



Н. П. Лысенко, В. В. Пак
Л. В. Рогожина, З. Г. Кусурова

РАДИОБИОЛОГИЯ





• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •
• МОСКВА •
• КРАСНОДАР •
2017

РАДИОБИОЛОГИЯ

Под редакцией профессора *Н. П. ЛЫСЕНКО*
и профессора *В. В. ПАКА*

*Издание четвертое,
стереотипное*

*Допущено
УМО вузов РФ по образованию
в области зоотехнии и ветеринарии
в качестве учебника для студентов вузов,
обучающихся по направлению подготовки (специальности)
«Ветеринария» (квалификация (степень) «специалист»)
и направлению подготовки (специальности) «Зоотехния»
(квалификация (степень) «бