала (в воздухе рабочих помещений), для населения (в атмосферном воздухе, а также в воде и пище).

Среднегодовые допустимые объемные активности (ДОА), Бк/м³, отдельных радионуклидов для воздуха и **уровни вмешательства (УВ), Бк/кг**, для воды и пищи вычисляются как отношение ПГП радионуклида к объему (V) воздуха и массы воды (M), с которыми радионуклид поступает в организм человека на протяжении календарного года. Значения этих величин

для каждого конкретного радионуклида приведены в НРБ. Причем эти значения относятся к так называемой **«критической группе»** – *группе лиц из населения, которая подвергается наибольшему радиационному воздействию по данному пути облучения от данного источника излучения.*

Возможное поступление радионуклида с пищей рассчитывают исходя из местных санитарных данных о годовом потреблении отдельных пищевых продуктов при оценке по ППП или сравнивают с УВ.

Исходя из основных дозовых пределов НРБ устанавливают также:

- допустимые плотности потока:
- + электронов и бета-частиц при облучении кожи и хрусталиков глаз;
- + фотонов при внешнем облучении всего тела, кожи и хрусталиков глаз;
- + нейтронов при внешнем облучении всего тела;
- допустимые уровни радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей, кожи, спецодежды и средств индивидуальной защиты.

Ограничение облучения всего населения осуществляется регламентацией или контролем радиоактивности объектов окружающей среды (воды, воздуха, пищевых продуктов), технологических процессов, которые могут привести к загрязнению радионуклидами, доз от медицинского облучения и техногенно повышенного фона, обусловленного строительными материалами, химическими удобрениями, сжиганием органического топлива и т. п.

Помимо перечисленных основных дозовых пределов, для планирования мероприятий по защите и оперативного контроля для категорий А и Б устанавливают контрольные (рабочие) уровни поступления радиоактивных веществ, содержания их в организме, концентрации радиоактивных веществ в воздухе, воде водоемов, мощности дозы излучения, загрязнения поверхностей и т. п., рассчитанных из значений основных дозовых пределов.

Для категории А контрольный уровень устанавливает администрация учреждения при обязательном согласовании с органами госсаннадзора. Контрольные уровни должны быть ниже дозовых пределов. Для лиц категории А их устанавливают, как среднее значение за одну рабочую смену; превышение этих уровней является санитарным нарушением. В исключительных случаях контрольные уровни могут быть выше основных дозовых пределов при ликвидации аварии, монтажно-наладочных работах и т. д. Для лиц категории Б контрольные уровни устанавливают органы Госсаннадзора как среднее значение за 1 месяц.

Согласно НРБ-99 разрешается планируемое повышенное облучение при *ликвидации радиационной аварии*. Потенциальную дозу внешнего облучения при поступлении радионуклидов в организм предвидеть невозможно. Поэтому при установлении аварии лицо, ответственное за радиационную безопасность учреждения, должно принять все меры для сведения к минимуму внешнего облучения и поступления радиоактивных

веществ в организм человека. Планируемое повышение облучения персонала во время ликвидации аварии выше установленных пределов может быть *оправдано лишь спасением людей, предотвращением развития аварии и облучения большего числа людей.* В каждом подобном случае персонал должен быть предупрежден о дополнительном облучении. Такое облучение допускается только с письменного разрешения руководителя учреждения и личного согласия исполнителя.

Планируемое повышенное облучение не разрешается, если работник ранее получил дозу, превышающую годовую ПДД в 5 раз, и работник – женщина в возрасте до 40 лет. По НРБ-96 допускается двойное превышение ПДД (0,1 Зв) с разрешения местных органов Госсаннадзора. От работы такие лица не уstraняются и обследованию не подлежат, но должна быть компенсация полученной дозы согласно формуле: $D \leq \text{ПДД} \cdot T$ (время), и в любом случае доза к 30 годам не должна превышать 0,6 Зв (т. е. 12 ПДД). Кроме того, в НРБ-96 записано, что 1 раз за время работы персонал может получить с разрешения Минздрава 5 ПДД, т. е. 0,25 Зв, но компенсация этой дозы должна проходить в течение 10 лет. Однократное внешнее облучение свыше 5 ПДД или однократное поступление радионуклидов свыше 5 ПДД должно рассматриваться как потенциально опасное, а работника после облучения необходимо направить на медицинское обследование.

Для населения в случаях радиационной аварии НРБ устанавливают:

- прогнозируемые уровни облучения, при которых необходимо срочное вмешательство (действие, направленное на снижение вероятности облучения, либо дозы или неблагоприятных последствий облучения). Для всего тела такой уровень облучения за 2 суток составляет 1 Гр;
- уровни вмешательства при хроническом облучении;
- критерии для принятия неотложных решений в начальном периоде радиационной аварии;
- критерии для принятия решений об отселении и ограничении потребления загрязненных пищевых продуктов;
- критерии для принятия решений об ограничении потребления загрязненных продуктов питания в первый год после возникновения аварии.

Принципы контроля и ограничения радиационных воздействий в медицине основаны на получении необходимой и полезной диагностической информации или терапевтического эффекта при минимально возможных уровнях облучения. При этом не устанавливаются пределы доз. Практически единственным численным ограничением в сфере медицины является то, что мощность дозы гамма-излучения на расстоянии 1 метра от пациента, которому с терапевтической целью введены радиофармацевтические препараты, не должна превышать при выходе из радиологического отделения 3 мкЗв/ч (то есть примерно в 30 раз выше среднего природного фона).

17.2. Организация работы с источниками ионизирующих излучений

При работе с источниками ионизирующих излучений важное значение приобретает правильная организация труда, которая обеспечивает радиационную безопасность обслуживающего персонала и всего населения в целом. В этом случае дозовые нагрузки для лиц соответствующих категорий облучения и групп критических органов от источников внешнего и внутреннего облучений не будут превышать регламентированных значений.

Руководящим документом по радиационной безопасности при организации работ с источниками ионизирующих излучений являются *«Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений» (ОСП-2000)*. В соответствии с ними оборудование, контейнеры, упаковки, транспортные средства, аппараты, передвижные установки, помещения, предназначенные для работ с применением источников ионизирующих излучений, должны иметь предупредительные знаки радиационной опасности для привлечения внимания к этим объектам. При работе с открытыми источниками дополнительно к мероприятиям по защите от внешнего облучения следует предусматривать меры по защите персонала и населения от внутреннего облучения и охране окружающей среды от радиоактивных загрязнений.

Учреждения, помещения и установки для работы с источниками ионизирующих излучений до начала их эксплуатации должны быть приняты компетентной комиссией, которая составляет акт приемки. На основании акта приемки местные органы Госсаннадзора оформляют санитарный паспорт учреждения (на срок не более 3 лет), дающий право получения, хранения и проведения работ с применением источников ионизирующих излучений. Администрация учреждения определяет перечень лиц для работы с источниками излучений, обеспечивает их обучение и инструктаж, разрабатывает правила внутреннего распорядка и инструкцию по радиационной безопасности, в которой излагаются порядок проведения работ, учета, хранения и выдачи источников излучений, сбора и удаления радиоактивных отходов, содержания помещений, меры личной профилактики и организация проведения радиационного контроля. Приказом по учреждению администрация назначает лиц, ответственных за радиационный контроль и безопасность, организует обязательный медицинский контроль при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры.

Требования к размещению учреждений, участков и установок для работы с источниками ионизирующих излучений

Запрещается размещение таких учреждений и установок в жилых зданиях и детских учреждениях. Площадки для строительства учреждений для работы с открытыми источниками следует выбирать с подветренной стороны по отношению к жилым зданиям, детским, общественным и санитарно-оздоровительным учреждениям, зонам отдыха и т. д. Вокруг

учреждения, предназначенного для работы с источниками излучений, в случае необходимости устанавливают *санитарно-защитную зону и зону наблюдения*.

К санитарно-защитной зоне относится территория вокруг учреждения или источника радиоактивных выбросов или сбросов, на которой уровень облучения людей в условиях нормальной эксплуатации учреждения *может превышать предел дозы ПД*. В этой зоне устанавливают режим ограничений и проводят радиационный контроль.

Зона наблюдения – территория, где возможно влияние радиоактивных сбросов и выбросов учреждения и где облучение проживающего населения *может достигать установленного предела дозы ПД*. На этой территории проводят радиационный контроль.

Работа с закрытыми источниками излучения

Закрытыми называются источники ионизирующего излучения, конструкция которых исключает попадание радиоактивных веществ в окружающую среду. *Следовательно, в этом случае персонал может подвергаться только внешнему облучению. Такие источники применяют, например, в установках для радиационно-биологической технологии, радиационной терапии и диагностики. В качестве источников излучения в этих установках используют радионуклидные закрытые источники, а также рентгеновские аппараты и гамма-установки.*

Рабочую часть стационарных установок с открытым и неограниченным по направлению пучком излучения следует располагать в отдельном помещении. Материал и толщина стен, пола и потолка этого помещения при любых реальных положениях источника и направления пучка должны обеспечивать ослабление излучения в смежных помещениях и на территории учреждения до допустимых значений.

Пульт управления установкой размещают в смежном помещении. Входная дверь в помещение, где находится установка, должна блокироваться с механизмом перемещения источника или включением высокого напряжения так, чтобы исключить возможность случайного облучения персонала. Эти помещения должны быть оборудованы системой сигнализации о положении облучателя или включении энергопитания и превышении заданной мощности дозы. В нерабочем положении все источники ионизирующих излучений должны находиться в защитных устройствах, а нерадионуклидные источники обесточены. Для перемещения источника в рабочее положение или включения энергопитания предусматривают систему дистанционного управления.

Специальные требования к отделке помещений при работе с закрытыми источниками излучений не предъявляют, кроме помещений для перезарядки и временного хранения демонтированных приборов и установок.

Работа с открытыми источниками ионизирующих излучений

Открытым называют радиоактивный источник излучения, при использовании которого возможно попадание радиоактивных веществ в

окружающую среду (порошки, жидкости, газы). Наиболее опасна работа с открытыми источниками излучений, так как имеется вероятность попадания их в организм исследователя.

Комплекс защитных мер при работе с открытыми источниками должен обеспечить защиту людей не только от внешнего, но и от внутреннего облучения, предотвращать радиоактивное загрязнение воздуха и поверхностей рабочих помещений, кожных покровов и одежды персонала, а также объектов внешней среды – воздуха, воды, почвы, растительности и др.

К числу основных профилактических мероприятий при работе с открытыми источниками излучений относятся: правильный выбор планировки помещений, оборудования, отделки помещений, технологических режимов; рациональная организация рабочих мест и соблюдение мер личной гигиены работающих; рациональный режим вентиляции; организация защиты от внешнего и внутреннего облучений, сбора и удаления радиоактивных отходов. Требования к выполнению указанных мероприятий зависят от характера работ, активности и состава используемых радионуклидов.

Радиоактивные вещества по степени радиационной опасности разделяют на четыре группы в зависимости от минимально значимой активности.

Минимально значимая активность – это наименьшая активность открытого источника на рабочем месте, на использование которого не требуется разрешения органов Госсаннадзора.

Группа А – минимально значимая активность составляет 3,7 Бк ($^{210}_{82}\text{Pb}$, $^{210}_{84}\text{Po}$, $^{226}_{88}\text{Ra}$).

Группа Б – 37 Бк ($^{90}_{38}\text{Sr}$, $^{125}_{53}\text{I}$, $^{131}_{53}\text{I}$, $^{144}_{55}\text{Cs}$).

Группа В – 370 Бк ($^{22}_{11}\text{Na}$, $^{32,45,59}_{26}\text{Fe}$, $^{45}_{20}\text{Ca}$, $^{60}_{27}\text{Co}$, $^{65}_{30}\text{Zn}$, $^{137}_{55}\text{Cs}$).

Группа Г – 3700 Бк ($^{14}_6\text{C}$, $^{51}_{24}\text{Cr}$, $^{64}_{29}\text{Cu}$, $^{55}_{26}\text{Fe}$).

Все работы с открытыми источниками разделяют на 3 класса в зависимости от группы радиационной опасности радионуклида и его активности на рабочем месте. В зависимости от класса работ предъявляют требования к размещению и оборудованию помещений, в которых проводят работы с открытыми источниками.

К размещению лабораторий, где проводят работы III класса, специальных требований не предъявляют. Работы этого класса проводят в отдельных помещениях (комнатах). Рекомендуется устройство душевой и выделение помещений для хранения и фасования растворов. При опасности загрязнения воздуха работы следует проводить в вытяжных шкафах.

Помещения для работ II класса необходимо размещать в отдельной части здания, изолированной от других помещений. В составе этих помещений должны быть санпропускник или душевая и пункт радиационного контроля на выходе. Эти помещения оборудуют вытяжными шкафами или боксами.

Помещения для работ I класса должны быть размещены в отдельном здании с отдельным входом только через санпропускник и разделены на 3 зоны (трехзональная планировка):

1-я зона – *необслуживаемые помещения*, где размещаются технологическое оборудование и коммуникации, являющиеся основными источниками излучения и радиоактивного загрязнения;

2-я зона – *периодически обслуживаемые помещения* (для проведения ремонта оборудования и других работ, связанных с вскрытием технологического оборудования, временного хранения и удаления отходов);

3-я зона **2-я** помещения постоянного пребывания персонала в течение всей смены.

В помещениях *для работ II класса и третьей зоны I класса* полы и стены должны быть покрыты специальными слабосорбирующими материалами, стойкими к моющим средствам.

Оборудование и рабочая мебель должны иметь гладкую поверхность, простую конструкцию и слабо сорбирующие покрытия, облегчающие удаление радиоактивных загрязнений. При работе с открытыми радиоактивными веществами следует пользоваться пластиковыми пленками, фильтровальной бумагой и другими подсобными материалами разового пользования для ограничения загрязнения различных поверхностей, оборудования и помещений. Работы следует проводить на лотках и поддонах, изготовленных из слабо сорбирующих материалов.

В помещениях для работы с открытыми источниками запрещается пребывание персонала без средств индивидуальной защиты, прием пищи и курение; нельзя также применять косметику, хранить пищевые продукты, табачные изделия, домашнюю одежду и др.

Вентиляционные и воздухоочистные сооружения должны обеспечивать защиту от загрязнения воздуха в соответствии с требованиями НРБ-99. Система специальной канализации должна предусматривать дезактивацию сточных вод в очистных сооружениях, которые располагаются в специальном помещении на территории учреждения.

Радиоактивное загрязнение наружных поверхностей оборудования, инструментов, лабораторной посуды, поверхностей рабочие помещений и отделений для хранения спецодежды не должно превышать допустимых уровней (частиц/см²/мин).

Во всех помещениях, где ведут работы с открытыми радиоактивными источниками, требуется ежедневная влажная уборка и не реже одного раза в месяц – полная уборка с мытьем полов, стен, дверей, окон и наружных поверхностей оборудования. Сухая уборка помещений запрещается.

В лаборатории должен быть постоянный запас дезактивирующих средств (щавелевая кислота, фосфаты, моющие средства и др.), подбираемых с учетом изотопов и их соединений, с которыми проводится работа, и характера дезактивируемых поверхностей.

По окончании работы каждый сотрудник должен убирать свое рабочее место, дезактивировать посуду, инструменты и другое оборудование до предельно допустимых уровней, контролируя радиометрическими приборами. Если разлит радиоактивный раствор или рассыпан порошок, то нужно выключить вентиляцию, надеть средства индивидуальной защиты и принять меры к сбору раствора или порошка и удалению их, а затем эти места подвергают радиометрическому контролю.

После работы перед снятием средства индивидуальной защиты должны быть проверены на чистоту, при загрязнении – дезактивированы до предельно допустимых уровней в специально отведенном месте. Руки и отдельные части тела, загрязненные радиоактивными веществами, необходимо немедленно вымыть с мылом, или порошком «Защита».

В помещениях для работы с открытыми источниками запрещается:

- а) пребывание сотрудников без необходимых средств индивидуальной защиты;
- б) хранение пищевых продуктов, табачных изделий, косметики, домашней одежды;
- в) прием пищи, курение, пользование косметикой.

Радиационный контроль проводится или выделенными лицами из числа сотрудников, прошедших специальную подготовку, или службой радиационной безопасности.

Индивидуальный контроль за дозами облучения персонала проводят один раз в месяц, контроль за уровнем загрязнения рабочих поверхностей, оборудования, кожных покровов и спецодежды работающих – каждый раз после работы с радиоактивными веществами, уровень загрязнения смежных помещений контролируется один раз в квартал, контроль за содержанием радиоактивных веществ в воздухе рабочих помещений – не реже двух раз в месяц, а в сточных водах – один раз в квартал.

17.3. Виды и средства индивидуальной защиты

Виды защиты:

Биологическая – повышение резистентности организма – витамины, биостимуляторы (элеутерокок, женьшень, сокращение рабочего дня, усиленное питание, молоко).

Химическая – применение радиопротекторов – веществ, которые снижают поражающий эффект радиации. Таких веществ свыше 250 тыс. (например, препараты, содержащие серу).

Физическая защита:

Защита количеством – чем выше радиоактивность препарата, тем интенсивнее излучение и больше поражающий эффект. Разбавление РВ обычной дистиллированной водой снижает опасность.

Защита временем. Нужно знать период полураспада ($T_{1/2}$) – время, за которое РВ распадается на половину (секунды, минуты, годы).

Защита расстоянием. Нужно знать с каким видом излучения вы работаете и пробег в воздухе α -излучение – пробег в воздухе равен 10 см. Значит, можно защититься расстоянием, в руки они не проникают – они опасны при попадании внутрь, можно пользоваться дистанционными инструментами. Доза обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Защита экранами – выбор экрана зависит от свойств радиоактивных излучений: альфа – воздух, лист бумаги; бета – металл; гамма – свинец, баритобетон.

Средства индивидуальной защиты.

При работе с радиоактивными веществами в открытом виде необходимо использовать средства индивидуальной защиты. Радиоактивное загрязнение спецодежды, индивидуальных средств защиты и кожных покровов персонала не должно превышать допустимых уровней (частиц/см²/мин).

Различают следующие виды средств индивидуальной защиты:

- *изолирующие костюмы* (пневмокостюмы, гидроизолирующие костюмы);
- *средства защиты органов дыхания* (респираторы, противогазы, пневмошлемы и т. д.);
- *специальная одежда* (комбинезоны, полукомбинезоны, куртки, брюки, халаты, фартуки и т. д.);
- *специальная обувь* (сапоги, ботинки, следы и т. д.);
- *средства защиты рук* (перчатки, рукавицы);
- *средства защиты глаз* (защитные очки);
- *предохранительные приспособления* (ручные захваты, манипуляторы и т. д.).

Выбор средств индивидуальной защиты определяют условиями работы и радиационной обстановкой, характером и объемом выполняемых работ, уровнем загрязнения воздуха и рабочих поверхностей.

17.4. Международные и Российские организации, занимающиеся вопросами действия ионизирующих излучений на живые организмы

Проблема защиты населения от действия ионизирующих излучений имеет глобальный характер, а поэтому соответствующие научно-исследовательские и организационные мероприятия разрабатываются международными организациями, рекомендации которых используются отдельными странами при составлении собственных национальных регламентов. Перечисленные ниже международные организации в своих публикациях и других документах предлагают лишь рекомендации по основным принципам регламентирования действия радиации, а также обосновывают проблемы, нуждающиеся в дальнейшей научной разработке. Эти рекомендации не являются обязательными для принятия в законодательные акты и документы отдельных стран.

Международная Комиссия по радиологической защите (МКРЗ) неправительственная научная организация, основанная в 1928 году Международным обществом по радиологии (профессиональное общество врачей радиологов). МКРЗ анализирует и обобщает все достижения в области защиты от ионизирующих излучений и периодически разрабатывает соответствующие рекомендации. С учетом этих рекомендаций построены практически все национальные, в том числе российские, нормативные документы, регламентирующие облучение человека [Белоус Д.А., 2004]. МКРЗ состоит из главной комиссии и четырех комитетов, состав которых обновляется 1 раз в 4 года.

Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ)

Научный комитет по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций (НКДАР ООН) организован в 1955 г., осуществляет сбор и анализ международной информации о различных аспектах действия ионизирующих излучений на живые организмы [Белов А.Д., 1996]. Раз в несколько лет публикует итоги работы, содержащие самые подробные и разносторонние оценки воздействия разных доз радиации от всех известных источников ионизирующего излучения, их опасности для населения (Белоус).

Международная ассоциация по радиационной защите (МАРЗ)

Перечисленные международные организации в своих публикациях и других документах предлагают лишь рекомендации по основным принципам регламентирования действия радиации, а также обосновывают проблемы, нуждающиеся в дальнейшей научной разработке. Эти рекомендации не являются, однако, обязательными для принятия в законодательные акты и документы отдельных стран [Белов А.Д., 1996].

Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) учреждено в 1957 году, курирует вопросы, связанные с радиационной безопасностью на всех этапах работ по мирному использованию атомной энергии. МАГАТЭ является официальной организацией ООН и все страны – члены МАГАТЭ обязаны выполнять утвержденные ею официальные нормы и правила обращения с источниками ионизирующих излучений, если возникающие при этом вопросы касаются межгосударственных отношений [Белов А.Д., 1996]. Членами МАГАТЭ являются 130 стран. Мандат Агентства включает три главные задачи: содействие в обеспечении ядерной и радиационной безопасности во всех странах, нераспространение ядерного оружия, развитие ядерных технологий для удовлетворения потребностей человечества, в том числе оказание помощи развивающимся странам при соблюдении принципов экологической безопасности [Белоус Д.А., 2004].

Российские организации, занимающиеся обеспечением радиационной безопасности.

Национальная комиссия по радиационной защите (НКРЗ) действует в качестве консультативного органа при Министерстве здравоохранения Российской Федерации. В функции НКРЗ входит

иницирование, обобщение и анализ отечественных и зарубежных исследований по проблеме, решение оперативных вопросов обеспечения радиационной безопасности в различных отраслях народного хозяйства, а также систематическое совершенствование законодательных актов, регламентирующих радиационное воздействие на человека и окружающую среду [Белов А.Д., 1996].

Министерство по атомной энергии Российской Федерации (Минатом). В его подчинении находятся большинство ядерно- и радиационно-опасных объектов. Минатом России решает следующие основные задачи:

- обеспечение экологической безопасности, непревышение научно обоснованного уровня радиационного воздействия на население и окружающую природную среду в зонах влияния деятельности предприятий и организаций ядерно-промышленного комплекса (ЯПК);

- охрана окружающей среды от вредного воздействия техногенных факторов, рациональное использование природных ресурсов и ядерных материалов;

- устранение экологических последствий и вреда, нанесенного природной средой предприятиями и организациями ЯПК при создании ядерного оружия и вследствие радиационных аварий [Белоус Д.А., 2004].

Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) осуществляет глобальный контроль радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды на территории России. Эта система базируется на пунктах наблюдения за мощностью экспозиционной дозы; радиоактивными атмосферными выпадениями; концентрацией ^{137}Cs и ^{90}Sr в водах рек, пресных водоемов и морей и др.

Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности (Госатомнадзор) отвечает за безопасность использования атомной энергии, ядерных материалов, радиоактивных веществ и ионизирующего излучения. Инспекторы Госатомнадзора анализируют все аспекты опасного радиационного или ядерного производства (или его строительства), и любая деятельность, связанная соответствующими технологиями, ведется только с разрешения Госатомнадзора и под его контролем.

18. Химические средства противолучевой защиты

18.1 Основные противолучевые препараты (радиопротекторы).

Расширяющееся применение ионизирующих излучений в различных областях науки и техники выдвигает в качестве одной из фундаментальных задач радиобиологии поиск путей повышения радиостойчивости организма. Применение ядерных частиц в онкологии и развитие космических исследований делает актуальным решение этих вопросов применительно к малоизученным видам радиации, в частности к корпускулярным излучениям высоких энергий. Реальная возможность повышения радиорезистентности

организма состоит в применении *средств противолучевой защиты (радиопротекторов)*, под которыми понимают:

1) специальные фармакологические препараты — **радиопротекторы;**

2) создание гипоксического состояния кратковременным вдыханием обедненных кислородом газовых смесей.

Нет такого класса соединений, в котором бы не был произведен поиск радиозащитных средств в экспериментах на животных.

Цианистый натрий (NaCN , яд) - первое соединение, о котором в 1949 г. А. Эрв и З. Бак сообщили как о протекторе; введение его Mbiuaif в количестве 5 мг/кг непосредственно перед облучением в летальных дозах повышало их выживаемость по сравнению с контролем.

Цистеин — второе соединение, с которым связано открытие явления фармакологической противолучевой защиты. Г. Патт в 1949 г. сообщил о значительном повышении выживаемости мышей, получавших перед облучением в летальных дозах инъекцию цистеина в количестве 1000 мг/кг.

В последующем был обнаружен радиозащитный эффект цистеина и цистамина (З. Бак), меркаптопропиламина (Е.Ф. Романцев), серотопина (Г. Лангендорф), мексамина (П.Г. Жеребченко, Н.Н. Суворов), аминоэтилизотиурония (Г. Доэрти), аминоалкилтиофосфатов (П.Г. Жеребченко и др.), индралина (М.В. Васин), а также резерпина, гистамина, оксида углерода, парааминопропиофенона и др.

Несмотря на обилие испытанных средств, наиболее перспективные и высокоэффективные из них относятся к двум большим классам соединений: 1) индолилалкиламинам и 2) меркаптоалкиламинам.

1) Индолилалкиламины.

Относящиеся к этому классу соединения можно рассматривать как производные **триптамина**.

Триптамин при внутрибрюшном введении мышам за 5—20 мин перед облучением повышает их выживаемость на 25—30% по сравнению с контролем. Значительно более выраженным радиозащитным эффектом обладает 5-окситриптамин, известный под названием **серотонин**:

2) Меркаптоалкиламины.

Вскоре после открытия радиозащитного действия цистеина было показано (З. Бак, 1952), что продукт декарбоксилирования этой аминокислоты — *цистеинамин (цистеамин, 2-меркаптоэтиламин — МЭА, бекаптан, меркамин)* обладает более выраженным противолучевым эффектом. Внутрибрюшное введение мышам или крысам МЭА в количестве 150 мг/кг за 5—15 мин перед облучением их в минимальной абсолютно летальной дозе позволяет предотвратить гибель 80—100% животных.

Обнаружение радиозащитных свойств МЭА послужило импульсом к интенсивному поиску радиозащитных средств в классе серосодержащих

соединений, в результате были обнаружены другие не менее эффективные протекторы. Главные из них:

- цистамин (и дисульфид МЭА);
- меркаптопропиламин (и его дисульфид);
- аминоэтилизотиуроний;
- меркаптоэтилгуанидин и его дисульфид — гуанилэтилдисульфид
- меркаптопропилгуанидин;
- аминоалкилтиофосфаты, которые имеют общую структуру:



Общей характерной чертой аминотиолов и индолилалкиламино является выраженная зависимость их защитного действия от химической структуры, самое небольшое изменение которой приводит к ослаблению или утрате защитного эффекта.

Различия между этими классами соединений **состоят в следующем:**

- диапазон эффективных доз (концентраций) тиолов узок, причем защитный эффект нарастает с дозой препарата и достигает максимум одновременно с проявлением токсического действия, вызывающей гибель контрольных животных;

Поэтому очень важной характеристикой конкретного протектор является его **терапевтическая широта, или терапевтический индекс.**

Под терапевтическим индексом в фармакологии принимают отношение летальной дозы (обычно DL_{50}) лекарственного вещества к эффективной дозе; применительно к протекторам — к дозе, вызывающей защиту отдельного применения этих протекторов.

Механизмы противолучевой защиты. Согласно общепринятым представлениям радиопротекторы прямо или косвенно уменьшают эффективную дозу излучения. Например, если при введении какого-либо протектора перед облучением животных их радиочувствительность - $DL_{30/30}$ снижается с 10 Гр до 6 Гр, то фактор изменения дозы ФИД = $10 \text{ Гр} / 6 \text{ Гр} = 1,7$.

В первом приближении это означает, что подопытные животные, которым введен протектор, после облучения в дозе 10 Гр по общему состоянию адекватны контрольным животным, облученным в дозе 6 Гр без протектора.

При анализе возможностей противолучевой защиты организма обычно исходят из предполагаемых механизмов защиты клеток его критических систем, гибелью которых обусловлены основные синдромы ОЛБ (острой лучевой болезни).

В многочисленных работах, посвященных защитному эффекту разнообразных протекторов, авторы первоначально стремились расшифровать молекулярные и биохимические механизмы защиты, специфичные для исследуемых ими средств. Из-за многообразия и сложности острого лучевого синдрома казалось маловероятным существование универсального механизма защиты. Однако по мере накопления экспериментальных данных все более реальным становилось и

поныне господствующее представление о каком-то общем механизме действия абсолютного большинства радиопротекторов (Э.Я. Граевский, 1960). Об этом свидетельствуют некоторые общие феноменологические признаки защитного эффекта соединений разных классов:

1) Прежде всего их роднит необходимость введения протекторов до облучения.

2) Величина ФИД наиболее эффективных протекторов и их смесей, а также общей гипоксии в опытах на животных и в экспериментах *in vitro* примерно одинакова и составляет около 3.

3) Общим свойством всех радиозащитных средств является зависимость их действия от ЛПЭ действующего излучения, с увеличением которой эффективность защиты, постепенно уменьшаясь, исчезает.

Если, исходя из сходства в проявлении защитного эффекта, сделать вывод о существовании некоего единого механизма защиты, то логично предположить необходимость непосредственного участия протекторов в акте защиты, определяемом общим для всех классов веществ свойством. С таким же основанием можно предполагать, что радиозащитный эффект обусловлен однонаправленными метаболическими изменениями, наступающими под влиянием различных противолучевых агентов, независимо от их природы. Именно к этому и сводятся гипотезы, постулирующие существование единого опосредованного механизма защиты. Их различие заключается лишь в определении эндогенных факторов, осуществляющих это опосредованное влияние.

Для иллюстрации кратко, без обсуждения изложим суть нескольких теорий механизма действия протекторов.

1) Например, начиная с первых работ П. Александера и З. Бака (1955), установивших для соединений различных классов корреляцию между их радиозащитной активностью *in vivo* и *in vitro*, широкое распространение получила точка зрения об общем механизме действия протекторов, состоящем в уменьшении косвенного действия радиации путем перехвата и инактивации свободных радикалов и других активных продуктов радиолиза воды.

2) Существует предположение о возможности связи защитного действия протекторов со сдвигом в окислительно-восстановительном потенциале (E_h) клеток.

3) В большом числе экспериментальных исследований установлено что наблюдаемое под влиянием протекторов повышение радиоустойчивости объектов сопровождается увеличением содержания в них эндогенных сульфгидрильных (тиольных SH) групп. Это происходит не только при применении тиоловых (содержащих в своей структуре сульфгидрильные группы) протекторов, но и при введении индолилалкиламиннов и даже при создании газовой гипоксии. Следовательно, речь идет не о привнесенных тиоловых группах, а о повышении их эндогенного содержания, что дало основание рассматривать сульфгидрильные группы как естественные

протекторы, уровень которых, с точки зрения приверженцев данной точки зрения, в значительной степени определяй также и различия в природной радиочувствительности.

4) В 1964 г. З. Бак и П. Александер попытались выявить общности механизма защитного действия для широкого круга серосодержащие протекторов. Они обратили внимание на связь защитного эффекта тиолов с изменениями, происходящими под их действием в клетках; Оказалось, что различные морфологические и функциональные сдвиги коррелируют по времени и степени выраженности с защитным эффектом. К числу таких сдвигов относятся: ингибирование метаболических реакций, исчезновение крист (перегородок, протянувшихся от внутренней мембраны в глубь матрицы. Они обеспечивают митохондрии компартментализацию, деление на отсеки, необходимые для протекания биохимических процессов) в митохондриях и размытие матрикса, нарушение проницаемости плазматических мембран и другие нарушения. **Комплекс этих изменений, получивших название «биохимического шока», наблюдался только для тех SH-соединений и их концентраций, которые оказывают эффективную защиту.**

5) Универсальность кислородного эффекта (КЭ) делает понятным стремление многих исследователей так или иначе связать с КЭ механизм действия большинства протекторов, тем более что ФИД при защите эффективными протекторами и максимальная величина кислородного эффекта близки друг к другу.

Показано, что все протекторы из класса индолилалкиламинов, а также другие, обладающие радиозащитным эффектом, биологически активные соединения (**адреналин, гистамин, Р-фенилэтиламин, морфин, героин, оксид углерода, нитрит натрия, унитиол, димеркаптопропионовая кислота**) вызывают определяемое методом полярографии отчетливое снижение напряжения кислорода в тканях, в частности в селезенке, по времени соответствующее их максимальному защитному эффекту. Для перечисленных аминов это свойство коррелирует с их сосудосуживающим действием; в основе гипоксии, вызываемой другими веществами, лежат иные механизмы:

- 1) образование метгемоглобина (нитрит натрия, парааминопропиофенон);
- 2) карбоксигемоглобина (СО);
- 3) ингибирование дыхательных ферментов (цианиды);
- 4) угнетение дыхательного центра (морфин, героин) и т. д.

Подтверждением фармакологической природы действия указанных соединений и ее связи с кислородным эффектом служат данные о возможности ослабления или отмены защиты их антагонистами и антиметаболитами, а также повышением давления кислорода.

По данным М.М. Константиновой (1970), противолучевой эффект гипотермии у гомойотермных животных также определяется гипоксическим

механизмом, так как защита при охлаждении проявляется лишь при снижении напряжения кислорода в тканях ниже 50% от исходного уровня, т. е. в условиях, как будто бы исключая его сосудосуживающее действие. Однако эти работы ни в какой степени не опровергают значения фармакологической гипоксии как основного фактора в механизме радиозащитного действия.

Таким образом, механизм защитного действия большого числа протекторов, включая все индолилалкиламины, в организме в той или иной степени связан с КЭ.

Ограничения химической защиты, связанные с условиями облучения.

Эффективность **химической защиты**, существенно изменяется в зависимости от многих условий облучения, и это обстоятельство накладывает значительные ограничения на сферу использования биологических радиозащитных средств.

Химическая защита организма максимально выражена при однократном остром воздействии редкоизионизирующими видами радиации (β , γ).

Защитное действие всех протекторов, а также гипоксии (об этом упоминалось) падает с ростом ЛПЭ излучений. Поэтому эффективность химической защиты организма снижается при облучении тяжелыми заряженными частицами и нейтронами.

Эффективность радиопротекторов заметно снижается при фракционированном облучении и особенно резко — при хроническом облучении.

Это связано с необходимостью многократного введения протекторов в организм для поддержания во время облучения в достаточной концентрации либо их самих, либо вызываемого ими уровня ответственных за реализацию защитного эффекта метаболических изменений. Кроме того, это осложняется токсичностью протекторов и возможным развитием тахифилаксии (привыкания).

Ослабление защитного эффекта при фракционированном радиационном воздействии объясняется и тем, что на уровне организма защита максимально проявляется при высоких дозах облучения и снижается по мере их уменьшения.

18.2 Основные радиосенсибилизаторы.

Особенностью управления радиочувствительностью в условиях лучевой терапии злокачественных новообразований является необходимость обеспечения избирательности воздействия излучения.

Итак, при лучевой терапии необходимо:

1) усиление радиационного воздействия (сенсбилизация) опухолей;

2) одновременно ослабить радиационное воздействие на здоровые ткани.

Самым простым методом усиления радиационного воздействия (сенсбилизации) опухолей является *прямое использование кислородного эффекта (КЭ)*. Для чего предложено прямое насыщение кислородом- (оксигенация) гипоксических опухолевых клеток, например, при дыхании чистого кислорода.

В начале 50-х годов английские радиобиологи Л. Грей и О. Скотт разработали метод **оксибарорадиотерапии** — на время сеансов лучевой терапии больного помещали в барокамеру, в которой кислород находился под давлением в три атмосферы. При таком давлении кислородом насыщается не только гемоглобин, но и существенно увеличивается парциальное напряжение кислорода, растворенного в плазме крови. При этом было необоснованно предположено, что дополнительное повышение концентрации кислорода не скажется на реакции хорошо оксигенированных нормальных тканей, радиочувствительность которых уже при дыхании воздухом максимальна, в то время как плохо оксигенированные участки опухоли в этих условиях станут более радиочувствительными.

Практическое применение оксибарорадиотерапии подтвердило возможность усиления регрессии некоторых опухолей. По данным С.Л. Дарьяловой, имеющей самый большой опыт оксибарорадиотерапии в нашей стране, метод был наиболее эффективен при недифференцированных формах опухолей различных локализаций, но особенно опухолей головы и шеи. В недифференцированных опухолях существует наибольший дисбаланс между ростом паренхимы и стромы, что приводит к неадекватному кровоснабжению и нарастанию опухолевой гипоксии.

Нельзя, однако, не отметить, что успехи оксибарорадиотерапии оказались скромнее, чем того ожидали. Сейчас понятно, что в значительной степени это было связано с технической невозможностью использовать обычное фракционирование, так как длительность сеанса в условиях использования барокамеры диктовала необходимость ограничения их числа, т. е. применения больших фракций, что неблагоприятно сказывается на тяжести отдаленной лучевой патологии. Кроме того, оказалось, что некоторые ткани человека, в частности кожа, слюнные железы и хрящ, в нормальных условиях также содержат гипоксические клетки, радиочувствительность которых в условиях гипербарической оксигенации возрастала, что потребовало снижения курсовых доз. Оказалось, также, что даже при повышенном давлении кислород не доходит до некоторых клеток, вероятнее всего, клеток, гипоксия которых вызвана временным прерыванием кровотока. Вместе с тем использование гипербарической оксигенации позволило улучшить результаты лечения нескольких видов опухолей, в первую очередь карциномы шейки матки и новообразований головы и шеи.

В настоящее время активно используется другой метод оксигенации — дыхание карбогеном, смесью кислорода с 3—5% углекислого газа,

усиливающего легочную вентиляцию за счет стимулирования дыхательного центра. Улучшению оксигенации опухолевых клеток при этом способствует назначение больным никотинамида — препарата, расширяющего кровеносные сосуды.

Большое внимание уделяется *разработке химических соединений, обладающих электронакцепторными свойствами*, имеющих, как и кислород, высокое сродство к электрону и потому выполняющих его функции «фиксации» лучевых поражений ДНК. При этом в отличие от кислорода **электронакцепторные сенсibilизаторы (ЭАС)** не используются клеткой в процессе энергетического метаболизма и потому диффундируют на значительное расстояние от капилляров.

Первые данные о радиомодифицирующем действии электронакцепторных сенсibilизаторов (ЭАС) были получены для **метронидазола и мизонидазола**. Препарат, не влияя на действие ионизирующего излучения в воздухе, резко снижает выживаемость клеток, облученных в атмосфере азота: на уровне 1%-й выживаемости ФИД азота по отношению к облучению на воздухе в обычных условиях составляет 2,7, а при введении в среду метронидазола снижается до 1,75.

К настоящему времени проведены клинические испытания ряда ЭАС с пониженной (по сравнению с первыми препаратами — метро- и мизонидазолом) токсичностью; к их числу относятся: японский препарат АК-2127, датский ниморазол и американский этанидазол синкавит и др. АК-2127 оказался эффективен при лечении рака шейки матки; использование ниморазола повышает эффективность лучевой терапии опухолей головы и шеи.

Вместе с тем многие препараты, дававшие в эксперименте высокую сенсibilизацию гипоксических клеток, в клинике оказались неэффективными.

Радиобиологические исследования помогли установить причины столь значительного снижения эффективности при переходе от эксперимента к клинике. Экспериментальные исследования с облучением опухолей животных обычно проводят в условиях однократного облучения или, в лучшем случае, крупнофракционированного. В клинике при полном курсе лучевой терапии обычно применяют мелкие фракции. Однако с увеличением числа фракций возрастает токсичность препарата, вследствие чего приходится снижать его дозу, что уменьшает сенсibilизирующий эффект. Кроме того, сенсibilизирующее действие и кислорода, и ЭАС снижается в области доз порядка 2 Гр, используемых при стандартной лучевой терапии.

Таким образом, при переходе от крупнофракционированного облучения в эксперименте к мелкофракционированному в клинике эффективность ЭАС понижается, при этом требуется применять большее количество препарата (со всеми или хотя бы с большей частью фракций), что сделать невозможно из-за их высокой нейротоксичности.

Разработки новых ЭАС продолжаются и в настоящее время, но гораздо менее интенсивно, чем это было в 70-е и 80-е годы.

18.3. Возможности химических средств противолучевой защиты человека

Несомненные успехи экспериментальной разработки средств противолучевой защиты на разных видах животных продемонстрировали возможность в 1,5—2 раза ослабить поражающее действие острого внешнего облучения (в большом числе экспериментов ФИД = 2). Это давало основание рассчитывать на успешное использование изученных протекторов человеком, подобно тому как это имеет место в широкой фармакологической практике в отношении других лечебно-профилактических препаратов. Однако на пути применения радиозащитных средств человеком возникло много трудностей и ограничений, преодоление которых остается актуальным и по сей день.

Одно из главных ограничений использования фармакохимических средств для противолучевой защиты человека состоит в том, что они эффективны только при предварительном применении перед облучением.

Другое ограничение, препятствующее практическому применению протекторов, состоит в их высокой токсичности и малой терапевтической широте (диапазоне между токсичными и эффективными дозами) препаратов.

Оба эти ограничения в той или иной степени присущи и другим классам лечебно-профилактических средств, однако коренное и принципиальное отличие от них состоит в особенностях повреждающего агента — ионизирующего излучения. Успешная реализация биологической противолучевой защиты, как это было видно из изложения ее механизмов, требует либо присутствия молекул протектора в критическом органе, либо создания в нем состояния гипоксии, но обязательно только в процессе размена энергии излучения.

Иными словами, в отличие от всех остальных патологических состояний, когда в распоряжении врача имеется больший или меньший запас времени, в случае использования протекторов гарантированный успех ограничен минимальным отрезком времени между их введением в организм и периодом облучения.

В чрезвычайных ситуациях (ЧС) их использование возможно, например, при двух обстоятельствах:

- в случае упреждающего сигнала о ядерной опасности;
- при преодолении зараженных радиоактивными веществами полос и рубежей, если оно не занимает длительного времени, так как эффективность защитного эффекта протекторов с течением времени сильно падает.

В мирное время область применения радиозащитных средств расширяется:

- для ослабления поражения нормальных тканей при лучевой терапии опухолей в онкологии;

— защиты человека от радиационной опасности при работе в космосе, особенно в случае солнечных вспышек. Вследствие большого количества энергии, освобождающейся при каждой из них, на космическом корабле, несмотря на физическую защиту, создаваемую его стенками (и усиленную в защитном отсеке), уровни облучения могут достигать величин, опасных для здоровья космонавтов;

— защиты человека от радиационной опасности при работе в аварийных обстоятельствах, возможных при использовании ядерных технологий.

Реальные возможности биологической защиты человека.

Анализ современного состояния этого вопроса (по Ярмоненко), несмотря на очевидную сложность однозначного ответа, не дает оснований для пессимизма.

Прежде всего нельзя механически переносить на человека дозы фармакологически активных соединений, определенные для животных, в расчете на килограмм массы, ибо из общей фармакологии известно, что для достижения равнозначного эффекта человеку часто требуется значительно меньшее количество препарата, чем животным. В.Г. Владимиров и Т.Г. Джаракян в монографии, посвященной этому вопросу (1983) обосновали проведение соответствующих расчетов следующим образом. Размеры клеток одних и тех же тканей у млекопитающих разных видов примерно одинаковы, а количество микросом и митохондрий и, следовательно, содержание в них ферментов и других активных биосубстратов у мелких лабораторных животных значительно выше.

Например, концентрация цитохрома «С» у мыши составляет 1105 мкг/г сухой массы ткани, а у человека 45. Отсюда фармакологическая активность веществ, связанная с воздействием на митохондрии, даже при равенстве внутриклеточной концентрации препарата будет различной. *Равноэффективные дозы, например, мефеназина для мышей и человека различаются в 10 раз при расчете на единицу массы и только в 2 раза при расчете на единицу поверхности тела.*

Наиболее существенные достижения в области противолучевой защиты были получены в последние годы при изучении альфа-адреномиметиков, в результате чего был отобран как наиболее эффективный препарат **индралин**. Свойства препарата:

- ФИД, близким к 3;
- терапевтический индекс около 20—30;
- небольшой интервал времени (около 5 мин);
- разовая доза 3 таблетки по 0,15 г

Впервые противолучевые свойства у адреномиметиков были отмечены в 1952 г. в работах З. Бака, А. Эрва и Д. Грея. Наиболее выраженными противолучевыми свойствами обладают альфа-адреномиметики. Среди них наиболее всесторонне изучен индралин.

Индралин является радиопротектором экстренного действия, предназначенного для защиты персонала от воздействия высокоинтенсивного ионизирующего излучения в условиях радиационных аварий на АЭС и других радиационно опасных объектах. Препарат входит в состав индивидуальной противорадиационной аптечки (АП) для персонала предприятий атомной энергетики РФ.

Выраженные противолучевые свойства индралина выявлены на шести видах животных: мышах, крысах, хомячках, морских свинках, собаках и обезьянах (М.В. Васин, 2001, Л.А. Ильин с соавт., 1994). Индралин пока единственный среди известных радиопротекторов, с помощью которого была установлена возможность достижения максимального радиозащитного эффекта с ФИД, близким к 3, на крупных животных (собаках). При этом он обладает значительной широтой радиозащитного действия на крупных животных (**терапевтический индекс составляет 20—30**).

Индралин, являясь альфа-адреномиметиком прямого действия, способен вызывать сосудосуживающий (вазоконстрикторный) эффект, не уступающий адреналину. Механизм его радиозащитного действия тесно связан с развитием острой гипоксии в радиочувствительных тканях. Сравнительный анализ высокой противолучевой эффективности индралина на собаках и его практически полное отсутствие в тех же условиях у мексамина при равном (в 2 раза) снижении напряжения кислорода в костном мозге животных свидетельствует, что отмечаемая степень циркуляторной гипоксии в радиочувствительных тканях не может полностью объяснить наблюдаемый радиозащитный эффект индралина. Существенный вклад в развитие острой гипоксии в радиочувствительных тканях, очевидно, может внести метаболическая гипоксия вследствие усиления потребления кислорода в тканях под действием адреномиметиков.

Помимо выраженных противолучевых свойств и большой широты радиозащитного действия, индралин обладает еще одним преимуществом перед другими радиопротекторами, важным в экстремальных аварийных ситуациях, а именно — небольшим интервалом времени (около 5 мин) для достижения радиозащитного действия после его приема внутрь в виде таблеток (разовая доза 3 таблетки по 0,15 г).

Все эти данные послужили основанием для клинической оценки и принятия индралина (под шифром Б-190) в качестве профилактического радиозащитного средства у практически здоровых людей в чрезвычайных условиях и аварийных ситуациях в случае прогнозирования получения ими доз облучения, вызывающих развитие ОЛБ.

Инструкция по применению препарата Б-190 одобрена Фармакологическим комитетом Минздрава России от 15.11.2002 г. и утверждена 19.06.2003 г. Департаментом государственного контроля лекарственных средств и медицинской техники Минздрава России.

Тем не менее дальнейшая разработка средств и способов биологической противолучевой защиты организма по-прежнему остается

актуальной, хотя и сложной задачей радиобиологии человека как с практической точки зрения, так и с целью углубления теоретических основ и дальнейшего изучения молекулярно-клеточных механизмов действия ионизирующих излучений.

19. Определение дозы внешнего и внутреннего облучения расчетным методом

При составлении радиационно-гигиенического паспорта территорий ежегодно в органах Госсанэпиднадзора МЗ РФ, контроле степени облучения людей и сельскохозяйственных животных в ЧС и т. д., необходимо определять дозы внешнего и внутреннего облучения, т. е. «определять РО - радиационную обстановку на данной территории». Знание доз облучения позволяет:

- проводить грамотную социальную политику в регионе;
- управлять радиационными рисками населения и персонала;
- делать количественную и качественную оценку состояния здоровья населения, животных и биоты — (окружающих форм растительности и животных по Р. М. Алексахину, 2005 г.);
- выявлять и предупреждать возможные лучевые поражения животных и людей при радиационных ЧС.

При облучении дозу можно определить, как с помощью дозиметрических приборов, так и с не меньшей точностью, путем вычислений и моделирования РО и особое значение имеют расчетные методы определения доз внешнего и внутреннего облучения при проведении предупредительного ветеринарно-санитарного надзора и при оценке степени поражения сельскохозяйственных животных в результате радиационных аварий.

Для количественной оценки уровня внутреннего облучения, как и в случаях внешнего воздействия, используют, как правило, величину поглощенной дозы с учетом коэффициентов общей биологической эффективности.

При оценке малых уровней облучения, ограниченных областью радиационной защиты, используют эквивалентную дозу, рассчитываемую с помощью соответствующих коэффициентов (например, коэффициентов качества излучения), учитывающих, прежде всего, характерные для тех или иных инкорпорированных радионуклидов концентрационные и временные условия формирования тканевых доз.

Кроме того, в отличие от внешнего облучения, когда роль организма пассивна, при инкорпорированном воздействии организм играет активную роль в формировании тканевых доз из-за транспортных и метаболических процессов, обуславливающих накопление и выведение радионуклидов из определенных органов и тканей.

19.1. Общая характеристика поступления радиоактивных веществ в организм

Принято различать следующие источники ионизирующего излучения воздействия на организм человека, сельскохозяйственных животных и растения:

- 1) внешние источники облучения;
- 2) внутренние источники облучения;
- 3) комбинированные, т. е. сумма внешних и внутренних источников облучения одновременно.

При этом вариант комбинированного облучения, самый сложный для рассмотрения, имеет наибольшее практическое значение.

Источниками **внешнего** облучения являются радионуклиды, распределенные в различных компонентах окружающей среды (приземном слое атмосферы, почве, растительности, подстилке, жилых и производственных сооружениях, а также осевшие на шерсть и кожу).

Источниками **внутреннего** облучения служат радионуклиды, инкорпорированные (включенные) в различные части тела, органы и ткани животных в процессе жизнедеятельности (метаболизма).

Радиоактивные вещества могут проникать в организм животных и человека через:

- 1) легкие при вдыхании загрязненного воздуха (ингаляционное или аэральное поступление);
- 2) желудочно-кишечный тракт с кормом и водой (пероральное или алиментарное поступление);
- 3) неповрежденную (!) кожу и слизистые оболочки (транскутанное поступление);
- 4) плаценту, что характерно для зародыша (плацентарное поступление).

Соотношение значимости различных путей поступления радионуклидов в организм животных примерно следующее: органы дыхания — 1; желудочно-кишечный тракт - 1000; кожа — 0,0001.

Основным путем поступления радионуклидов в организм человека и животных считается пищеварительный тракт (основная парадигма радиобиологии, В.М. Клечковский, 1956 г., Россия, М. Рассел 1966 г., США).

Важнейшую роль в пероральном поступлении играет механизм всасывания нуклидов в желудочно-кишечном тракте. Характер всасывания зависит от физико-химических свойств радионуклидов, вида, возраста, физиологического состояния организма и многих других факторов.

Для оценки биологической подвижности радионуклида используют коэффициент всасывания (табл. 19.1).

Коэффициенты всасывания радиоизотопов в желудочно-кишечном тракте взрослых сельскохозяйственных животных, %

Радионуклиды	КРС	Овцы	Козы	Свиньи	Куры
⁴⁰ K	92	70-100	70-100	70-100	95
⁴⁵ Ca	11	35,2	20	-	50-60
⁵⁴ Mn	0,5-1,0	46	1-20	7-20	20-44
⁵⁹ Fe	4,2	1-20	1-20	16,5-21,4	71,5
⁶⁰ Co	2,4	3,5	4,7	2,8	35,2
⁶⁵ Zn	11	10	1-20	51,4	64
⁹⁰ Sr	6.4-15,5	6.6-10	3,4-13,8	13,5	0-80
⁹⁰ Y	0.05	0,05	<1	1,0	<1
⁹⁵ Zr	0.08	<1	<1	<1	<1
^{103,106} Ru	2,3	0.15	0,14	1,1	3,0
¹³¹ I	100	100	70-100	33-76	75-80
¹³⁷ Cs	50-75	56,5	68,3	100	67
¹⁴⁰ Ba	5	1-20	1-20	1-20	1-20
¹⁴⁴ Ce	0.06	0,03-0,05	1,0	0,5	<1
²³⁸ U	<1	<1	<1	<1	<1
²³⁴ Pu	4	-	-	0,0022	

$$F_{BC} = (A/B) \cdot 100\%,$$

где А — количество перешедших в кровь радионуклидов, Бк;

В - количество радионуклидов, поступивших с суточным рационом, Бк.

У моногастричных животных и птиц коэффициенты всасывания значительно выше, чем у жвачных. Молодые особи усваивают радионуклиды интенсивнее, чем взрослые. Кроме того, фиксация радионуклидов в их организме происходит полнее. Уменьшение всасываемости радионуклидов в желудочно-кишечном тракте связано с меньшей потребностью взрослого организма в минеральных веществах, а также ухудшением проницаемости мембран кишечной стенки.

Всосавшиеся в желудочно-кишечном тракте радионуклиды разносятся кровью по всем органам и тканям. Распределение нуклидов по органам и тканям тесно связано с их природой и ритмом поступления в организм, например: ¹³⁷Cs, щелочные металлы, тритий и радиоуглерод распределяются в организме более или менее равномерно (диффузный I тип распределения), щелочноземельные радиоизотопы (а также ⁷Be, ⁴⁵Ca, ⁹⁰Sr, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰Ra) концентрируются в минеральном компоненте костной ткани (остеотропный тип распределения), редкоземельные (⁴⁸V, ⁷⁵Se, ⁷⁶As, ¹²⁵Sb, ²³⁸U) - в печени и ретикулоэндотелий (печеночный тип распределения), йод, Cl, Br — в щитовидной железе (тиреотропный тип распределения).

Для разных видов сельскохозяйственных животных характерны свои особенности и величины накопления радионуклидов. Так, концентрация ^{90}Sr в скелете трехмесячных телят соответствует 2% от введенного количества на 1 кг сухого вещества, у поросят — 14%, у ягнят — 10%.

С возрастом способность животных к накоплению радионуклидов уменьшается. Это связано, во-первых, со снижением потребности организма в минеральных веществах, во-вторых — с уменьшением их всасываемости в желудочно-кишечном тракте.

При длительном поступлении радионуклидов в организм их концентрация в органах может быть значительно выше, чем при разовом (до 30—50 раз). В условиях длительного поступления рано или поздно наступает момент, когда уровень поступления изотопа оказывается равен его выведению. Для ^{90}Sr такое равновесное состояние наступает на 5—7 сутки у крупного и мелкого рогатого скота и на 30—90 сутки у свиней и кур. Для ^{137}Cs оно наступает позднее: у овец и коз к 105 суткам, у крупного рогатого скота — к 150 суткам с начала поступления.

Накопление радиостронция в организме животных при его хроническом поступлении зависит от состояния кальциевого обмена. При дефиците кальция его место занимает стронций.

Насыщение кальцием дефицитного по этому элементу рациона позволяет уменьшить поступление ^{90}Sr в организм в 2—4 раза. **Однако этот эффект достигается лишь в том случае, если кальция до этого в кормах явно не хватало.**

В этом же смысл и «йодной профилактики»: добавление в рацион препаратов йода (йодиол, йодактив, йодомарин и др.) предотвращает поступление радиоактивного йода в организм защищаемого человека или животного. В ЧС можно приготовить препарат самому, например: 2—4 капли (!) обычной спиртовой настойки йода на стакан молока (или отвара крахмала (кисель) тщательно перемешать 2 мин при комнатной температуре и пить 1—2 раза в сутки (для взрослого человека). При этом изменение цвета от коричневого до голубого — свидетельство готовности препарата к употреблению.

Сходная зависимость характерна для метаболизма радиоцезия. Так, известно, что у животных, таких, как КРС, козы и овцы, питающихся грубыми и сочными кормами, богатыми калием, химическим аналогом которого является Cs, коэффициенты накопления в организме ^{137}Cs значительно меньше, чем у кур, свиней, собак и человека.

При попадании в организм больших количеств радиоактивных веществ, что чаще всего происходит в чрезвычайных условиях, развивается острое лучевое поражение, особенности которого определяются специфическими чертами инкорпорированного нуклида. Например, при инкорпорации радиоактивных изотопов фосфора или натрия, отличающихся относительно коротким периодом полураспада, равномерна его распределением и достаточно жестким излучением, возникает типичная

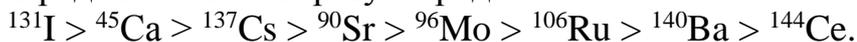
острая лучевая болезнь, не отличающаяся от развивающейся при внешнем общем облучении. При попадании органотропных радионуклидов разыгрываются различные варианты лучевого поражения с преимущественными проявлениями в тканях (где дозовая нагрузка максимальна), которые в этом случае становятся критическими.

Существенная особенность поражений при внутреннем облучении состоит в том, что особую опасность в таких случаях приобретают радионуклиды тяжелых элементов, испускающие не только β -, но и α -частицы. Обладая высокой ОБЭ (относительной биологической эффективностью), эти виды излучения, несмотря на малую проникающую способность, вызывают тяжелые повреждения эндотелия и эпителия воздухоносных путей и кишечника, в которых они оставляют всю свою энергию.

19.2. Выведение радионуклидов из организма

Радионуклиды, поступившие в организм, выводятся через желудочно-кишечный тракт, почки, легкие, кожу и молочную железу. К этим - путям можно добавить выведение радионуклидов с плодом при родах и с яйцом у кур-несушек. Ведущим путем выведения для большинства радиоизотопов (таких, как ^{60}Co , $^{89,90}\text{Sr}$, ^{106}Ru , ^{140}Ba и ^{144}Ce) является желудочно-кишечный тракт. Помимо выведения с экскрементами не всосавшихся в желудочно-кишечном тракте радионуклидов, этим путем выделяются и экскретирующиеся через стенки желудка и кишечника стронций, рубидий и другие изотопы. Изотопы йода и цезия экскретируются из организма преимущественно через почки. При этом; существуют видовые, возрастные и физиологические особенности выведения разных нуклидов. Например, ^{137}Cs у жвачных выводится преимущественно через желудочно-кишечный тракт, а у свиней — с мочой. Лактирующие коровы через молочную железу выводят всего лишь; 3,2% в то время как овцы и козы — 20,5 и 40%.

Выведение радиоизотопов из организма сельскохозяйственных животных с молоком имеет большое практическое значение, так как молоко и молочные продукты являются важными источниками поступления радионуклидов в организм человека. По степени перехода радионуклидов в молоко радиоизотопы образуют ряд:



Это значит, что при одинаковых концентрациях изотопов в данном ряду в молоко перейдет больше всего изотопа ^{131}I и меньше всего — изотопа ^{144}Ce .

При этом интенсивность выведения того или иного изотопа существенно колеблется и определяется в основном формами, в которых он находится в организме. Быстрее всего организм освобождается от радионуклидов, накапливающихся в мягких тканях, таких, как ^{137}Cs , ^{131}I , ^{96}Mo . Остеотропные (накапливающиеся в костной ткани) радионуклиды, такие, как ^{90}Sr , выводятся гораздо медленнее. Так, у крупного рогатого скота

для ^{137}Cs $T_{1/2} = 3$ сут, $T_2 = 46$ сут, в то время как для ^{90}Sr $T_{1/2}$ превышает 3000 сут.

Различают **биологический период полувыведения** ($T_{\text{биол}}$) — время, в течение которого концентрация нуклида снижается вдвое в результате процессов метаболизма.

Период полураспада радиоизотопа ($T_{1/2}$) — **время, за которое распадается половина от начального количества радионуклида** (это физическая характеристика радиоизотопа). Для количественного описания скорости, с которой организм освобождается от радионуклидов, используют специальный показатель — **эффективный период полувыведения** ($T_{\text{эф}}$). **Эффективный период полувыведения** ($T_{\text{эф}}$) — время, за которое из организма выбывает 50% первоначального количества нуклидов как за счет метаболического выведения, так и за счет физического распада:

$$X = T_{1/2} T_{\text{биол}} / T_{\text{эф}} + T_{\text{биол}}$$

Существуют трудности, связанные с дозиметрией излучения инкорпорированных радионуклидов, главной задачей которой является исследование пространственного и временного распределения поглощенной дозы с учетом ЛПЭ и распределения радионуклидов по всем тканям и органам. Эта задача может быть решена при сопоставлении теоретического и экспериментального определения количества радионуклидов в организме, а также особенностей их поведения в зависимости от анатомо-физиологических параметров отдельных тканей, органов и систем.

19.3. Расчетный метод определения доз облучения от внешних источников

В основу расчетных методов определения доз облучения положены закономерности распространения ионизирующих излучений в пространстве и закономерности взаимодействия ионизирующих излучений с веществом.

Для расчета доз облучения от внешних источников используют формулу для «точечного» источника:

$$D = 0,93 \cdot K_{\gamma} \cdot A \cdot t \cdot 0,01 / R^2, \text{ где}$$

D — доза облучения, Гр

K — $R \cdot \text{см}^2/\text{ч} \cdot \text{мКи}$, γ -постоянная для данного изотопа, являющегося γ -излучателем (см. справочник), например, в приложениях 1, 2 приведены γ -постоянные различных изотопов;

A — мКи, количество (активность) источника радиоизотопа;

t — час, время облучения;

R — см, расстояние до источника;

0,01 - коэффициент перевода единиц измерения рад в Гр.

19.4 Вычисление доз облучения при поступлении радиоизотопов внутрь организма.

При усвоении данного вопроса необходимо изучить материал учебника, законспектировать материал методических указаний, знать и учитывать ряд закономерностей:

1. Радиоактивные изотопы, попавшие в организм, будут облучать его в течение всего времени нахождения в нем. Время нахождения радиоизотопа в организме определяется его эффективным периодом полувыведения – $T_{эфф}$, который вычисляется по формуле:

$$T_{эфф} = \frac{T_{физ} \times T_{биол}}{T_{физ} + T_{биол}}$$

$T_{эфф}$ показывает за какое время количество радиоизотопа уменьшается в организме в два раза, т.е. на половину. $T_{эфф}$ зависит от периода полураспада радиоизотопа ($T_{физ}$) и периода полувыведения изотопа из организма ($T_{биол}$), т.е. времени за которое выводится половина количества изотопа (с калом, мочой, молоком).

2. Радиоактивные изотопы, попавшие в организм, вступают в химические соединения с различными веществами его ткани. Например: изотопы йода (йод-131) входят в состав гормонов щитовидной железы, а изотопы стронция (Sr-90), кальция (Ca-45) входят в состав костной ткани.

3. Радиоизотопы накапливаются в чувствительных к излучению и важных для жизнедеятельности организма органах и тканях, так называемых критических органах и тканях. Например, изотопы йода концентрируются в щитовидной железе, изотопы стронция, фосфора, кальция в костях, цезия в мышцах, полония в почках и т.д. Радиоизотопы, облучая органы и ткани, создают дозу внутреннего облучения.

4. При внутреннем облучении необходимо учитывать коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) различных видов излучений. Наибольшую опасность при внутреннем облучении представляют альфа-излучающие изотопы (полоний-210, свинец-210, плутоний-239), которые вызывают очень большую плотность ионизации тканей.

5. Поглощенная доза облучения при внутреннем воздействии прямопропорциональна концентрации изотопа в органах и тканях организма. Чем больше радиоизотопа попадает в организм, тем больше будет поглощенная доза внутреннего облучения.

Поглощенная доза за счет гамма-излучения, накапливаются от момента поступления изотопа до полного его распада может быть рассчитана по следующей формуле:

$$D = 0,032 \cdot K_{\gamma} \cdot A \cdot T_{эфф}, \text{ где:}$$

D – поглощенная доза облучения, рад;

0,032- постоянный расчетный коэффициент поглощенных доз;

K_{γ} - гамма-постоянная радиоизотопа;

A – количество радиоизотопа в ткани, мКи;

$T_{эфф}$ – эффективный период полувыведения радиоизотопа из организма (или из органа при расчете поглощенной дозы в органе).

Поглощенная доза за счет бета-излучения, накапливающаяся от момента поступления радиоизотопа до полного его распада, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$D_{\beta\infty} = 73,8 * A * \bar{E}_{\beta} * T_{эфф}, \text{ где:}$$

D_{β} – поглощенная доза облучения, рад;

73,8 – постоянный расчетный коэффициент поглощенных доз;

A – количество радиоизотопа в ткани, мКи;

\bar{E}_{β} – средняя энергия бета-частиц, МЗв;

$T_{эфф}$ – эффективный период полувыведения радиоизотопа из организма.

Поглощенная доза за счет альфа-излучения, накапливающаяся от момента поступления изотопа до полного его распада, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$D_{\alpha\infty} = 73,8 * A * E_{\alpha} * T_{эфф} * (OBE), \text{ где:}$$

D – поглощенная доза облучения, бер;

E_{α} – энергия альфа-частиц, МЗв;

ОБЭ – относительная биологическая эффективность излучения.

Остальные значения те же, что и в предыдущих формулах.

Если организм одновременно подвергается внутреннему облучению различными видами излучения, то рассчитанные дозы от каждого вида излучения суммируются.

Выше приведенные формулы можно использовать при расчетах поглощенных доз облучения, получаемых организмом от короткоживущих радиоизотопов (T физ. равно сек, мин, часам, суткам).

Для определения поглощенных доз облучения на любой момент времени (t) от долгоживущих радиоизотопов (T физ равно годам, векам, тысячелетиям) в формулы вводится следующее выражение:

$$\left(1 - e^{-\frac{0,693 * t}{T_{эфф}}}\right)$$

, где:

e – основание натуральных логарифмов (2,72);

0,693 – натуральный логарифм 2 (2); t – промежуток времени, в течение которого облучается организм, сутки;

T физ – эффективный период полувыведения радиоизотопа, сутки.

Таким образом, например, для расчета доз от бета-излучающих изотопов формула примет следующий вид:

$$\left(1 - e^{-\frac{0,693 * t}{T_{эфф}}}\right)$$

$$D(t) = 73,8 * A * \bar{E}_{\beta} * T_{физ} * \left(1 - e^{-\frac{0,693 * t}{T_{эфф}}}\right),$$

$$\left(-\frac{0,693 * t}{T_{эфф}}\right)$$

Показатель степени основания натуральных логарифмов (e) вычисляется, а затем находят значение e-x по специальным таблицам (таблицы значений функций ex и e-x).

Самостоятельная работа по вычислению поглощенных доз облучения при поступлении радиоизотопов внутрь организма

Для вычисления поглощенных доз облучения при поступлении радиоизотопов внутрь организма, в зависимости от вида излучения, рекомендуется использовать следующие формулы:

Для радиоизотопов гамма-излучателей

$$D_{\gamma} = 0,032 * K_{\gamma} * A * T_{эфф}$$

Для радиоизотопов альфа – излучателей

$$D_{\alpha} = 73,8 * A * E_{\alpha} * T_{эфф} * ОБЭ$$

Для радиоизотопов бета– излучателей

$$D_{\beta} = 73,8 * A * \bar{E}_{\beta} * T_{эфф}$$

$D_{\gamma, \alpha, \beta}$ – доза облучения, рад (или альфа-излучения в бэрах);

0,032 – постоянный расчетный коэффициент поглощенной дозы гамма-излучения;

73,8 – постоянный расчетный коэффициент поглощенной дозы альфа- или бета – излучения;

K_{γ} – гамма-постоянная радиоизотопа ($R * cm^2 / ч * mKi$);

A – количество радиоизотопа в тканях или органах, мКи;

E_{α} - энергия альфа-частиц, Мэв;

\bar{E}_{β} – средняя энергия бета-частиц, Мэв (для определения средней энергии нужно максимальную энергию излучения данного изотопа, она дается в таблице, умножить на коэффициент 0,4);

$T_{эфф}$ – эффективный период полувыведения радиоизотопа из организма или из органа, сутки (находится по таблице или вычисляется по формуле);

ОБЭ - коэффициент относительной биологической эффективности излучения. Для альфа-частиц ОБЭ (коэффициент качества, КК) равен 20;

Для удобства вычисления доз облучения начертите в тетрадь следующую таблицу и выполните задание по варианту.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ДАДАЧ

Дано: $P_0 = 210$, α - акт = 1,810 мКи, критический орган – кости.

Решение:

α - акт = $1,810 * 10^{-3}$ мКи,

$T_{эфф} = 25$, $E = 5,3$

$D\alpha = 73,8 * 1,810 * 10^{-3} * 5,3 * 25 * 20 = 353,98$

Ответ: $D\alpha = 354$ бэр.

20.0. Ветеринарно-санитарная экспертиза продукции животноводства, полученной на территории, загрязненной радионуклидами

20.1. Общие положения

Пребывание животных на загрязненной территории может привести к их радиационному поражению различной степени. Выявление таких животных в ходе диспансеризации требует либо ветеринарного наблюдения и лечения, либо направления на убой.

Решение проблемы оптимального использования животных для получения молока и мяса зависит от правильной организации их содержания. Так, для получения доброкачественного и нормативно-чистого мяса необходимо обеспечить надлежащее предубойное содержание, ветеринарный осмотр, дозиметрический контроль, сортировку большого числа животных, одновременно оказавшихся на загрязненной территории, соблюдение очередности и своевременности их убоя с учетом возможности дальнейшего хранения, транспортировки и консервирования мяса.

Большое значение имеет ветеринарно-санитарная экспертиза продукции животноводства, так как одним из определяющих факторов санитарной оценки продукта является уровень его радиоактивной загрязненности. Своевременное и полное проведение ветеринарно-санитарной экспертизы предотвращает потребление населением мяса, субпродуктов, молока, продуктов его переработки и яиц, загрязненных радиоактивными веществами выше допустимого уровня, а также снижает потери продовольственного скота в условиях радиоактивного загрязнения территории.

Предубойный осмотр, убой, ветеринарно-санитарную экспертизу туш и органов животных проводят с соблюдением мер индивидуальной защиты, при дозиметрическом контроле персонала и на основании требований ОСПОРБ – 99 и НРБ – 99.

20.2. Предубойный осмотр, сортировка и убой животных

Предубойный осмотр животных, находящихся на загрязненной радионуклидами территории, проводят с целью определения рациональных сроков убоя. На первом этапе по данным дозиметрического контроля радиационной обстановки, изотопного состава и характера радиоактивных выпадений в районе пребывания животных, а также типа их содержания оценивают вид поражения (внешнее или сочетанное) и прогнозируют степень его тяжести.

Сортировка животных по характеру и степени поражения внешним и внутренним облучением – одно из основных и ранних мероприятий, проводимых с целью ликвидации последствий радиоактивного загрязнения территории. Цели сортировки: не допустить продукцию животноводства в пищу населению и сырье для промышленности с радиоактивным загрязнением выше допустимых уровней, в целом не отвечающих ветеринарно-санитарным требованиям; снизить потери в животноводстве; обеспечить сохранение племенных и особо ценных животных; определить пути наиболее оптимального и полного использования пораженных животных.

Сортировка включает в себя: оценку радиационной обстановки на местности, радиационного фона и радиоактивного загрязнения территории, пастбищ, кормов и других объектов ветеринарного надзора; клинического состояния животных, выявление больных и постановку диагноза; прогнозирование характера и исхода радиационных поражений и степени лучевой болезни, определение хозяйственного использования животных.

Сортировку животных, находящихся в очаге, начинают с определения степени их радиоактивного загрязнения, разделяя на две группы: имеющие загрязнение выше допустимых величин и ниже или равное им.

Группу животных с радиоактивным загрязнением ниже допустимой величины осматривают и проводят индивидуальную дозиметрию. По данным обследования создают группы клинически здоровых и больных животных. У животных первой группы уточняют дозы внешнего и внутреннего облучений и прогнозируют степень лучевой болезни. У животных второй группы, имеющих клинические признаки болезни, уточняют диагноз и при необходимости выделяют группы заразных и незаразных болезней и с комбинированными поражениями. По результатам сортировки намечают оптимальные пути хозяйственного использования животных в соответствии с действующими рекомендациями.

Для сортировки пораженных животных проводят диспансеризацию, которую дополняют дозиметрическими, радиометрическими, радиохимическими исследованиями. По результатам этих исследований делают основные выводы о степени радиационного поражения скота и определяют пути дальнейшего хозяйственного использования животных.

Животных, больных острой лучевой болезнью легкой, средней, тяжелой и крайне тяжелой степеней, развивающейся после однократного и

повторного γ -облучения, а также внутреннего (^{131}I) и сочетанного (γ -облучение и ^{131}I) радиационного поражения, можно убивать на мясо для хозяйственного использования во все периоды развития болезни. В случае вынужденного содержания овец, пораженных радиацией в дозах, вызывающих острую лучевую болезнь от легкой до крайне тяжелой степеней тяжести, в течение 7 суток без воды и корма возможность использования их на мясо сохраняется. Однако в этом случае наблюдают существенное снижение выхода мяса (на 12...17 %), белка и жира мышечной ткани, а также калорийности. Мясо этих животных по результатам органолептических, биохимических и бактериологических исследований отвечает требованиям доброкачественного. Выраженные признаки лучевого поражения, расстройства дыхания и пищеварения, лейкопения, снижение аппетита, угнетение, эпидемия не являются противопоказаниями к убою животных на мясо. К убою на мясо не допускают больных животных с профузным кровавым поносом и находящихся в атональном состоянии. Выход мяса при убое овец, подвергнутых радиационному воздействию в дозах, вызывающих тяжелую и крайне тяжелую степени лучевой болезни в латентный период, период выраженных клинических признаков и период выздоровления, снижается на 8...29 %. Но биохимические показатели этого мяса соответствуют таковым доброкачественного продукта. Мясо, полученное от подвергнутых радиационному воздействию овец в период разгара лучевой болезни средней, тяжелой и крайне тяжелой степеней, при положительных температурах (0...4 °С) имеет пониженную устойчивость к хранению. Мясо, полученное от овец в период разгара лучевой болезни крайне тяжелой степени после внешнего γ -облучения, в условиях промышленного холодильника при температуре -15...-18 °С в течение 10...12 месяцев сохраняет доброкачественность.

При отправке на убой каждая партия животных должна иметь ветеринарное свидетельство по установленной форме, в котором кроме заполнения имеющихся граф указывают следующие данные: дата, время и продолжительность нахождения животных на территории, загрязненной радионуклидами; дозы внешнего и внутреннего облучений животных (расчетной или по данным дозиметрической службы); сведения о радиоактивном загрязнении кормов; уровни радиоактивного загрязнения кожных покровов животных; сведения о проведении ветеринарных обработок.

Уровни радиоактивного загрязнения кожных покровов и содержание радионуклидов в желудочно-кишечном тракте измеряют дозиметрами ДП-5А, СРП-68-01 или другими подобными приборами. Замеры проводят со стороны спины и крупа, определяя поверхностное загрязнение животных. Затем измеряют уровень излучения в области левой голодной ямки и мечевидного хряща, определяя наличие радиоактивных веществ в желудочно-кишечном тракте животных. Если показания прибора при измерении в области левой голодной ямки и мечевидного хряща не

превышают результатов с поверхностей спины и крупа, то в желудочно-кишечном тракте не содержатся радиоактивные вещества.

Животных, имеющих высокую радиоактивную загрязненность кожных покровов, подвергают ветеринарной обработке. Это необходимо для обеспечения безопасности персонала, выполняющего технологические операции убоя и разделки туш.

Ветеринарную обработку животных проводят на специальной площадке, развешиваемой на дезактивированном участке местности, или в помещениях, допускающих возможность ее проведения.

При поступлении на боенскую площадку животных подвергают повторной дозиметрии с целью прижизненного определения содержания радионуклидов в мышечной ткани. Животных с повышенным содержанием радионуклидов передерживают с использованием чистых кормов. При необходимости производят контрольный убой нескольких животных с последующей радиометрией органов и тканей, а также определением изотопного состава радиоактивного загрязнения.

Сроки убоя животных на мясо устанавливают с учетом их состояния. В первую очередь убивают животных с комбинированными поражениями – острая лучевая болезнь с травмами, местными поражениями, а также животных, у которых в прогнозе развитие лучевой болезни крайне тяжелой степени. Этим животным целесообразно убивать на мясо в течение первых 2...4 суток после облучения.

Во вторую очередь убивают животных, у которых в прогнозе лучевая болезнь тяжелой степени, – в течение первой недели после радиационного воздействия.

В гуртах скота, у которых прогнозируют лучевую болезнь средней степени, убою подлежат ослабленные и старые животные в первые 15 суток после лучевого поражения. За остальными животными устанавливают наблюдение.

При легкой степени лучевой болезни сроки убоя животных не лимитированы.

При внешнем облучении в любой дозе все виды продуктивного скота могут быть использованы на мясо. Однако необходимо учитывать, что пищевая пригодность мяса и субпродуктов зависит от времени, прошедшего после лучевого воздействия. При убое скота, подвергнутого внешнему облучению, проводят тщательный предубойный осмотр с обязательной термометрией, ветеринарно- санитарную экспертизу мясных туш и органов.

Животных, подвергшихся радиационному поражению, отправляют для убоя на мясо по разрешению соответствующих органов государственной службы субъектов Российской Федерации отдельными партиями и в согласованные с боенскими предприятиями сроки. Отправка таких животных законом запрещена.

20.3. Послеубойный осмотр туш и органов

Мясо и другие продукты убоя животных подлежат обязательной ветеринарно-санитарной экспертизе. Ветеринарный врач, проводящий послеубойный осмотр туш и органов животных, должен знать о результатах их предубойного осмотра. Целью ветеринарного осмотра продуктов убоя является диагностика в них поражений и изменений, характерных для болезней или отклонений от нормы, а также для принятия решения о порядке использования туш и других продуктов убоя.

Продукты убоя после окончания ветеринарно-санитарного осмотра могут быть использованы следующим образом: на общих основаниях (без ограничений); с ограничениями для изготовления отдельных видов мясных продуктов на промышленном предприятии; для пищевых целей после обезвреживания пораженных продуктов убоя; на утилизацию или уничтожение.

Ветеринарно-санитарная экспертиза туш и органов животных, подвергшихся радиационному воздействию, должна проводиться с учетом радиоактивной загрязненности.

Мясо и другие продукты убоя животных, подвергшихся только внешнему γ -облучению, используют без ограничений, если при послеубойном осмотре не обнаружено патологоанатомических изменений. При их наличии решение об использовании мяса и субпродуктов принимают после обязательного бактериологического исследования. Шкуры выпускают без ограничений.

Основанием для проведения бактериологического анализа являются следующие патологоанатомические изменения в туше пораженных животных. При убое животных в скрытый период и разгар острой лучевой болезни обнаруживают кровоизлияния почти во всех органах и тканях, но чаще всего они локализуются в эпикарде, реберной плевре, подкожной клетчатке, почках, слизистой оболочке пищеварительного канала. Кровоизлияния в эпикарде располагаются около основания сердца и по ходу венечных сосудов. В почках точечные и полосчатые кровоизлияния находят в корковом веществе и в области почечных лоханок. Отмечают кровоизлияния в слизистой двенадцатиперстной кишки и преджелудков крупного и мелкого рогатого скота, в слизистой желудка и кишечника у свиней. Лимфатические узлы слегка набухшие. Костный мозг опустошен. Вследствие этого на распиле губчатых костей костный мозг может иметь желтый цвет.

У животных, убитых в период разрешения острой лучевой болезни, можно обнаружить следы кровоизлияний в виде скопления гемосидерина в слизистой оболочке кишечника, а также гемосидероз лимфатических узлов, придающий им ярко-ржавую окраску. Костный мозг может иметь нормальный цвет, но при анемии он более бледный.

Все эти признаки радиационных поражений указывают на подавление защитно-барьерных функций организма. Экспериментально установлены ослабление естественного и приобретенного иммунитета, снижение барьерно-фиксирующих свойств лимфатических узлов, снижение антитоксической функции печени, угнетение макрофагальной защиты, уменьшение интенсивности антител образования, увеличение проницаемости кожи, слизистых оболочек, снижение их бактерицидных свойств, извращение воспалительной реакции на проникновение микроорганизмов.

Нарушение барьеров и повышение проницаемости стенки сосудов уже в скрытом периоде острой лучевой болезни способствуют проникновению в лимфатические пути и общий кровоток условно-патогенной микрофлоры.

Мясо животных, у которых обнаружены радиоактивные вещества в желудочно-кишечном тракте, исследуют радиометрически. Для этого от каждой однородной партии в выборку включают 10 % туш крупного рогатого скота, 5 % туш овец, свиней и 2 % замороженных или охлажденных блоков мяса и субпродуктов. Тушки птиц отбирают от поставляемой на реализацию партии методом случайной выборки. Число проб зависит от количества единиц транспортных упаковок в партии. Пробы кур и уток отбирают полутушками, гусей и индеек – четвертой части тушки. При отборе проб на ферме объем выборки составляет не менее трех тушек для кур, уток, гусей и индеек. При отборе проб мяса кроликов и нутрий от каждой транспортной упаковки отбирают не более одной тушки кролика (нутрии).

При отборе проб костей в выборку включают 10 % туш (полутуш, четвертин) крупного рогатого скота и 5 % туш (полутуш) овец и свиней.

Отбор проб готовой мясной продукции, полуфабрикатов, копченостей и колбасных изделий проводят из выборки упаковочных единиц (ящики, коробки и т. п.), которая составляет 10 % всей партии, но не менее двух единиц.

Точечные образцы мышечной ткани отбирают от каждой включенной в выборку мясной туши или ее части целым куском массой не менее 200 г из следующих мест: у зареза, против 4...5-го шейного позвонка, в области лопатки и бедра.

Образцы от блоков мяса и субпродуктов отбирают также целыми кусками массой не менее 200 г. Из полученных точечных проб формируют объединенную пробу. Масса объединенной пробы должна быть не менее 1 кг. Для образования средней пробы (1 кг) мясо пропускают через мясорубку или нарезают кусочками (10...15 г) и тщательно перемешивают. В качестве точечных проб костей отбирают ребра животных или шейные позвонки.

Пробы заворачивают в несколько слоев марли, смоченной 4...5%-м раствором формалина, помещают в пакеты из плотного полиэтилена и завязывают. На пробы составляют сопроводительный документ (акт отбора проб) в двух экземплярах. Один экземпляр акта и опись упаковывают вместе с пробами, направляемыми на исследование. Второй экземпляр акта остается на предприятии, где проводили отбор.

На первом этапе аварийной ситуации (в условиях интенсивного радиоактивного загрязнения территории) высокая точность измерения радиоактивности проб исследуемых объектов не имеет особого значения. Напротив, в условиях загрязнения территории долгоживущими изотопами (особенно в малых дозах) первостепенное значение имеет точность определений.

Особенности ветеринарно-санитарной экспертизы молока, полученного от коров, подвергшихся внешнему и внутреннему облучениям, связаны с возможностью бактериального и радиоактивного загрязнения продукта. Молоко от коров с легкой и средней степенями тяжести лучевой болезни может иметь повышенную бактериальную обсемененность, в том числе и микрофлорой из группы стафилококков. Поэтому такое молоко в первые 14 суток выпускают в реализацию после кипячения в течение 20...30 мин. В последующие дни молоко от таких коров выпускают без ограничений. В то же время, это молоко по органолептическим и биохимическим показателям, а также по содержанию жира, белка, лактозы, минеральных веществ и витаминов не отличается от молока здоровых животных. При острой лучевой болезни тяжелой степени тяжести удои резко снижаются и молоко коров как продукт питания ценности не представляет.

В соответствии с требованиями Ветеринарных правил (ВП 13.73.13–00) при содержании животных на загрязненной радионуклидами территории кроме общепринятых методов ветеринарно-санитарной экспертизы продукции животноводства необходимо в обязательном порядке проводить определение содержания в ней радионуклидов. Реализация такой продукции зависит от соответствия содержания в ней радионуклидов требованиям СанПиН 2.3.2.1078–01 или временным допустимым уровням, устанавливаемым органами Роспотребнадзора в соответствии с действующим законодательством.

Контроль содержания радионуклидов в продукции животноводства осуществляют в соответствии с действующими нормативными документами: Положение о сети наблюдений и лабораторного контроля, Положение о системе государственного ветеринарного контроля радиоактивного загрязнения объектов ветеринарного надзора в Российской Федерации (1998).

Отбор проб и оценку уровней радиоактивного загрязнения продукции животноводства проводят в соответствии с требованиями, изложенными в Методических указаниях по отбору проб объектов ветеринарного надзора для проведения радиологических исследований (1997), Методических указаниях по методам контроля (МУК 2.6.1.717–98), Методических указаниях (МУ 5778–91, МУ 5779–91, МУ 5180–90).

20.4. Радиационная экспертиза продукции животноводства

В зависимости от уровней радиоактивного загрязнения исследуемых проб спектрометрические и радиометрические измерения могут быть проведены как без предварительного концентрирования радиоизотопа, так и с его предварительным концентрированием.

Современная аппаратура позволяет проводить гамма-спектрометрические измерения проб объемом от долей литра (килограмма) до нескольких литров (килограммов). Аналогичные возможности имеет и радиометрическая аппаратура.

В случае невозможности прямого определения содержания радионуклида в исследуемом объекте проводят предварительное концентрирование радиоизотопа методами термического или кислотного озоления.

При *термическом (сухом) озолении* объем пробы сильно уменьшается. Термическое озоление включает в себя высушивание и обугливание пробы с последующим прокаливанием в муфельной печи при температуре 450...650 °С в фарфоровом тигле. Если в зольном остатке присутствуют обугленные частицы, пробу охлаждают, смачивают концентрированной азотной кислотой, высушивают и повторно озоляют. Хорошо озоленная проба должна представлять собой однородную массу серого цвета, не содержащую обугленных включений. В процессе озоления не допускают воспламенения озоляемого материала, так как это приводит к потерям изотопа. Необходимо помнить, что термическое озоление приводит к частичной потере изотопов, имеющих летучие соединения.

Кислотное (мокрое химическое) озоление, то есть растворение исследуемой пробы в концентрированной азотной или серной кислоте, – более трудоемкий и длительный процесс. Преимущество этого метода заключается в получении растворимых солей и, как правило, минимальной потере изотопа.

Методы озоления используют как на начальных стадиях обработки проб перед проведением радиохимических исследований, так и при подготовке проб для радиометрических и спектрометрических измерений.

Действие всех радиометрических, дозиметрических и спектрометрических приборов, применяемых для инструментального измерения ионизирующего излучения, основано на принципе преобразования первичного взаимодействия ионизирующего излучения с материалом детектора в электрический импульс определенных параметров.

Выделяют три класса приборов для измерений количественных характеристик ионизирующего излучения: дозиметры – приборы для измерения экспозиционной и поглощенной доз и мощности дозы рентгеновского и γ -излучения; радиометры – приборы для измерения удельной объемной, массовой или поверхностной активности радиоактивно

загрязненных объектов; спектрометры – приборы для измерения распределения излучений по энергии и идентификации изотопного состава.

Технические возможности современной радиометрической и спектрометрической аппаратуры позволяют определять удельную (массовую, объемную) активность и идентифицировать изотопный состав радионуклидов, обуславливающих радиоактивное загрязнение объектов ветнадзора.

Радиометрический анализ. Методы определения суммарной β -активности объектов радиометрического контроля основаны на измерении потока β -частиц, испускаемых образцом, с использованием для этих целей физических устройств.

В практической радиометрии применяют методы «тонких» и «толстых» образцов.

Метод «тонких» образцов. «Тонким» считается образец (препарат), толщина слоя которого практически не поглощает испускаемые радионуклидом β -частицы. Теоретически количество зарегистрированных на выходе детектора излучения импульсов зависит от целого ряда параметров:

- массы навески образца, его плотности (г/см^3), максимальной энергии β -спектра радионуклида;
- поглощения β -излучения в материале образца;
- геометрического фактора, учитывающего взаимное расположение источника излучения и детектора;
- поглощения β -излучения в материале окошка счетчика;
- материала подложки, на которой находится измеряемый образец;
- эффективности регистрации детектором излучения проходящих через него ионизирующих частиц измеряемого образца;
- эффективности регистрации детектором естественного (природного, обусловленного преимущественно наличием ^{40}K и космического излучения) потока ионизирующих частиц.

Метод «толстых» образцов. «Толстым» считается образец (препарат), дальнейшее увеличение толщины слоя, которого практически не увеличивает выход из препарата испускаемых радионуклидом β -частиц. Теоретически количество зарегистрированных на выходе детектора излучения импульсов зависит от целого ряда параметров:

- плотности измеряемого образца (г/см^2);
- максимальной энергии β -спектра радионуклида;
- площади образца и регистрирующего окна детектора;
- геометрического фактора, учитывающего взаимное расположение источника излучения и детектора;
- поглощения β -излучения в материале окошка счетчика;
- материала подложки, на которой находится измеряемый образец;
- эффективности регистрации детектором излучения проходящих через него ионизирующих частиц измеряемого образца;

- эффективности регистрации детектором естественного (природного, обусловленного преимущественно наличием ^{40}K и космического излучения) потока ионизирующих частиц.

Для практической радиометрии достаточно иметь коэффициент пересчета, характеризующий взаимосвязь количества зарегистрированных электронным регистрирующим устройством числа импульсов и активности эталонного препарата, приготовленного из материала, аналогичного измеряемому, с известным изотопным составом и удельной радиоактивностью.

Гамма-спектрометрия. Основная задача гамма-спектрометрии – определение энергии и интенсивности излучения. В детекторе γ -излучения (полупроводниковом или сцинтилляционном) преобразуется спектр γ -излучения в спектр импульсов напряжения различной амплитуды. После прохождения предусилителя, усилителя и формирователя импульсов электрический сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь, который измеряет амплитуду аналогового импульса с выхода усилителя и представляет его в виде цифрового кода. Цифровой код, соответствующий каждому зарегистрированному импульсу, заносится в память компьютера или многоканального анализатора импульсов.

Одной из основных характеристик гамма-спектрометра является энергетическое разрешение детектора излучения – минимальное различие энергии γ -излучения, которое на выходе регистрируется как два независимых электрических импульса. Полупроводниковый детектор по этому показателю значительно превосходит сцинтилляционный, но для своей работы требует постоянного охлаждения германиевого кристалла жидким азотом.

Современный уровень развития микрорадиоэлектроники позволяет автоматически обрабатывать аппаратурные γ -спектры и выводить на экран дисплея или печатающее устройство информацию об изотопном составе исследуемого образца и количестве каждого из идентифицированных изотопов.

Радиохимический анализ. Его применяют для идентификации и определения концентрации как отдельного изотопа, так и группы изотопов при проведении оценки уровней радиоактивного загрязнения объектов ветнадзора.

Первым этапом радиохимических исследований, как правило, является перевод изотопов из твердой фазы в раствор. Для этих целей используют термическое или кислотное озоление. Вне зависимости от выбранного метода озоления предварительно к исследуемой пробе добавляют соответствующий изотопный носитель (стабильный аналог определяемого радиоактивного изотопа), предпочтительнее в форме нитрата или хлорида.

Если после завершения кислотного озоления раствор готов для проведения последующих операций, то после термического озоления необходимо растворить минеральный (зольный) остаток в азотной или соляной кислоте.

Из всего многообразия методов радиохимического выделения радиоизотопов для практических целей контроля содержания радионуклидов в объектах ветернадзора наиболее приемлемы методы экстракции и соосаждения.

Метод экстракции основан на неоднородности распределения изотопов между водной и органической фазами. Метод отличается быстротой и легкостью исполнения. Однако данный метод пригоден для выделения, весьма ограниченного числа радионуклидов.

Значительно эффективнее, но труднее по выполнению метод соосаждения, основанный на максимальном и более полном выделении носителя и исследуемого изотопа и отделении осадка от сопутствующих элементов.

Следующий этап радиохимических исследований – очистка и последующая проверка радиохимической чистоты выделенного изотопа. Последняя операция может быть проведена значительно быстрее при наличии спектрометрической аппаратуры, которая идентифицирует изотопный состав. При отсутствии спектрометрической аппаратуры радиохимическую чистоту проверяют по кривой распада выделенного радиоизотопа путем периодических определений радиоактивности исследуемого препарата на радиометре.

По результатам радиометрических, спектрометрических и радиохимических исследований дается заключение о соответствии продукции действующим нормативным уровням радиоактивного загрязнения.

При содержании радионуклидов выше допустимых уровней внутренние органы направляют на утилизацию (с высоким уровнем радиоактивного загрязнения – на захоронение в специально отведенных местах), а мясо подвергают дезактивации путем посола, проварки, обвалки (при загрязнении ^{90}Sr) или выдержки в специальных камерах до спада радиоактивности (при загрязнении короткоживущими радионуклидами). По разрешению соответствующих органов государственной ветеринарной службы субъектов Российской Федерации мясо и субпродукты с содержанием радионуклидов выше допустимых уровней могут быть использованы в корм свиньям и птице при выращивании в первой стадии откорма, а также для кормления пушных зверей.

Правила ветеринарно-санитарной и радиационной экспертизы продукции животноводства приведены в приложении.

21.0 Дезактивация продуктов и сырья животного происхождения.

21.1. Общие положения

При радиологических ситуациях, связанных с применением ядерного оружия или радиационными авариями, необходимо рационально использовать продукты убоя пораженных животных, загрязненных радиоактивными веществами (РВ) выше допустимых уровней (ДУ).

Использование такой продукции животноводства предполагает дезактивацию (обезвреживание) и недопущение в реализацию продукции с содержанием РВ выше ДУ.

Дезактивация – это процесс удаления РВ с загрязненных поверхностей (при внешнем), а также радионуклидов из продуктов и сырья животного происхождения при внутреннем радиоактивном загрязнении. Эффективность дезактивации выражается величиной коэффициента дезактивации (КД) – это отношение начальной радиоактивности сырья к конечной после проведения соответствующих обработок, или величиной процента дезактивации (ПД).

Уменьшение содержания РВ в тканях животного обусловлено действием следующих факторов: естественным биологическим процессом их выведения из организма, физическим распадом коротко- и среднеживущих радионуклидов и выполнением комплекса мероприятий, которые можно разделить на две группы.

К первой группе мероприятий относят те, которые способствуют прижизненному снижению накопления радионуклидов в организме животных за счет применения энтеросорбентов, изменения рационов кормления и содержания. Ко второй группе относят процессы обезвреживания, непосредственно загрязненного радионуклидами мясного сырья, молока и другой продукции животноводства.

Методы дезактивации животноводческой продукции, структурно загрязненной радионуклидами, должны соответствовать следующим требованиям:

- снижать уровень радиоактивности животноводческой продукции до такой степени, чтобы ее потребление не представляло опасности для здоровья человека, то есть до ДУ, определяемых действующими радиационно-гигиеническими нормативами, устанавливаемыми органами здравоохранения в течение строго ограниченного периода;

- животноводческая продукция должна сохранять свои свойства, то есть в процессе дезактивации не должно происходить никаких существенных изменений, отрицательно влияющих на качественные и технологические показатели сырья;

- методы дезактивации должны базироваться на максимальном использовании технологических процессов и оборудования, применяемых на предприятиях мясной, молочной, кожевенной промышленности, фабрик первичной обработки шерсти (ПОШ) и др., с необходимыми уточнениями и изменениями.

Для дезактивации применяют: технологический процесс производства колбасных и консервных изделий; первичную обработку (мойку) шерсти на фабриках ПОШ; первичную обработку (консервирование) и выделку кожевенного сырья, меховых и шубных овчин; переработку молока на различные молочные продукты и др.

Однако традиционная технология не может полностью обеспечить эффективную дезактивацию сырья, загрязненного радионуклидами выше ДУ,

поэтому необходимы изменения или дополнения в технологические процессы переработки животноводческой продукции.

С экологических позиций дезактивация животноводческой продукции целесообразна, так как при этом сохраняются и используются по своему назначению ценные продукты и сырье, а образующиеся при дезактивации отходы по своей массе не превышают 5...10 % исходного сырья, и захоронить их значительно проще и экономичнее. Предприятия, которые перерабатывают животноводческую продукцию с содержанием РВ выше ДУ, как правило, расположены на загрязненных территориях, и радиоактивность отходов производства (преимущественно сточных вод) не превышает уровней загрязнения окружающей среды.

21.2. Дезактивация мяса

Методы дезактивации мяса от инкорпорированных радионуклидов стронция, цезия, йода и некоторых других изотопов можно разделить на три основные группы:

- методы кулинарной обработки продуктов (варка, тушение, жаренье), которые обеспечивают дезактивацию на 20...75 % в зависимости от радионуклида, его активности и многих других факторов, связанных с особенностями рецептов приготовления различных блюд;

- посол и вымачивание мяса в различных растворах химических веществ, процент дезактивации при которых может достигать 99;

- технологическая переработка, в основе которой также заложены такие методы дезактивации, как обвалка, замораживание, посол, варка, разбавление чистой продукцией при производстве колбасных и консервных изделий.

Первые две группы методов дезактивации применяют в домашних или полевых условиях. Особое значение для дезактивации имеет использование технологической переработки, так как она предусматривает обезвреживание больших объемов мясного сырья с последующим изготовлением из него различных видов мясопродуктов.

Степень эффективности дезактивации мяса от радионуклидов йода, цезия и стронция обусловлена в основном прочностью их связи с белками. Изотопы ^{137}Cs с белками практически не связаны, а ^{90}Sr связаны на 29...41 %, ^{131}I – более чем на 70 % и по прочности связи превосходят все другие продукты деления. Вследствие этого достичь эффективности дезактивации по цезию, стронцию и йоду выше соответственно 99, 70 и 50 % и при этом получить неизмененный доброкачественный продукт не всегда возможно. Наиболее трудно обезвредить мясное сырье, загрязненное неразделенной смесью продуктов ядерного деления.

В чрезвычайных условиях аварийных ситуаций допустимы незначительные изменения в питательной ценности (содержание белка), физико-химических показателях мяса (рН, влагоудерживающая способность, содержание влаги) при его дезактивации.

Для достижения необходимой эффективности дезактивации в процессе технологической переработки мяса соблюдают ряд условий:

- заменяют сухой посол измельченного мясного сырья на посол с применением заливочных рассолов с увеличением ЖК (жидкостный коэффициент) до 3...5;
- термическую обработку, например, в производстве вареных колбас, предусматривающую варку батонов паром, заменяют варкой в воде;
- не рекомендуется посол и варку мяса, загрязненного ^{90}Sr или смесью радионуклидов, проводить на костях вследствие перехода стронция из костной ткани в прилегающие слои мяса;
- процессы разделки, обвалки и жиловки сырья, загрязненного РВ, должны проводить без выделения мясокостного сырья, так как эффективность дезактивации костной ткани вываркой в воде или растворах, содержащих различные соли и кислоты, не превышает 10 % по ^{90}Sr , 2,5 % по ^{131}I и только для ^{137}Cs достигает 67...80 %.

При консервировании мяса мокрым посолом в целях дезактивации следует иметь в виду:

- мясо укладывают в тару (чаны, бочки), заливают рассолом так, чтобы все части были полностью покрыты рассолом;
- используют рассолы с концентрацией поваренной соли от 5...10 до 25...30 %, при соотношении мясо: рассол 1:3...5, с продолжительностью посола от 8 до 22 суток (возможно до 80 суток) в зависимости от размеров кусков (толщина, масса) и вида изготавливаемого продукта;
- для ускорения процессов созревания мяса (при использовании парного) до нескольких часов и самого процесса до 24 ч применяют посол в виде фарша или шрота – измельченного мяса на волчке с диаметром решетки соответственно 6...12 или 16...20 мм;
- для усиления антимикробного действия и тем самым увеличения продолжительности хранения, а также для интенсификации процесса диффузии радионуклидов из мяса в рассол добавляют слабые органические кислоты (молочную, уксусную, лимонную и др.) в солевые рассолы (рН до 4,5);
- смена рассолов является обязательным приемом повышения эффективности дезактивации в процессе посола, и ее целесообразно проводить 2...3 раза в первые 5...7 суток;
- оптимальные для дезактивации посолом в солевых растворах с концентрацией поваренной соли 2...10 % или варкой кусочки мяса массой 5...20 г толщиной 1...1,5 см;
- оптимальные размеры кусков мяса для дезактивации с помощью подкисленных растворов не менее 50...100 г;
- при продолжительном посоле (до 60...80 суток) размеры кусков мяса должны быть массой не более 500...1000 г или 2...3 кг, но с надрезами мышечной ткани с интервалами 5...10 см;

- оптимальное соотношение как для посола, так и для вымачивания и варки мяса: раствор 1:3...5;

- предварительное замораживание мяса с последующим размораживанием (при температуре 15...20°C в течение 1...2 суток) при посоле в 2...3 раза повышает переход радиоактивного цезия из мяса в рассол (с вытекающим мясным соком удаляется до 33 % ^{137}Cs и до 15 % ^{90}Sr).

21.3. Дезактивация мяса кроликов, кур, субпродуктов и других продуктов убоя

Кролики. Дезактивация мяса кроликов менее эффективна, чем мяса других видов животных. Коэффициенты дезактивации (КД) не выходили за пределы 2...7, за исключением дезактивации по ^{134}Cs , где они достигали 20...30.

Тушки кроликов и субпродукты (печень, сердце, легкое), содержащие РВ в 5 раз выше ДУ, дезактивируют следующим образом:

- проваривают в 1%-ом растворе поваренной соли в течение 1 ч с момента закипания воды (печень бланшируют 10...15 мин при температуре 85...90 °С);

- мясо после ручной разборки измельчают и проводят дозиметрию, фарш с содержанием РВ до ДУ направляют на выработку ливерной колбасы, субпродукты – паштетов;

- бульон, полученный при варке тушек, уничтожают; сырье после ручной обвалки смешивают с незагрязненным сырьем в соотношениях не более чем 1:10.

Куры. Тушки птицы и субпродукты (сердце, печень, мышечный желудок без кутикулы) дезактивируют следующим образом:

- тушки птицы и субпродукты, имеющие радиоактивное загрязнение в 2 раза выше ДУ, в отдельности проваривают в 1%-м растворе поваренной соли до готовности. Бульон уничтожают, сливая в канализацию после разбавления водой (при необходимости) до ДУ в нем РВ, а мясо после ручной разборки и дозиметрии используют для выработки различных колбас, мясных консервов;

- сырое мясо птицы с радиоактивным загрязнением выше ДУ до 5 раз после ручной обвалки добавляют в допустимых соотношениях (но не более 1:10) в незагрязненное РВ сырье при изготовлении колбасных изделий, мясных консервов, паштетов согласно действующим технологиям;

- сырое мясо в виде кусочков, а также четвертинок тушек (за исключением загрязненных ^{90}Sr) вымачивают в 5...10%-х растворах поваренной соли с подкислением 0,5...3%-ми растворами уксусной, лимонной, молочной или соляной кислоты в течение 24 ч с 2...3-кратной сменой растворов при ЖК = 3...5 (КД = 2...5).

Субпродукты крупного рогатого скота и свиней. Для дезактивации субпродукты надрезают (почки, сердце) или разрезают на куски 200...300 г (печень), затем солят в 20%-ом растворе поваренной соли с подкислением

молочной кислотой при $\text{ЖК} = 3$ в течение 30 суток, после чего их вымачивают кусочками массой 10...20 г в течение 2 ч при $\text{ЖК} = 5$ и варят.

При содержании РВ выше ДУ в 5 раз субпродукты (крупного рогатого скота, свиней и овец) перерабатывают на ливерные колбасы. Субпродукты после промывки направляют на бланширование, варку, стерилизацию, охлаждение и разборку с увеличением ЖК при бланшировании и варке до 4. Бульон после варки уничтожают. Сырье после разборки измельчают, затем проводят дозиметрию, по результатам которой определяют необходимую кратность разбавления незагрязненным РВ сырьем (1:10).

Жиры. При производстве шпика соленого из сырья, загрязненного радионуклидами цезия, шпик хребтовый и боковой толщиной в тонкой части не менее 3 см и массой не менее 1000 г промывают проточной водой, направляют на мокрый посол в 12...13%-ом растворе поваренной соли при температуре 4°C , $\text{ЖК} = 3$ и продолжительностью 7...10 суток с полной заменой рассола через 5 суток, в результате радиоактивная загрязненность снижается в 10 раз.

Эффективным методом дезактивации жира является перетопка, которая сопровождается переходом более 95 % ^{137}Cs в шквару, что способствует 20-кратному снижению концентрации радионуклида в топленом жире.

Жир-сырец, полученный от скота, загрязненного РВ выше ДУ до 10 раз, перерабатывают в соответствии с требованиями действующей технологической инструкции по производству пищевых, технических или кормовых жиров. При вытопке жира желательно использовать мокрый способ, при котором в котлы с жиром-сырцом добавляют воду.

Кишечное и эндокринно-ферментное сырье. Кишечное сырье, загрязненное РВ, необходимо обязательно дополнительно замачивать в течение 1...2 ч, консервировать мокрым посолом с увеличением ЖК и затем вымачивать.

Эндокринно-ферментное сырье, полученное от животных, загрязненных РВ, заготавливают в соответствии с требованиями действующих нормативов с учетом уровня радиоактивной загрязненности. При превышении установленного уровня радиоактивности эндокринно-ферментного сырья не более чем в 10 раз его используют после разбавления до ДУ сырьем, не имеющим радиоактивного загрязнения.

Технологический процесс первичной переработки этого вида сырья включает консервирование эндокринных органов как замораживанием, так и химическими методами (спиртом, ацетоном, поваренной солью). Хотя последний способ консервирования сырья считается худшим, однако он может быть более приемлемым для дезактивации эндокринного (гипофиз, щитовидная и паращитовидная железы, надпочечники, поджелудочная железа, яичники и семенники) и ферментного (сычуги телят и ягнят, печень) сырья.

Яйца. При переработке яиц кур на меланж или яичный порошок удаляется до 97 % ^{90}Sr за счет яичной скорлупы. Активность ^{131}I уменьшается

практически на 100 % за счет естественного физического распада при длительном хранении (до 3 мес).

Вся полученная животноводческая продукция в соответствии с действующей технологической документацией по ее применению, имеющая уровень радиоактивной загрязненности до или после проведения дезактивации, не превышающий в 10 раз установленные ДУ, может быть рекомендована для откорма пушных зверей без ограничения с прекращением скармливания за 45 суток до убоя; на приготовление сухих животных кормов (мясокостная мука, жир кормовой и др.); для изготовления комбикорма для откорма крупного рогатого скота и свиней, как правило, в зоне радиоактивного загрязнения, с исключением этого комбикорма из рациона животных за 1 месяц до убоя.

21.4. Дезактивация шерсти, кожевенного и шубно-мехового сырья

Дезактивация сырья животного происхождения: кожевенного, шубно-мехового, а также шерсти овец базируется на извлечении РВ из коллагена дермы и межволоконных белков кожной ткани. Радионуклиды йода и цезия, а также некоторые радиоактивные изотопы редкоземельной группы в структуры шерсти и жиропота не входят.

Загрязнение волосяного покрова животных РВ носит в основном (до 90 %) поверхностный характер.

Радиоактивную загрязненность шкур крупного рогатого скота, овчин и шерсти овец определяют на площадках или в помещении, где внешний гамма-фон не превышает измеряемую мощность γ -излучения, и на расстоянии 5...10 м от места хранения (штабелирования) сырья. Для определения радиоактивной загрязненности овчин, шкур крупного рогатого скота, шерсти в кипах или в упаковках массой по 1,5 кг и размером 50×20×10 см датчик дозиметра перемещают на расстоянии 0,5...1,5 см от обследуемой поверхности. По наибольшему отклонению стрелки прибора снимают показания, а для руна шерсти дозиметр, защищенный полиэтиленовой пленкой, помещают в середину руна и проводят измерение.

Кожевенное и шубно-меховое сырье. Заготовку, хранение и переработку кожевенного сырья, меховых и шубных овчин и шкурок кроликов, полученных после убоя животных, загрязненных РВ, проводят по общепринятой технологии с введением дополнительных требований:

загрязненное сырье подвергают дозиметрии, по результатам которой его сортируют и маркируют по однородности уровня загрязнения с учетом правил формирования производственных партий сырья;

загрязненное кожевенное и шубно-меховое сырье рекомендуют консервировать мокрым посолом (тузлукованием) с добавлением в тузлук соляной кислоты;

повторное применение тузлука не допускается; шкуры крупного рогатого скота, шубные и меховые овчины, а также шкурки кроликов, прошедшие первичную обработку на мясокомбинатах (пресно-сухое и

сухосоленое консервирование) и имеющие радиоактивное загрязнение выше ДУ, обязательно повторно консервируют;

шкуры, прошедшие на мясокомбинатах первичную обработку тузлукованием, а также подвергнутые специальному консервированию на кожевенных и меховых заводах, перерабатывают по действующим методикам с заменой в процессе пикелевания серной кислоты на соляную.

Консервирование шкур. Шкуры крупного рогатого скота перед тузлукованием промывают водой в барабанах или чанах с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ) в концентрации 1 г/л при ЖК = 4 в течение 2 ч с последующим сливом и промывкой проточной водой в течение 15 мин при температуре не ниже 18 °С.

В тузлук для консервирования сырья помимо поваренной соли добавляют соляную кислоту (0,5 г/л). Необходимость применения соляной кислоты вместо серной объясняется тем, что стронций образует с последней нерастворимые соединения, которые снижают эффективность дезактивации.

Для достижения остаточной радиоактивности ДУ полуфабрикаты, полученные из животного сырья, подвергают повторной обработке.

Тузлукование снижает уровень радиоактивной загрязненности до 70 раз (табл. 21.4.1).

Таблица 21.4.1.

Изменение радиоактивной загрязненности парных шкур крупного рогатого скота при тузлуковании

Порядок обработки шкур	Уровень загрязненности, мкР/ч		Коэффициент дезактивации
	до обработки	после обработки	
Промывка водой	520	120	4
Обработка ПАВ (0,1 %)	1500	80	19
с промывкой водой	300	100	3
Тузлукование (0,1%-м раствором соляной кислоты)	1400	20	85

Шубные и меховые овчины, имеющие загрязненность выше ДУ, двукратно по 20 мин промывают в чанах или барабанах водой с добавлением ПАВ (1,5 г/л) и антисептика (1 г/л). Обезжиривают при постоянном перемешивании в течение 40 мин в воде с содержанием ПАВ 5 г/л с последующей промывкой в проточной воде до полного их удаления. Овчины консервируют в насыщенном растворе поваренной соли с добавлением соляной кислоты (0,5 г/л) в течение 7 ч. Жидкостный коэффициент на всех стадиях обработки равен 10 при температуре не ниже 42 °С.

Шкурки кроликов подвергают пресно-сухому, сухосоленому или мокросоленому консервированию.

Переконсервирование шкур. На мясокомбинатах, не имеющих оборудования для тузлукования, шкуры, имеющие радиоактивное загрязнение выше ДУ, консервируют сухим способом. Их накапливают в отдельные партии и направляют на предприятия, где проводят дозиметрию, сортировку и специальное переконсервирование по следующей технологии:

- шкуры, предназначенные для получения кож, предварительно промывают водой в течение 2 ч; после слива отработанной воды их промывают в 0,1%-ом растворе ПАВ в течение 2 ч при периодическом перемешивании, затем проточной водой в течение 15 мин; затем в течение 4 ч обрабатывают растворами поваренной соли (10 г/л) и соляной кислоты (1 г/л); на всех стадиях обработки ЖК = 4, температура не ниже 18 °С;

- шубные и меховые овчины подвергают отмочке в воде в течение 7 ч с добавлением сульфата натрия (1...5 г/л), антисептика (1 г/л), поваренной соли в количестве 20 г/л для пресно-сухих овчин и 10 г/л для других видов консервирования при ЖК = 10 и температуре раствора 35 °С; двукратно по 20 мин промывают водой с добавлением ПАВ (1,5 г/л) при температуре 42 °С; обезжиривают при постоянном перемешивании в течение 40 мин с содержанием ПАВ 5 г/л при температуре 42 °С с последующей промывкой в проточной воде до полного их удаления;

- шкурки кроликов промывают в водных растворах ПАВ (1 г/л) при ЖК = 4 в течение 2 ч при температуре 20...25 °С и периодическом перемешивании; затем чистой водой при ЖК = 3; затем шкурки заливают раствором, содержащим 50...60 г/л поваренной соли и 1,5 г/л натрия кремнефтористого, выдерживают до 3 суток и после стекания раствора сушат.

Выделка кож и меха. Сырье технического назначения перерабатывают и дезактивируют в процессе выделки готовых кож и меха по существующей для каждого вида сырья технологии. Эффективность дезактивации конечного продукта достигает 99 % независимо от первоначального способа консервирования сырья.

Технология выделки шкур крупного рогатого скота включает отмочку, мездрение, зольение, удаление волос, нейтрализацию и пикелевание (КД = 25...40); шкурок кроликов – отмочку первую и вторую, мездрение и пикелевание; овчин – отмочку первую и вторую, мойку первую и вторую, промывку, мездрение, эмульсионное обезжиривание, промывку и пикелевание и обеспечивает достижение фоновых уровней (ДУ по СРП-68 10...15 мкР/ч) как при загрязнении ¹³⁷Cs, так и продуктами ядерного деления.

Шерсть. После аварии на ЧАЭС в 1986 – 1989 гг. на трех фабриках ПОШ («Ильичевской» Гомельской области Беларуси, «Борской» Горьковской области РФ и «Черниговской» Черниговской области Украины) скопилось около 17 тыс. т шерсти, значительная часть которой (около 75 %) имела радиоактивное загрязнение по мощности γ -излучения (МГИ) от кип шерсти массой 90...110 кг в диапазоне 0,1...3 мР/ч. При этом удельная активность шерсти колебалась в интервале 2...1200 кБк/кг.

Изотопный состав шерсти в первый месяц после аварии определялся в основном радионуклидами ^{95}Nb – 30%; ^{141}Ce , ^{144}Ce – 25; ^{103}Ru , ^{106}Ru – 13; ^{95}Zr – 11; ^{134}Cs , ^{137}Cs – 8 %. В 1989 г. изотопный состав шерсти уже на 68 % определяли изотопы ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce – 21 %, ^{106}Ru – 11 %.

Мойку шерсти проводили по типовому технологическому режиму первичной обработки, исключая из процесса переработки сортировку и классификационную обработку в целях радиационной безопасности персонала фабрик, и с увеличением количества моющего раствора до $10\text{ м}^3/\text{ч}$.

Технологический режим включал мойку шерсти в мыльно-содовом растворе в 5 ваннах с содержанием кальцинированной соды и мыла в пределах 1...3 г/л. При этом несколько раз использовали один и тот же моющий раствор, который циркулировал из одной ванны в другую (из более чистой к более грязной), из которой периодически сливался. Процесс мойки и полоскания производили последовательно без перерыва в течение 4...6 ч, где на 1 т немытой шерсти приходилось до 23 м^3 воды.

Использование типового технологического режима первичной обработки на «Черниговской» и «Ильичевской» фабриках ПОШ позволяло снижать остаточную радиоактивность мытой шерсти ниже ДУ. КД находились в зависимости от МГИ от кип в диапазоне 5...20 при конечной удельной активности шерсти на уровне 100...12000 Бк/кг.

Для повышения эффективности дезактивации шерсти для кип с МГИ от 1 до 3 мР/ч рекомендовано введение в технологический режим на стадии замочки и мойки шерсти ряда соединений, полностью или частично заменяющих мыльно-содовый раствор. К таким соединениям относят трилон-Б в концентрациях 0,5...2 г/л и ПАВ, такие, как ОП-7, катамин и неонол-10. Наиболее эффективным оказалось сочетание типового технологического режима первичной обработки шерсти с включением в процесс мойки неонол-10 (Н-10), которое повысило КД с 9...31 до 40...84.

21.5. Дезактивация молока

В условиях неблагоприятной экологической обстановки, обусловленной попаданием в окружающую среду радионуклидов, продукты животноводства, и в первую очередь молоко, становятся основными источниками поступления РВ в организм человека.

Наибольшую опасность для человека представляют радионуклиды ^{131}I , ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Для удаления радионуклидов применяют технологическую переработку молока и его дезактивацию с помощью ионообменных сорбентов.

Переработка молока, загрязненного РВ, как и дезактивация молока, обусловлена физико-химическими свойствами радионуклидов. Установлено, что более 90 % ^{131}I в молоке коров и коз находится в форме йодида и только 2,5 – 4,5 % радионуклида входит в состав жировой фазы молока.

В период йодной опасности молоко целесообразно перерабатывать на продукты длительного хранения (сухое или сгущенное молоко) или высокожирные молочные продукты (сливки, масло сливочное, топленое).

^{89}Sr и ^{90}Sr находятся в молоке в растворенном состоянии и в связанном с казеинатфосфатным и белковым комплексами. Переработка и дезактивация направлены на разрушение этих комплексов путем подкисления молока соляной или молочной кислотой, продуцируемой молочнокислыми бактериями при сквашивании молока, с последующим удалением радиоактивного стронция с сывороткой, либо ионообменными сорбентами.

Цезий находится в основном в водной фазе молока и сравнительно легко удаляется с сывороткой, а также в процессе ионообменной обработки молока.

Удаление радионуклидов из молока технологическими методами возможно на любом действующем молокоперерабатывающем предприятии с использованием существующего оборудования.

Данные о переходе радионуклидов в молочные продукты в процессе переработки молока приведены в таблице 21.4.2.

Таблица 21.5.1.

Переход радионуклидов в молочные продукты в процессе переработки молока

Продукты, способы и условия переработки	Переход радионуклидов из молока, %			
	^{134}Cs	^{137}Cs	^{90}Sr	^{131}I
Промышленная переработка				
Молоко цельное, анионообменная	—	—	—	95
Молоко цельное, катионообменная	94,4	96,1	61	—
Молоко цельное, обработка цеолитом	94,2	94,9	—	—
Деминерализованная сыворотка	—	0,2	—	—
Сыр сычужно-кислотный	—	48,8	—	—
Сливки:				
10%-ая жирность	—	48,2	—	—
30%-ая жирность	—	1,6	—	—
Масло сливочное	—	14,7	—	—
Пахта	—	99,1	—	—
Зерно домашнего сыра	—	2,6	—	—
Творог полужирный и нежирный, кислотный способ	—	12,9-16,4	1...6.2	—
Казеин сухой:				
кислотный способ	—	0,4	1	—
сычужно-кислотный способ	—	1,8...7,7	84	2...11,6

Полупроизводственная переработка			
Молоко обезжиренное, обработка альгинатом марганца	—	62,7 (⁸⁶ Sr)	
Молоко цельное, обработка альгинатом марганца	—	54 (⁸⁵ Sr)	
Молоко, обработка альгинатом кальция	—	58 (⁸⁵ Sr)	
Сыворотка при кислотной коагуляции белка	92,2	95	
Лабораторная переработка			
Творог обезжиренный: кислотный способ	11	98	22
сычужно-кислотный способ	12	31 (⁸⁵ Sr)	22

Хорошая растворимость РВ в плазме молока, прочная связь стронция с белковыми комплексами позволяют при сепарировании основную массу изотопов удалить с обезжиренным молоком и получить сливки с содержанием РВ в значительно меньших концентрациях. Установлено, что переход радионуклидов ¹³¹I, ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr из молока в сливки находится в прямой зависимости от жирности сливок.

При выработке из сливок высокожирного сливочного масла основная часть РВ переходит в пахту и промывную воду. В готовый продукт переходит ⁹⁰Sr до 1..1,3%, ¹³⁷Cs до 1,5...2,5 % и ¹³¹I до 3,5 % их первоначального содержания в молоке.

Получение топленого масла в процессе перетопки сливочного сопровождается практически полным отделением присутствующих в нем лецитиново-белковых оболочек жировых шариков и связанных с ними радионуклидов стронция и цезия.

Сгущенное и сухое молоко можно выработывать из сырья, загрязненного только короткоживущими изотопами (¹³¹I). Вследствие длительных сроков хранения этой продукции (до 12 мес) уровень радионуклидов снижается до безопасного за счет естественного распада РВ.

Получение белковых продуктов (сыры, творог, казеин) из молока, загрязненного РВ, обусловлено механизмом коагуляции казеина и кислотностью среды. Удаление радионуклидов ¹³¹I и ¹³⁷Cs практически одинаково при сычужной и кислотной коагуляции. При кислотном способе коагуляции белка в творог переходит от 12 до 16 % ¹³⁷Cs и от 1 до 6 % ⁹⁰Sr. В то же время удельная активность творога, выработанного сычужно-кислотным способом, превышает в 1,5 раза активность исходного сырья.

Содержание радионуклидов в сырах, изготовленных сычужно-кислотным способом, снижают путем увеличения количества молочнокислой закваски до 4...5 %, времени отстоя сгустка в кислой сыворотке, дополнительной промывки зерна, введения таких операций, как посол в

рассоле при производстве брынзы, замены сыворотки водой, уменьшения количества сычужного фермента.

Сыворотку и пахту, оставшиеся после переработки молока, загрязненного РВ, в зависимости от степени их загрязнения радионуклидами используют в корм домашнему скоту либо дезактивируют или утилизируют установленным порядком.

Использование ионообменных сорбентов при обработке молочного сырья позволяет получить молоко, а из него и кисломолочные продукты с минимальной концентрацией РВ.

Удаление радионуклидов из молока основано на способности ионных групп, входящих в структуру сорбента, обмениваться на катионы радионуклидов стронция, цезия или анионы йода, находящиеся в молоке. Оптимальную очистку от радионуклидов Cs, Sr и I обеспечивает фильтрация молока через катионит КУ-2-8ЧС в смешанной солевой форме и анионитный сорбент АВ-17-8ЧС в OH⁻ или хлорформах. При этом из молока удаляется более 90 % ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs и ¹³¹I и до 65 % ⁹⁰Sr (при фильтрации неподкисленного молока). После цикла дезактивации молока ионообменные смолы дезинфицируют моющими растворами и регенерируют. Один объем смолы можно использовать от 3 до 5 лет.

При удалении из молока радиоактивного цезия регенерирующие растворы очищают ферроцианидным сорбентом и их используют многократно при очередной зарядке смолы.

Способы дезактивации молока достаточно подробно изложены в методических указаниях «Основы очистки молока от радионуклидов» (1991).

21.6. Утилизация (захоронение) радиоактивных отходов, образующихся после дезактивации продукции животноводства

Как и при обычной технологии переработки, при дезактивации мясного сырья, шерсти овец, кожевенного и шубно-мехового сырья и другой продукции животноводства образуются как жидкие, так и твердые отходы: промывные воды, обрезки мяса, жира и кожной ткани, содержимое желудка и кишечника, минеральные и растительные примеси при трепании шерсти, кости, рога, копыта и др.

Все твердые отходы при переработке сельскохозяйственных животных, загрязненных РВ, а также мясо, субпродукты, пищевые, кормовые и технические жиры, кишки и другие продукты убоя, радиоактивность которых превышает действующие нормативы, относят к радиоактивным, и они не подлежат дальнейшему использованию. Их сбор, удаление и обезвреживание регламентируют нормы радиационной безопасности (НРБ – 99), основные санитарные правила (ОСПОРБ – 99) и санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО – 2002).

Система удаления и обезвреживания твердых радиоактивных отходов является централизованной. Она включает в себя сбор отходов, временное их хранение, удаление и обезвреживание, которое проводят на специальных

пунктах захоронения. При этом сроки выдержки радиоактивных отходов с содержанием большого количества органических веществ, то есть как раз всех биологических отходов после переработки животных, не должны превышать 5 суток, если не обеспечиваются необходимые условия хранения (холодильники, консервирующие составы).

В хозяйственно-бытовую канализацию допускается сброс радиоактивных сточных вод концентрацией, которая может превышать установленные уровни для каждого радионуклида в воде в 10 раз. При небольших количествах жидких радиоактивных отходов (менее 200 л) и при невозможности их разбавления отходы нужно собирать в специальные емкости и централизованно удалять на захоронение, как и твердые.

Предприятия, которые перерабатывают продукцию с содержанием РВ выше ДУ, определяют соответствующие директивные органы, и они, как правило, должны находиться на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению. Мясокомбинаты, фабрики первичной обработки шерсти, кожевенные заводы, шубно-меховые и некоторые другие предприятия, перерабатывающие загрязненное РВ сырье, должны иметь очистные сооружения, конструкция которых не допускает загрязнение окружающей среды.

Наибольшее количество твердых радиоактивных отходов (до 5...10% исходного сырья) образуется на мясоперерабатывающих предприятиях. Это зависит от вида животных, возможности реализовывать продукты убоя в зависимости от уровня их радиоактивной загрязненности и их соответствия изменяющимся нормам радиационной безопасности, устанавливаемым в период ликвидации последствий радиоактивного загрязнения.

Менее трудоемко удаление жидких радиоактивных отходов, так как процессы переработки многих видов животноводческой продукции (шерсть, кожевенное сырье, овчина) требуют больших количеств чистой воды (ЖК = 20...30), что способствует разведению промышленных стоков до 100 раз и более и их удалению непосредственно с предприятий в общегородскую канализацию.

Таким образом, перерабатывать радиоактивно загрязненную продукцию животноводства возможно без существенного повышения облучения персонала.

Опыт ликвидации последствий одной из крупнейших радиационных аварий на ЧАЭС показал, что только в первые 1...2 года малая часть производимой животноводческой продукции попадала под определение «твердые или жидкие радиоактивные отходы».

После прекращения хозяйственного и социального функционирования сильно загрязненных территорий и их отчуждения, а также комплекса защитных мероприятий производимая животноводческая продукция с превышением ДУ не является радиоактивными отходами и ее возможно и необходимо использовать, и реализовывать по назначению после проведения дезактивации.

22.0. Система защитных и реабилитационных ветеринарных мероприятий на территории, загрязненной радионуклидами

Реабилитация загрязненных территорий (от лат. *rehabilitatio* – восстановление) – комплекс организационных, научно-технических, социальных и других мероприятий, направленных на восстановление среды обитания, нормальных условий проживания и ведения хозяйственной деятельности. Реабилитации подлежат территории, загрязненные радиоактивными и токсичными веществами, на которых превышены нормативы допустимого содержания загрязняющих веществ и пределы доз допустимого облучения для людей.

Медицинская реабилитация – система медицинских мероприятий, направленных на предупреждение снижения и утраты трудоспособности, восстановление нарушенных функций организма, профилактику осложнений и рецидивов заболеваний, раннее возвращение к профессиональной деятельности.

Реабилитация загрязненных сельскохозяйственных угодий направлена на обеспечение безопасного проживания сельского населения, получение нормативно-чистых продуктов питания, бесперебойное и рентабельное функционирование агропромышленного производства и частного сектора и возвращение в землепользование ранее отчужденных территорий. Основным критерием отнесения земель к радиоактивно загрязненным является величина годовой дозы облучения населения.

Реабилитация на радиоактивно загрязненной территории основана на исключении любого необоснованного облучения населения; комплексном подходе к рассмотрению всех сторон жизнедеятельности загрязненных регионов; последовательности планирования и проведения защитных мероприятий на основе их приоритетности; прогнозировании индивидуальных и коллективных доз облучения населения; взаимосвязи государственных программ развития сельского хозяйства с радиоэкологическими и социально-экономическими проблемами загрязненных территорий. Экономическая и социальная польза и последующая выгода от реализации контрмер должны быть больше, чем затраты на них или возможный вред для здоровья людей вследствие их неприменения.

Ветеринарная реабилитация – система ветеринарных мероприятий, направленных на предупреждение потерь в животноводстве от поражающего действия радиационных факторов, ухудшения здоровья, снижения продуктивности и воспроизводительной способности сельскохозяйственных животных, радионуклидного загрязнения продукции животноводства, профилактику инфекционных болезней, в том числе общих для человека и животных, восстановление нарушенных функций организма и качества животноводческой продукции.

Основная цель защитных и реабилитационных ветеринарных мероприятий – предотвращение ухудшения состояния здоровья и снижения продуктивности сельскохозяйственных животных. Для этого проводят следующие мероприятия:

ветеринарную радиационную защиту: снижают дальнейшее облучение животных от основных источников облучения, диагностируют радиационные поражения, сортируют и определяют оптимальные варианты их хозяйственного использования, вводят радиационный контроль, исключают из рациона животных загрязненные радионуклидами корма, выбраковывают и перерабатывают животноводческую продукцию;

ветеринарную реабилитацию, включающую проведение систематического наблюдения за состоянием здоровья животных, подвергшихся воздействию облучения, предупреждение ухудшения здоровья, снижения продуктивности, воспроизводительной способности, радионуклидного загрязнения продукции животноводства, защиту животных от вредных нерадиационных факторов физической и химической природы.

Защитные мероприятия. При радиоактивном загрязнении сельскохозяйственных угодий основные дозы внешнего и внутреннего облучений животных и уровни радиоактивного загрязнения продукции животноводства формируются в ранние сроки после выпадения радиоактивных осадков. Это определяет необходимость раннего введения защитных мероприятий (табл. 1).

Таблица 1. Защитные и реабилитационные мероприятия на радиоактивно загрязненной территории

Период после выпадения радионуклидов	Мероприятия
	Защитные
Ранний или острый период (период йодной опасности от момента выпадения радиоактивных осадков до распада короткоживущих радионуклидов)	Стойловое содержание животных Голодание от 4 до 10 сут Эвакуация Нормирование радионуклидов в рационе животных Бракераж кормов и продукции животноводства с учетом ПДУ радионуклидов в кормах и продукции животноводства Переработка молока на масло, сухое обезжиренное молоко Выпаивание отходов маслоделия телятам Дезактивация сырья и продукции животного происхождения Диспансеризация сельскохозяйственных животных Оценка доз облучения животных Диагностика и прогнозирование исходов лучевых

	поражений
	Реабилитационные
Период загрязнения долгоживущими радионуклидами со 2-го года после выпадения радиоактивных осадков)	Минимизация накопления радионуклидов в продукции животноводства: использование оптимальных вариантов кормления и содержания крупного рогатого скота с учетом ПДУ радионуклидов в кормах и продукции животноводства повышение содержания кальция в рационе коров применение ферроцианидов
Отдаленный период (с 10... 12-го года после выпадения радионуклидов)	Диспансеризация сельскохозяйственных животных Эпизоотологическое обследование, диагностика и профилактика инфекционных болезней

Первоочередная задача – не допустить прямое внешнее и внутреннее облучение животных. Для этого сельскохозяйственных животных переводят с пастбищного на стойловое содержание или огороженные площадки и снабжают их чистыми кормами. Эти мероприятия применяют не только в острый послеаварийный период, когда высокие уровни радиоактивного йода могут привести к радиационному поражению щитовидной железы, но и в другие периоды.

Рацион животных должен обеспечивать получение нормативно-чистой продукции животного происхождения. Содержание радионуклидов в кормах не должно превышать уровней, установленных действующими нормативными документами. Эффективными мероприятиями являются бракераж загрязненных кормов, запрет на пастбищное содержание молочного скота и на выпас молочного скота на неулучшенных пастбищах.

Допустимые уровни содержания радиоактивных веществ в кормах, кормовых добавках, кормовом сырье утверждает Главный государственный ветеринарный инспектор Российской Федерации.

Реабилитационные мероприятия. Ветеринарная реабилитация требует системного подхода, направленного на оценку сложившейся радиационной обстановки в каждом конкретном хозяйстве и на каждой ферме. Система организации проведения профилактических и защитных зооветеринарных мероприятий в АПК включает в себя комплекс радиологических ветеринарных и зоотехнических способов и методов, направленных на обеспечение здоровья сельскохозяйственных животных и получение нормативно-чистой продукции для населения. Основу этих мероприятий составляет радиационный контроль объектов ветеринарного надзора, проведение которого регламентируют ветеринарные правила и другие нормативно-технические документы (табл. 2).

Таблица 2. Радиационный контроль объектов ветеринарного надзора

Объект ветеринарного радиационного контроля	Этап производства, переработки и реализации продукции животноводства	Научно-технические документы
Сельскохозяйственные животные Вода, корма Пастбища, территория животноводческих помещений	Кормление и содержание животных	Положение о системе государственного ветеринарного контроля радиоактивного загрязнения объектов ветеринарного надзора в Российской Федерации Ветеринарные правила (ВП). Организация государственного ветеринарного радиологического мониторинга объектов ветеринарного надзора в зоне воздействия радиационно-опасных объектов. ВП. Организация информационно-аналитического обеспечения системы государственного ветеринарного радиологического контроля объектов ветеринарного надзора в Российской Федерации
Сырье и продукция животного происхождения	Производство мяса, молока, сырья животного происхождения Переработка сырья и животноводческой продукции (мясокомбинаты, молокозаводы, фабрики по первичной переработке шерсти, пушно- мехового и кожевенного сырья)	ВП. Ветеринарно-санитарная экспертиза продукции животноводства, полученной на загрязненной радионуклидами территории Рекомендации по дезактивации молока от радионуклидов цезия и стронция в условиях фермерских хозяйств и низовых предприятий Инструкция по очистке молока от радиоактивного стронция путем контакта с солями альгиновой кислоты
Продукция растительного и животного происхождения	Реализация продукции на рынках	Положение о государственной лаборатории ветеринарно-санитарной экспертизы на продовольственных рынках ВП. Радиационная экспертиза

		продукции животного и растительного происхождения лабораториями ветеринарно-санитарной экспертизы на продовольственных рынках Методические указания по отбору проб объектов ветеринарного надзора для проведения радиологических исследований
--	--	--

Спустя 10...12 лет после аварии на ЧАЭС наступил отдаленный период ликвидации последствий. В этот период происходит переход от временных аварийных допустимых уровней содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции и пищевых продуктах (ВДУ) к нормативам доаварийных условий. С 1996 г. в качестве основного критерия безопасности населения введена годовая эффективная доза 1 мЗв. Это привело к принципиально новому подходу в оценке радиологической ситуации. На этом этапе необходима адаптация защитных мероприятий на уровне отдельно взятых хозяйств к сложившимся природно-климатическим и хозяйственным условиям, изменившейся нормативно-законодательной политике государства.

Оценку уровней загрязнения проводят на основании полевой дозиметрии. Такой методический подход позволяет составить схему очередности стравливания пастбищ; дифференцированно использовать кормовые угодья для дойного стада и откормочного поголовья скота; осуществлять полузагонную систему выпаса на обширном по территории пастбище; проводить дифференцированную заготовку сена, сенажа и силоса для дойного стада и остального поголовья сельскохозяйственных животных.

Прижизненную дозиметрию выбракованного крупного и мелкого рогатого скота проводят в хозяйствах, лугопастбищные угодья которых загрязнены радионуклидами выше 555 кБк/м² (15 Ки/км²), по соответствующим для различных типов дозиметров-радиометров инструкциям. Такой же принцип соблюдают при убое животных для потребительских целей.

На территориях, загрязненных радионуклидами свыше 1110 кБк/м² (30 Ки/км²), определяют уровни содержания радионуклидов на шерстном покрове животных. Измерения β-активности внешних покровов позволяют оценить долю повторного загрязнения пылевыми частицами шерсти и кожевенного сырья.

Дозиметрия в области голодной ямки дает усредненную экспресс-оценку загрязнения рациона и позволяет ориентировочно спрогнозировать содержание радионуклидов в молоке. Ее проводят на территориях, загрязнение которых превышает 555 кБк/м² (15 Ки/км²).

Мониторинг радионуклидного загрязнения сочных, грубых и концентрированных кормов осуществляют гамма-спектрометрией на содержание ^{137}Cs и радиохимическим анализом для ^{90}Sr . Наличие и концентрацию тяжелых металлов определяют атомно- абсорбционным или химическим методом. Аналогичными способами определяют уровни загрязнения животноводческой продукции.

Диагностические мероприятия. Они состоят из диспансеризации, включающей клинико-лабораторные исследования, и оценки эпизоотологической обстановки на ферме, в хозяйстве с учетом радиационной обстановки. Оценивают состояние здоровья животных на загрязненных территориях 2 раза в год.

Диспансеризацию проводят в начале пастбищного и стойлового периодов (1-я декада). Весенняя диспансеризация позволяет выявить субклинические заболевания, оценить уровень обмена веществ, максимум концентрации радионуклидов в молоке, то есть наиболее полно оценить физиологическое состояние животных. Осенняя диспансеризация дает представление о состоянии стада и качестве продукции при переводе на стойловое содержание.

Диспансеризация включает клиническое обследование поголовья животных в хозяйстве с использованием как общих, так и специальных методов исследования; изучение типа и уровня кормления, качества кормов, условий содержания и эксплуатации животных; проведение лечебных и профилактических мероприятий.

На территориях, свыше 50 % которых загрязнены радионуклидами более 1110 кБк/м^2 (30 Ки/км^2), особое значение имеют гематологические исследования (лейкоцитов, эритроцитов, гемоглобина, СОЭ), биохимические (содержание тяжелых металлов в зоне промышленных объектов), исследование уровней радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr) и тяжелых металлов (Pb, Cd, Cr, Cu, Zn, Fe).

В хозяйствах, граничащих с зоной отселения, возможны случаи распространения бешенства и природно-очаговых инфекционных болезней дикими животными с вероятностью их переноса на сельскохозяйственных животных. Возникновение такого неблагополучия связано с изменением хозяйственно-экономических условий, а не с радиационным фактором.

Комплексная оценка физиологического состояния сельскохозяйственных животных на техногенно загрязненных территориях, осуществляемая проведением диспансеризации как формы мониторинга, позволяет прогнозировать благополучие поголовья животных и проводить необходимые оздоровительные мероприятия по повышению их естественной резистентности.

Защитно-профилактические мероприятия. В пастбищный период уровень поступления радионуклидов с рационом определяется главным образом травостоем. При этом количество потребленного ^{137}Cs зависит от высоты травостоя, урожайности, количества дернины, климатических

особенностей пастбищного сезона, системы стравливания пастбищ и других факторов. Менее значимы остальные компоненты рациона: корнеплоды и концентрированные корма. В стойловый период наиболее загрязнено ^{137}Cs сено.

Значительные колебания в радиоактивности пастбищной травы связаны как со временем отбора проб (весна – лето), так и разными уровнями загрязнения пастбищ, а сена – с местами его заготовки. Удельная радиоактивность сенажа и силоса более стабильная.

В пастбищный период необходимо начинать выпас дойного стада после отрастания травостоя не менее чем до 10 см. Одновременно дифференцированно и последовательно стравливают пастбищные угодья с учетом продуктивно-хозяйственного использования животных. Дойное стадо и животных, находящихся на заключительном откорме, выпасают на менее загрязненных радионуклидами пастбищах. Более загрязненные пастбища используются для ремонтного молодняка, молодняка на дорастивании, рабочего скота. В стойловый период и при стойлово-выгульном содержании продуктивных животных минимизируют поступление с кормом радионуклидов и тяжелых металлов подбором и нормированием рациона.

Другим способом минимизации радиоактивного загрязнения животноводческой продукции является применение специфических сорбентов – ферроцианидсодержащих препаратов, проведение внутренней и внешней дезактивации сельскохозяйственных животных.

При избытке в кормах тяжелых металлов, приводящих к нарушению минерального обмена вплоть до проявления токсичности или загрязнению молочной и мясной продукции, такие корма исключают из рациона. В большинстве случаев при относительном неблагополучии по содержанию тяжелых металлов используют принцип антагонизма и конкурентного замещения одних химических элементов другими. Так, например, соединения серы ингибируют поступление в организм кадмия. Медь и цинк являются взаимными антагонистами при их избыточном поступлении с кормом и т. п.

На радиоактивно загрязненных территориях организация и проведение охранно-карантинных и других ветеринарно-санитарных мероприятий против инфекционных болезней сельскохозяйственных животных осуществляются в соответствии с ветеринарным законодательством. На территориях, загрязненных свыше 1110 кБк/м^2 (30 Ки/км^2), следует более тщательно оценивать эпизоотическую обстановку, неукоснительно проводить вакцинацию маточного поголовья и новорожденного молодняка против особо опасных инфекций и кишечных заболеваний. То же относится и к территориям, граничащим с зонами отселения. При этом руководствуются ветеринарными правилами «Диагностические и профилактические мероприятия и эпизоотологическое обследование сельскохозяйственных и диких животных на территории, загрязненной радионуклидами».

Сельскохозяйственных животных из неблагополучных по туберкулезу хозяйств и крупный рогатый скот с положительными клинико-гематологическими признаками по лейкозу направляют на убой. При необходимости и в случаях, если животные загрязнены радионуклидами выше ПДК (по прижизненной дозиметрии), их переводят на нормативно-допустимые по содержанию радиоактивных веществ корма. В дальнейшем действуют согласно инструкциям по оздоровлению неблагополучных хозяйств от диагностированных болезней.

23.0. Задачи ветеринарной науки при радиоактивном загрязнении сельскохозяйственных угодий

Устойчивое ветеринарное благополучие животноводства страны, снижение заболеваемости и падежа животных, сохранение их генетического потенциала, защита людей от зоонозов, противодействие биологическому и ядерному терроризму, получение животноводческой продукции высокого санитарного качества во многом обусловлены современным научным обеспечением, осуществляемым ветеринарной наукой.

К настоящему времени накоплены данные, позволившие научно обосновать важнейшие практические противорадиационные мероприятия в животноводстве, которые составляют основу действующих рекомендаций, ветеринарных правил и методических рекомендаций. Однако некоторые вопросы нуждаются в уточнении и дальнейшей разработке. Новые задачи встают перед ветеринарной наукой в связи со вступлением России в ВТО и прогрессом в области биологической и ветеринарной наук.

Ядерные взрывы и аварии на крупных радиационных объектах характеризуются последствиями двух временных периодов. Начальный период – момент взрыва и первые часы после него (до нескольких суток) могут сопровождаться не только крупными разрушениями, но и мощным излучением радиации, в результате чего животные могут получать не только травмы и ожоги, но и воздействие ионизирующих излучений. Во второй период особое значение имеют тяжелые экологические последствия, связанные с пролонгированным вредным воздействием на фауну, флору и человека.

Во время первого периода после аварии необходимо усовершенствовать организационные меры по защите сельскохозяйственных животных от воздействия поражающих факторов и снижению потерь в животноводстве.

Способы прижизненного радиационного контроля животных нуждаются в доработке, в первую очередь в направлении повышения чувствительности и снижения ошибки измерений в условиях повышенного радиационного фона. Недостаточно разработанными остаются методики экспрессного определения концентрации радионуклидов в продукции животноводства, особенно ^{90}Sr .

Существенные потери в животноводстве после радиационных аварий возникали из-за нерационального использования эвакуированных животных.

Проблема хозяйственного использования продуктивных животных, загрязненных высокими уровнями радионуклидов, нуждается в дальнейшей разработке.

Малоизученным остается диапазон доз сочетанного внешнего и внутреннего облучений сельскохозяйственных животных, угрожающий их здоровью. Необходимы исследования по выявлению дозообразующей роли отдельных биологически значимых радионуклидов.

Особое значение имеют данные о влиянии радионуклидов на сельскохозяйственных животных в условиях длительного поступления в организм, патогенезе и последствиях радиационного поражения. Эта информация позволит усовершенствовать существующие и разработать новые методики диагностики острой и хронической лучевой болезни сельскохозяйственных животных и обоснованно решать вопросы дальнейшего хозяйственного использования животных.

Для проведения профилактики и лечения радиационных поражений сельскохозяйственных животных в определенной мере могут быть использованы средства и способы, разработанные медицинской радиобиологией.

Увеличение поступления в окружающую среду ряда неблагоприятных факторов радиационной и химической природы обуславливает контаминацию продуктов животноводства и продовольственного сырья техногенными загрязнителями. В этой связи актуально использование сельскохозяйственных животных в качестве биологических индикаторов загрязнения агроферы. Под действием этих факторов у животных проявляется ряд изменений и, в частности, в системе кроветворения и иммунном статусе организма, которые наиболее чувствительны к воздействию антропогенных факторов.

Задача заключается в том, чтобы на основании комплексного анализа данных клинического состояния животных, гематологических, биохимических, патоморфологических показателей, иммунного статуса организма, результатов радиологических и химико-токсикологических исследований отобрать наиболее информативные показатели состояния сельскохозяйственных животных, пригодные для их использования в качестве биоиндикаторов антропогенного загрязнения окружающей среды факторами радиационной и химической природы.

Как правило, радиационные факторы воздействуют на организм сельскохозяйственных животных не изолированно, а чаще всего в сочетании с другими агентами, загрязняющими окружающую среду: химическими, физическими и биологическими.

Риск возникновения неблагоприятных последствий возрастает в связи с возможностью синергического взаимодействия различных биотропных факторов даже в том случае, когда отдельно взятые факторы сами по себе не

проявляют своего вредного воздействия. Однако эти вопросы исследованы недостаточно. Такие загрязнители, как пестициды, микотоксины и радиационные факторы, являясь сильными иммунодепрессантами, подавляют иммунные реакции животных. В результате повышается чувствительность к инфекционным болезням и снижается продуктивность. Отсутствуют данные об отдаленных последствиях сочетанного воздействия радиационных, химических и биологических факторов на сельскохозяйственных животных и их потомство.

На радиоактивно загрязненных территориях в условиях штатной работы радиационно-опасных объектов актуальными являются следующие задачи:

- разработка критериев и требований к обеспечению радиационной безопасности сельскохозяйственных животных: нормирование количественных и качественных показателей компонентов радиационной нагрузки на агроэкосистемы, при которых обеспечиваются благоприятные условия для устойчивого функционирования животноводства;

- разработка новых и усовершенствование существующих ветеринарных методов организации и ведения радиоэкологического мониторинга сельскохозяйственных угодий;

- разработка новых и усовершенствование существующих технологий ветеринарного обслуживания хозяйств с различной формой собственности в регионах с повышенным уровнем радионуклидов в окружающей среде;

- разработка методики оценки экономической эффективности ветеринарных противорадиационных мероприятий, способов ветеринарной реабилитации сельскохозяйственных животных на территориях, загрязненных радионуклидами, обеспечивающих устойчивое ведение животноводства и экономическую эффективность использования животных;

- разработка принципов формирования и совершенствования организационно-экономических механизмов функционирования структур ветеринарной службы на территориях, подвергшихся радиационному воздействию, направленных на обеспечение ветеринарного благополучия АПК, увеличение производства продукции животноводства.

В условиях аварийной работы радиационно-опасных объектов и действий ядерных террористов необходимо:

- разработать критерии биологической и радиоэкологической опасности в условиях ядерного и биологического терроризма;

- усовершенствовать противоэпизоотические мероприятия по ликвидации эпизоотий в условиях ядерного терроризма;

- разработать новые диагностические препараты для иммунологического мониторинга и оценки иммунологической эффективности вакцинных препаратов на территории, загрязненной радионуклидами в результате ядерного терроризма;

- моделировать и прогнозировать угрозу заноса возбудителей особо опасных и малоизученных болезней животных на территорию, загрязненную радионуклидами в результате ядерного терроризма.

В целях радиоэкологического мониторинга необходимо:

- отобрать наиболее информативные показатели состояния сельскохозяйственных животных, пригодные для индикации загрязнения окружающей среды факторами радиационной и химической природы;

- усовершенствовать организационные мероприятия по защите сельскохозяйственных животных от воздействия радиационных факторов и снижению потерь в животноводстве;

- разработать системы оперативной диагностики состояния сельскохозяйственных животных при хроническом воздействии долгоживущих радионуклидов и варианты их хозяйственного использования.

Для защиты от сочетанных поражений, индуцированных радиационными и химическими факторами, необходимо:

- с целью ранней диагностики и профилактики патологий разработать методики и отобрать наиболее информативные критерии оценки иммунного статуса сельскохозяйственных животных;

- разработать методы выявления нарушений иммунной системы под влиянием радиационных и химических факторов и способы иммуннокоррекции для профилактики заболеваний;

- повышать устойчивость сельскохозяйственных животных к действию радиационных факторов, отбирать из них наиболее эффективные в этом отношении и разрабатывать новые способы повышения устойчивости животных и оптимизации ведения животноводства на территории, загрязненной радионуклидами;

- усовершенствовать организационные мероприятия по защите сельскохозяйственных животных от воздействия радиационных факторов и снижения потерь в животноводстве;

- разработать технологии интегрированной защиты сельскохозяйственных животных от радиационных, химических и биологических факторов и на их основе систему ветеринарного оздоровления агроценозов;

- разработать новые и усовершенствовать существующие методы, средства, технологии экспресс-диагностики, лечения и профилактики радиационных поражений сельскохозяйственных животных и прогнозирования их последствий;

- в связи с тем, что иммунизация животных способствует их устойчивости к последующему γ -облучению в сублетальных и летальных дозах (при костномозговой форме острой лучевой болезни), обобщить имеющиеся данные о противолучевой эффективности вакцин против вирусных и бактериальных болезней сельскохозяйственных животных, использующихся при плановых ветеринарных профилактических вакцинациях;

- оценить противолучевую эффективность новых средств специфической профилактики сельскохозяйственных животных, прежде всего против особо опасных болезней.

Для научного обоснования введения ограничительных мер при международной торговле животными и товарами животного происхождения (в связи с внешним γ -облучением и радионуклидным загрязнением) на основании сведений о правилах международной торговли животными, товарами животного происхождения и международных стандартов на радиационные факторы, действующих при торговле, необходимо установить наличие опасности, связанной с радиационными факторами; выяснить вероятные пути реализации риска, связанного с радиационными факторами, для людей, животных и окружающей среды; экспериментально обосновать нормативы внешнего облучения и радионуклидного загрязнения импортируемых животных и товаров животного происхождения, приводящие к следующим мерам риска для людей, животных и окружающей среды (незначительной, значительной, средней, высокой, очень высокой).

С развитием биологической и ветеринарной наук в предстоящие десятилетия необходимо: изучить радиационную чувствительность трансгенных животных, генетически устойчивых к инфекционным заболеваниям, животных с новыми генотипами, характеризующимися хозяйственно полезными качествами и устойчивостью к стрессовым факторам; оценить возможность получения трансгенных животных, генетически устойчивых к действию ионизирующих излучений; оценить противолучевые свойства новых биологических препаратов в системе защиты животных от инфекционных болезней (противолучевую эффективность микробиологических средств защиты животных, разработать технологии применения новых противолучевых средств на радиоактивно загрязненных территориях).

Составными элементами в обеспечении радиационной безопасности сельскохозяйственных животных являются осуществление мероприятий по соблюдению правил ветеринарного законодательства, а также информирование сельского населения и обучение персонала в области обеспечения радиационной безопасности. Разработка и реализация программ, направленных на формирование у населения активного отношения к своему здоровью, являются приоритетным направлением научных работ.

От информированности и квалификации ветеринарного врача зависят доверие людей к рекомендуемым мероприятиям и их разумное поведение, преодоление социально-психологического стресса и радиофобии, формирование безопасного образа жизни в условиях проживания на загрязненных территориях и в результате уменьшение доз облучения от радиоактивного загрязнения и сохранение здоровья.

Подготовка квалифицированных ветеринарных врачей является одной из важнейших задач в системе ветеринарной противорадиационной защиты.

Библиографический список

1. Алексахин Р.М., Васильев А.В., Дикарев В.Г. и др. Сельскохозяйственная радиоэкология. - М.: Экология, 1992. - 400 с.
2. Багамаев Б.М., Горчаков Э.В., Федота Н.В., Киреев И.В., Оробец В.А. Клинико-лабораторная диагностика в ветеринарии. Ставрополь, 2013.
3. Баженов В.А., Булдаков Л.А., Василенко И.Я. и др. Радиоактивные вещества. - Л.: Химия, 1990. - 464 с.
4. Белов А.Д., Киршин В.А., Лысенко Н.П. и др. Радиобиология. - М.: Колос, 1999. - 384 с.
5. Белов, А.Д., Косенко А.С., Пак В.В. Радиационная экспертиза объектов ветеринарного надзора: учеб. пособие. - М.: Колос, 1996.
6. Белоус Д.А. Радиация, биосфера, технология. - СПб.: Изд-во ТЕАН. 2004. - 448 с.
7. Беляев В.А., Оробец В.А., Киреев И.В. Биологическая роль селена и селенодефициты у животных и птиц: монография. Ставрополь, 2009.
8. Гераськин С.А. Критический анализ современных концепций и подходов к оценке биологического действия малых доз ионизирующего излучения. Радиационная биология. Радиоэкология. - 1995. - Т. 35. - Вып. 5. - С. 672-676.
9. Ерохин Ю.М. Химия: учебник. - М., 2004. - 384 с.
10. Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная гигиена. - М.: Медицина, 1999. - 384 с.
11. Киреев И.В., Оробец В.А., Скрипкин В.С., Лавренчук Е.И. Влияние метисела на систему антиоксидантной защиты поросят // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 12 (74). С. 46-48.

12. Киреев И.В., Оробец В.А., Скрипкин В.С., Ковалев П.Ф. Антиоксидантный препарат для животных. Патент на изобретение RUS 2435572 от 22.10.2010
13. Корогодин В.И., Корогодина В. Л. Онкогенные последствия облучения человека // Медицинская радиология и радиационная безопасность. - 1997. № 2. С. 26-30.
14. Космос / сост. Д. Радзини; пер. с итал. Н. Лебедевой. - М.: ООО «Издательство АСТ»; ООО «Издательство Астрель», 2004. - 320 с.
15. Коршиков А.А., Оробец В.А. Биологическое действие ионизирующих излучений: учебно-методическое пособие. Ставрополь, 2006.
16. Кузин А.М. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли. - М.: Наука, 1991. - 115 с.
17. Люцко А.М., Ролевич И.В., Тернов В.И. Чернобыль: шанс выжить. - Мн.: Полымя, 1996. - 181 с.
18. Мазурик В.К., Михайлов В.Ф. Радиационно-индуцируемая нестабильность генома: феномен, молекулярные механизмы, патогенетическое значение // Радиационная биология, Радиоэкология. - 2001. Т. 41. № 3. - С. 272-289.
19. Москалев Ю.И. Отдаленные последствия воздействия ионизирующих излучений. - М.: Медицина, 1991. — 464 с.
20. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) - (СП.2.6.2.758-99).
21. Оробец В.А., Беляев В.А., Киреев И.В. Отравления животных. Ставрополь, 2011.
22. Оробец В.А., Горчаков Э.В., Тарануха Н.И. Глоссарий по радиобиологии: учебное пособие. Ставрополь. 2014. 44 с.
23. Оробец В.А., Рыбальченко О.А. Радиоэкология. Ставрополь, 2007.
24. Оробец В.А., Тарануха Н.И. Расчет доз облучения при поступлении радионуклидов внутрь организм: учебно-методическое пособие. – Ставрополь: Респект, 2012. – 15 с.

- 25.Оробец В.А., Рыбальченко О.А. Определение активности радионуклидов и доз ионизирующего излучения: метод. указания. – Ставрополь: АГРУС, 2008. – 51 с.
- 26.Пелевина И.И. Алещенко А.В., Антощина М.М. и др. Реакция популяции клеток на облучение в малых дозах // Радиационная биология. Радиоэкология. - 2003. Т. 43. №2.-С. 161-166.
- 27.Пивоваров Ю.П., Королик В.В., Зиневич Л.С. Гигиена и основы экологии человека. - Ростов-на-Д.: Феникс, 2002. - 510 с.
- 28.Пивоваров Ю.П., Михалев В.П. Радиационная экология: учеб. пособие. - М.: «Академия», 2004. - 240 с.
- 29.Позов С.А., Воронин М.А., Оробец В.А. Диспансеризация сельскохозяйственных животных. Ставрополь, 2006.
- 30.Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля / под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона; пер с англ. - М.: Мир, 1999. - 512 с.
- 31.Рябухин Ю.С., Сикорский М.Р. Моделирование активного ответа на малое радиационно-индуцированное возмущение (предварительные результаты) // Медицинская радиология и радиационная безопасность. - 1999. Т. 44. № 1. С. 15-17.
- 32.Симак С.В., Серых М.М., Самыкина Л.Н. Сельскохозяйственная радиобиология с основами радиоэкологии. - Самара: Издательство СГСХА, 1998. - 267 с.
- 33.Спитковский Д.М. Концепция действия малых доз ионизирующих излучений и ее возможные приложения к трактовке медико-биологических последствий // Вестник Российской АМН. - 1992. - № 4. - С. 39-46.
- 34.Торубаров Ф.С., Николаев Н.К., Чекалин П.В. и др. Состояние нервной системы у лиц, получивших облучение в разном диапазоне доз при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. // Медицинская радиология. - 1991. - Т. 36. -№5. -С. 15-19.

35. Трухачев В.И., Оробец В.А., Позов С.А., Беляев В.А., Орлова Н.Е. Средства и методы диагностики и терапии внутренних болезней животных. Москва, 2009.
36. Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» - 09.01.1996., № 3 - ФЗ.
37. Хрисанфова Е.Н., Перевозчиков И.В. Антропология: учебник. - 3-е изд. - М.: Изд-во МГУ: Изд-во «Высшая школа». - 2002. - 400 с.
38. Черников В.А., Алексахин Р.М., Голубев А.В. Агрэкология. - М.: Колос, 2000. - 536 с.
39. Ярмоненко С.П. Кризис радиобиологии и ее перспективы, связанные с изучением гермезиса // Медицинская радиология и радиационная безопасность. - 1997. Т. 42. № 2. - С. 5-10.
40. Ярмоненко, С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных: учебник - М.: Высш. шк, 2004. - 549 с.
41. Mothersill C., Kadhim M. A., O'Reilly S. et.al. Dose- and time-response relationships for lethal mutations and chromosomal instability induced by ionizing radiation in an immortalized human keratinocyte cell line // Int. J. Radiat. Biol. - 2000. - Vol. 76. - № 6. - P. 799-806.
42. Mothersill C., Crean M., Lyons M. et.al. Expression of delayed toxicity and lethal mutations in the progeny of human cells surviving exposure to radiation and other environmental mutagens // Int. J. Radiat. Biol. - 1998. - Vol. 74. - № 6. - P. 673-680.
43. Little J.B. Radiation-induced genomic instability // Int. J. Radiat. Biol. - 1998. - Vol. 74. - № 6. - P. 663-672.
44. Preston R.J., Wachholdz B.W. Current status of cytogenetic procedures to detect and quality previous exposures to radiation // Mutation Research. - 1988. - V. 196. - P. 103-159.
45. Ponnaija B., Limoli C.L., Corcoran J. et.al. The evolution of chromosomal instability in Chinese hamster cells: a changing picture // Int. J. Radiat. Biol. - 1998. - Vol. 74. - № 6. - P. 765-770.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1.
Основные физические величины, используемые в радиационной биологии и их единицы

Физическая величина	Единица, ее наименование, международное и русское обозначение		Соотношение между единицами	
	внесистемная	международной системы СИ	внесистемной и СИ	СИ и внесистемной
Активность нуклида в радиоактивном источнике	Кюри (Ci, Ки)	Беккерель (Bq, Бк)	1 Ки = = 3,7*10 ¹⁰ Бк	1 Бк = = 2,7*10 ⁻¹¹ Ки
Экспозиционная доза излучения	Рентген (R, Р)	Кулон на кг (C/kg, Кл/кг)	1 Р = = 2,58*10 ⁻⁴ Кл/кг	1 Кл/кг = = 3876 Р
Мощность экспозиционной дозы излучения	Рентген в секунду (R/s, Р/с)	Ампер на килограмм (A/kg, А/кг)	1 Р/с = = 2,58*10 ⁻⁴ А/кг	1 А/кг = = 3876 Р/с
Поглощенная доза излучения	Рад (rad, рад)	Грей (Gy, Гр)	1 рад = = 0,01 Гр	1 Гр = = 100 рад
Мощность поглощенной дозы излучения	Рад в секунду (rad/s, рад/с)	Грей в секунду (Gy/s, Гр/с)	1 рад/с = = 0,01 Гр/с	1 Гр/с = = 100 рад/с
Эквивалентная доза излучения	Бэр (ber, бэр)	Зиверт (Sv, Зв)	1 бэр = = 0,01 Зв	1 Зв = = 100 бэр
Эффективная доза излучения		Зиверт (Sv, Зв)		

Таблица 2.
Приставки и множители для образования десятичных, кратных и дольных единиц

дека (да)	10 ¹	деци (д)	10 ⁻¹
гекто (г)	10 ²	санتي (с)	10 ⁻²
кило (к)	10 ³	милли (м)	10 ⁻³
мега (М)	10 ⁶	микро (мк)	10 ⁻⁶
гига (Г)	10 ⁹	нано (н)	10 ⁻⁹
тера (Т)	10 ¹²	пико (п)	10 ⁻¹²
пета (П)	10 ¹⁵	фемто (ф)	10 ⁻¹⁵

Примеры расчетов при переходе от внесистемных единиц к единицам
Международной системы

$4500 \text{ Ки} = 4500 * 3,7 * 10^{10} \text{ Бк} = 166 * 10^{12} \text{ Бк} = 166 \text{ ТБк}$
 $500 \text{ Р} = 500 * 2,58 * 10^{-4} \text{ Кл/кг} = 129 * 10^{-3} \text{ Кл/кг} = 129 \text{ мКл/кг}$
 $90 \text{ Р/мин} = (90/60) \text{ Р/с} = 1,5 * 2,58 * 10^{-4} \text{ А/кг} = 0,387 * 10^{-3} \text{ А/кг} = 0,387 \text{ мА/кг}$
 $200 \text{ рад} = 200 * 0,01 \text{ Гр} = 2 \text{ Гр}$
 $60 \text{ рад/мин} = 60 * 0,01 \text{ Гр/мин} = 0,6 \text{ Гр/мин}$

Примеры расчетов при переходе от Международной системы единиц
к внесистемным единицам

$5,55 \text{ ГБк} = 5,55 * 10^9 * 2,7 * 10^{-11} \text{ Ки} = 15 * 10^{-2} \text{ Ки} = 150 \text{ мКи}$
 $77,4 \text{ мКл/кг} = 77,4 * 10^{-3} * 3876 \text{ Р} = 3 * 10^5 * 10^{-3} \text{ Р} = 300 \text{ Р}$
 $0,215 \text{ мА/кг} = 0,215 * 10^{-3} * 3876 \text{ Р/с} = 0,833 \text{ Р/с}$ (или $0,833 * 60 = 50 \text{ Р/мин}$)
 $4,5 \text{ Гр} = 4,5 * 100 \text{ рад} = 450 \text{ рад}$
 $75 \text{ мГр/мин} = 75 * 10^{-3} * 100 \text{ рад/мин} = 7,5 \text{ рад/мин}$

Таблица 3.

Периоды полураспада радиоизотопов

Изотоп	Период полураспада (Т)	Изотоп	Период полураспада (Т)
Углерод-14 (¹⁴ C)	5730 лет	Йод-125 (¹²⁵ I)	60 суток
Натрий-24 (²⁴ Na)	15 часов	Йод-131 (¹³¹ I)	8,06 суток
Фосфор-32 (³² P)	14,3 суток	Цезий-134 (¹³⁴ Cs)	2 года
Сера-35 (³⁵ S)	87,4 суток	Цезий-137 (¹³⁷ Cs)	30 лет
Калий-40 (⁴⁰ K)	$1,42 * 10^9$ лет	Церий-143 (¹⁴³ Ce)	33,4 часа
Калий-42 (⁴² K)	12,3 часов	Радий-226 (²²⁶ Ra)	1600 лет
Кальций-45 (⁴⁵ Ca)	163 суток	Бром-82 (⁸² Br)	36 часов
Железо-59 (⁵⁹ Fe)	44,5 суток	Золото-198 (¹⁹⁸ Au)	64 часа
Кобальт-60 (⁶⁰ Co)	5,3 года	Сурьма-124 (¹²⁴ Sb)	60,1 суток
Стронций-89 (⁸⁹ Sr)	50,5 суток	Теллур-127 (¹²⁷ Te)	9,3 часа
Стронций-90 (⁹⁰ Sr)	28,6 года	Полоний-210 (²¹⁰ Po)	139 суток
Рутений-106 (¹⁰⁶ Ru)	1 год	Уран-235 (²³⁵ U)	$7 * 10^8$ лет
Барий-140 (¹⁴⁰ Ba)	13 суток		

Таблица 4.

Значение поправочного коэффициента (К) на радиоактивный распад для различных значений времени (по И.Н. Верховской)

t/T	К	t/T	К
0,00	1,00	1,25	2,36
0,02	1,02	1,50	2,82
0,04	1,03	1,75	3,35
0,06	1,04	2,00	4,00
0,08	1,06	2,5	5,64
0,1	1,07	3,0	8,00
0,2	1,15	3,5	11,36
0,3	1,23	4,0	16,00
0,4	1,32	4,5	22,65
0,5	1,41	5,0	32,00
0,6	1,52	6,0	64,00
0,7	1,62	7,0	128,00
0,8	1,76	8,0	256,00
0,9	1,86	9,0	512,00
1,0	2,00	10,0	1024,00

Время (t) в течение которого распадался изотоп и его период полураспада (T) следует выражать в одинаковых единицах времени.

Чтобы определить, сколько останется радиоизотопа, нужно начальное его количество разделить на коэффициент К: $A_t = A_0/K$

Чтобы определить, сколько было радиоизотопа нужно имеющееся его количество умножить на коэффициент К: $A_0 = A_t * K$

Таблица 5.

Значения коэффициентов ткани (К_{тк})

Вид биологической ткани	К _{тк}
Весь организм в целом	0,93
Вода	0,93
Жировая ткань	0,60
Воздух	0,88
Костная ткань:	
молодая	2
старая	5

Таблица 6

Коэффициенты качества ионизирующих излучений (Кк)

Вид излучения	Кк
γ -излучение	1
рентгеновское излучение	1-2
β -излучение	0,3-3
тепловые нейтроны	4-5
протоны и быстрые нейтроны (до 20 МэВ)	0,5-10
поток протонов	10
α -излучение	10-20
многозарядные ионы и ядра отдачи	20-30

Таблица 7.

Тканевые взвешивающие коэффициенты (ТК)

Наименование органов и тканей	ТК
Поверхность кожи, кожа, жировая ткань	0,01
Мочевой пузырь, грудная железа, печень, пищевод, щитовидная железа, остальные органы и ткани	0,05
Толстая кишка, легкие, костный мозг, желудок	0,12
Половые железы (гонады)	0,20
Все тело	1,00

Таблица 8.

e^x и e^{-x} с 10 значащими цифрами
для аргумента $0 \leq x \leq 10$ с шагом 0,01

X	e^x	e^{-x}
0,00	1,00000	1,00000
0,01	1,01005	0,99004
0,02	1,02020	0,98019
0,03	1,03045	0,97044
0,04	1,04081	0,96078
0,05	1,05127	0,95122
0,06	1,06183	0,94176
0,07	1,07250	0,93239
0,08	1,08328	0,92311
0,09	1,09417	0,91393
0,10	1,10517	0,90483
0,11	1,11627	0,89583

X	e^x	e^{-x}
0,40	1,49182	0,67032
0,41	1,50681	0,66365
0,42	1,52196	0,65704
0,43	1,53725	0,65050
0,44	1,55270	0,64403
0,45	1,56831	0,63762
0,46	1,58407	0,63128
0,47	1,59999	0,62500
0,48	1,61607	0,61878
0,49	1,63231	0,61262
0,50	1,64872	0,60653
0,51	1,66529	0,60049

X	e^x	e^{-x}
0,80	2,22554	0,44933
0,81	2,24791	0,44486
0,82	2,27050	0,44043
0,83	2,29332	0,43605
0,84	2,31637	0,43171
0,85	2,33964	0,42741
0,86	2,36316	0,42316
0,87	2,38691	0,41895
0,88	2,41089	0,41478
0,89	2,43512	0,41065
0,90	2,45960	0,40656
0,91	2,48432	0,40252

0,12	1,12749	0,88692
0,13	1,13882	0,87809
0,14	1,15027	0,86935
0,15	1,16183	0,86070
0,16	1,17351	0,85214
0,17	1,18530	0,84366
0,18	1,19721	0,83527
0,19	1,20924	0,82695
0,20	1,22140	0,81873
0,21	1,23367	0,81058
0,22	1,24607	0,80251
0,23	1,25860	0,79453
0,24	1,27124	0,78662
0,25	1,28402	0,77880
0,26	1,29693	0,77105
0,27	1,30996	0,76337
0,28	1,32312	0,75578
0,29	1,33642	0,74826
0,30	1,34985	0,74081
0,31	1,36342	0,73344
0,32	1,37712	0,72614
0,33	1,39096	0,71892
0,34	1,40494	0,71177
0,35	1,41906	0,70468
0,36	1,43332	0,69767
0,37	1,44773	0,69073
0,38	1,46228	0,68386
0,39	1,47698	0,67705

0,52	1,68202	0,59452
0,53	1,69893	0,58860
0,54	1,71600	0,58274
0,55	1,73325	0,57694
0,56	1,75067	0,57120
0,57	1,76826	0,56552
0,58	1,78603	0,55989
0,59	1,80398	0,55432
0,60	1,82211	0,54881
0,61	1,84043	0,54335
0,62	1,85892	0,53794
0,63	1,87761	0,53259
0,64	1,89648	0,52729
0,65	1,91554	0,52204
0,66	1,93479	0,51685
0,67	1,95423	0,51170
0,68	1,97387	0,50661
0,69	1,99371	0,50157
0,70	2,01375	0,49658
0,71	2,03399	0,49164
0,72	2,05443	0,48675
0,73	2,07508	0,48190
0,74	2,09593	0,47711
0,75	2,11700	0,47236
0,76	2,13827	0,46766
0,77	2,15976	0,46301
0,78	2,18147	0,45840
0,79	2,20339	0,45384

0,92	2,50929	0,39851
0,93	2,53450	0,39455
0,94	2,55998	0,39062
0,95	2,58570	0,38674
0,96	2,61169	0,38289
0,97	2,63794	0,37908
0,98	2,66445	0,37531
0,99	2,69123	0,37157
1,00	2,71828	0,36787
1,01	2,74560	0,36421
1,02	2,77319	0,36059
1,03	2,80106	0,35700
1,04	2,82921	0,35345
1,05	2,85765	0,34993
1,06	2,88637	0,34645
1,07	2,91537	0,34300
1,08	2,94467	0,33959
1,09	2,97427	0,33621
1,10	3,00416	0,33287
1,11	3,03435	0,32955
1,12	3,06485	0,32627
1,13	3,09565	0,32303
1,14	3,12676	0,31981
1,15	3,15819	0,31663
1,16	3,18993	0,31348
1,17	3,22199	0,31036
1,18	3,25437	0,30727
1,19	3,28708	0,30422

X	e ^x	e ^{-x}
1,20	3,32011	0,30119
1,21	3,35348	0,29819
1,22	3,38719	0,29523
1,23	3,42123	0,29229
1,24	3,45561	0,28938
1,25	3,49034	0,28650
1,26	3,52542	0,28365
1,27	3,56085	0,28083
1,28	3,59663	0,27803
1,29	3,63278	0,27527
1,30	3,66929	0,27253
1,31	3,70617	0,26982
1,32	3,74342	0,26713
1,33	3,78104	0,26447
1,34	3,81904	0,26184

X	e ^x	e ^{-x}
1,65	5,20698	0,19204
1,66	5,25931	0,19013
1,67	5,31216	0,18824
1,68	5,36555	0,18637
1,69	5,41948	0,18451
1,70	5,47394	0,18268
1,71	5,52896	0,18086
1,72	5,58452	0,17906
1,73	5,64065	0,17728
1,74	5,69734	0,17552
1,75	5,75460	0,17377
1,76	5,81243	0,17204
1,77	5,87085	0,17033
1,78	5,92985	0,16863
1,79	5,98945	0,16696

X	e ^x	e ^{-x}
2,10	8,16616	0,12245
2,11	8,24824	0,12123
2,12	8,33113	0,12003
2,13	8,41486	0,11883
2,14	8,49943	0,11765
2,15	8,58485	0,11648
2,16	8,67113	0,11532
2,17	8,75828	0,11417
2,18	8,84630	0,11304
2,19	8,93521	0,11191
2,20	9,02501	0,11080
2,21	9,11571	0,10970
2,22	9,20733	0,10860
2,23	9,29986	0,10752
2,24	9,39333	0,10645

X	e^x	e^{-x}
1,35	3,85742	0,25924
1,36	3,89619	0,25666
1,37	3,93535	0,25410
1,38	3,97490	0,25157
1,39	4,01485	0,24907
1,40	4,05519	0,24659
1,41	4,09595	0,24414
1,42	4,13712	0,24171
1,43	4,17869	0,23930
1,44	4,22069	0,23692
1,45	4,26311	0,23457
1,46	4,30595	0,23223
1,47	4,34923	0,22992
1,48	4,39294	0,22763
1,49	4,43709	0,22537
1,50	4,48168	0,22313
1,51	4,52673	0,22090
1,52	4,57222	0,21871
1,53	4,61817	0,21653
1,54	4,66459	0,21438
1,55	4,71147	0,21224
1,56	4,75882	0,21013
1,57	4,80664	0,20804
1,58	4,85495	0,20597
1,59	4,90374	0,20392
1,60	4,95303	0,20189
1,61	5,00281	0,19988
1,62	5,05309	0,19789
1,63	5,10387	0,19592
1,64	5,15516	0,19398

X	e^x	e^{-x}
1,80	6,04964	0,16529
1,81	6,11044	0,16365
1,82	6,17185	0,16202
1,83	6,23388	0,16041
1,84	6,29653	0,15881
0,85	6,35981	0,15723
0,86	6,42373	0,15567
0,87	6,48829	0,15412
0,88	6,55350	0,15259
0,89	6,61936	0,15107
1,90	6,68589	0,14956
1,91	6,75308	0,14808
1,92	6,82095	0,14660
1,93	6,88951	0,14514
1,94	6,95875	0,14370
1,95	7,02868	0,14227
1,96	7,09932	0,14085
1,97	7,17067	0,13945
1,98	7,24274	0,13806
1,99	7,31553	0,13669
2,00	7,38905	0,13533
2,01	7,46331	0,13398
2,02	7,53832	0,13265
2,03	7,61408	0,13133
2,04	7,69060	0,13002
2,05	7,76790	0,12873
2,06	7,84596	0,12745
2,07	7,92482	0,12618
2,08	8,00446	0,12493
2,09	8,08491	0,12368

X	e^x	e^{-x}
2,25	9,48773	0,10539
2,26	9,58308	0,10435
2,27	9,67940	0,10331
2,28	9,77668	0,10228
2,29	9,87493	0,10126
2,30	9,97418	0,10025
2,31	10,07442	0,099261
2,32	10,17567	0,098273
2,33	10,27794	0,097295
2,34	10,38123	0,096327
2,35	10,4855	0,095369
2,36	10,5909	0,094420
2,37	10,6973	0,093480
2,38	10,8049	0,092550
2,39	10,9134	0,091629
2,40	11,0231	0,090717
2,41	11,1339	0,089815
2,42	11,2458	0,088921
2,43	11,3588	0,088036
2,44	11,4730	0,087160
2,45	11,5883	0,086293
2,46	11,7048	0,085434
2,47	11,8224	0,084584
2,48	11,9412	0,083743
2,49	12,0612	0,082909
2,50	12,1824	0,082084
2,51	12,3049	0,081268
2,52	12,4285	0,080459
2,53	12,5535	0,079659
2,54	12,6796	0,078866

X	e^x	e^{-x}
2,55	12,8071	0,078081
2,56	12,9358	0,077304
2,57	13,0658	0,076535
2,58	13,1971	0,075774
2,59	13,3297	0,075020
2,60	13,4637	0,074273
2,61	13,5990	0,073534
2,62	13,7357	0,072802
2,63	13,8737	0,072078
2,64	14,0132	0,071361
2,65	14,1540	0,070651
2,66	14,2962	0,069948
2,67	14,4399	0,069252
2,68	14,5850	0,068563

X	e^x	e^{-x}
3,00	20,0855	0,049787
3,01	20,2873	0,049291
3,02	20,4912	0,048801
3,03	20,972	0,048315
3,04	20,09052	0,047834
3,05	21,1153	0,047358
3,06	21,3275	0,046887
3,07	21,5419	0,046421
3,08	21,7584	0,045959
3,09	21,9770	0,045501
3,10	22,1979	0,045049
3,11	22,4210	0,044600
3,12	22,6463	0,044157
3,13	22,8739	0,043717

X	e^x	e^{-x}
3,45	31,5003	0,031745
3,46	31,8169	0,031429
3,47	32,1367	0,031117
3,48	32,4597	0,030807
3,49	32,7859	0,030500
3,50	33,1154	0,030197
3,51	33,4482	0,029896
3,52	33,7844	0,029599
3,53	34,1239	0,029304
3,54	34,4669	0,029013
3,55	34,8133	0,028724
3,56	35,1631	0,028438
3,57	35,5165	0,028155
3,58	35,8735	0,027875

X	e^x	e^{-x}
2,69	14,7316	0,067880
2,70	14,8797	0,067205
2,71	15,0292	0,066536
2,72	15,1803	0,065874
2,73	15,3328	0,065219
2,74	15,4869	0,064570
2,75	15,6426	0,063927
2,76	15,7998	0,063291
2,77	15,9586	0,062662
2,78	16,1190	0,062038
2,79	16,2810	0,061421
2,80	16,4446	0,060810
2,81	16,6099	0,060204
2,82	16,7768	0,059605
2,83	16,9454	0,059012
2,84	17,1157	0,058425
2,85	17,2877	0,057844
2,86	17,4615	0,057268
2,87	17,6370	0,056698
2,88	17,8142	0,056134
2,89	17,9933	0,055576
2,90	18,1741	0,055023
2,91	18,3567	0,054475
2,92	18,5412	0,053933
2,93	18,7276	0,053397
2,94	18,9158	0,052865
2,95	19,1059	0,052339
2,96	19,2979	0,051818
2,97	19,4919	0,051303
2,98	19,6878	0,050792
2,99	19,8856	0,0502,87

X	e^x	e^{-x}
3,14	23,1038	0,043282
3,15	23,3360	0,042852
3,16	23,5705	0,042425
3,17	23,8074	0,042003
3,18	24,0467	0,041585
3,19	24,2884	0,041171
3,20	24,5325	0,040762
3,21	24,7790	0,040356
3,22	25,0281	0,039955
3,23	25,2796	0,039557
3,24	25,5337	0,039163
3,25	25,7903	0,038774
3,26	26,0495	0,038388
3,27	26,3113	0,038006
3,28	26,5757	0,037628
3,29	26,8428	0,037253
3,30	27,1126	0,036883
3,31	27,3851	0,036516
3,32	27,6603	0,036152
3,33	27,9383	0,035793
3,34	28,2191	0,035436
3,35	28,5027	0,035084
2,36	28,7891	0,034735
2,37	29,0785	0,034389
2,38	29,3707	0,034047
2,39	29,6659	0,033708
3,40	29,9641	0,033373
3,41	30,2652	0,033041
3,42	30,5694	0,032712
3,43	30,8766	0,032386
3,44	31,1869	0,032064

X	e^x	e^{-x}
3,59	36,2340	0,027598
3,60	36,5982	0,027323
3,61	36,9660	0,027051
3,62	37,3375	0,026782
3,63	37,7128	0,026516
3,64	38,0918	0,026252
3,65	38,4746	0,025991
3,66	38,8613	0,025732
3,67	39,2519	0,025476
3,68	39,6463	0,025222
3,69	40,0448	0,024972
3,70	40,4473	0,024723
3,71	40,8538	0,024477
3,72	41,2643	0,024233
3,73	41,6791	0,023992
3,74	42,0979	0,023754
3,75	42,5210	0,023517
3,76	42,9484	0,023283
3,77	43,3800	0,023052
3,78	43,8160	0,022822
3,79	44,2564	0,022595
3,80	44,7011	0,022370
3,81	45,1504	0,022148
3,82	45,6042	0,021927
3,83	46,0625	0,021709
3,84	46,5254	0,021493
3,85	46,9930	0,021279
3,86	47,4653	0,021067
3,87	47,9423	0,020858
3,88	48,4242	0,020650
3,89	48,9108	0,020445

X	e^x	e^{-x}
3,90	49,4024	0,020241
3,91	49,8989	0,020040
3,92	50,4004	0,019841
3,93	50,9069	0,019643
3,94	51,4186	0,019448
3,95	51,9353	0,019254
3,96	52,4573	0,019063
3,97	52,9845	0,018873
3,98	53,5170	0,018685
3,99	54,0548	0,018499
4,00	54,59815	0,018315
4,10	60,3402	0,016572

X	e^x	e^{-x}
5,50	244,691	0,004087
5,60	270,426	0,003698
5,70	298,867	0,003346
5,80	330,299	0,003028
5,90	365,037	0,002739
6,00	403,428	0,002479
6,10	445,857	0,002243
6,20	492,749	0,002029
6,30	544,571	0,001836
6,40	601,845	0,001662
6,50	665,141	0,001503
6,60	735,095	0,001360

X	e^x	e^{-x}
8,00	2980,95	0,000335
8,10	3294,46	0,000304
8,20	3640,95	0,000275
8,30	4023,87	0,000249
8,40	4447,06	0,000225
8,50	4914,76	0,000203
8,60	5431,65	0,000184
8,70	6002,91	0,000167
8,80	6634,24	0,000151
8,90	7331,97	0,000136
9,00	8103,08	0,000123
9,10	8955,29	0,000112

X	e^x	e^{-x}
4,20	66,6863	0,014995
4,30	73,6997	0,013568
4,40	81,4508	0,012277
4,50	90,0171	0,011108
4,60	99,4843	0,010051
4,70	109,947	0,009095
4,80	121,510	0,008229
4,90	134,289	0,007447
5,00	148,413	0,006738
5,10	164,021	0,006097
5,20	181,272	0,005516
5,30	200,336	0,004992
5,40	221,406	0,004517

X	e^x	e^{-x}
6,70	812,405	0,001231
6,80	897,847	0,001114
6,90	992,274	0,001008
7,00	1096,63	0,000912
7,10	1211,96	0,000825
7,20	1339,43	0,000747
7,30	1480,29	0,000676
7,40	1635,98	0,000611
7,50	1808,04	0,000553
7,60	1998,19	0,000500
7,70	2208,34	0,000453
7,80	2440,60	0,000410
7,90	2697,28	0,000371

X	e^x	e^{-x}
9,20	9897,12	0,000101
9,30	1093,80	0,000914
9,40	1208,83	0,000827
9,50	1,335,97	0,000749
9,60	1476,47	0,000677
9,70	1631,76	0,000613
9,80	1803,37	0,000555
9,90	1993,03	0,000502
10,0	22026,4	0,000045
20,0	$4,85 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^{-9}$
30,0	$1,07 \cdot 10^{13}$	$9,3 \cdot 10^{-14}$
40,0	$2,35 \cdot 10^{17}$	$4,2 \cdot 10^{-15}$
50,0	$5,16 \cdot 10^{21}$	$1,93 \cdot 10^{-22}$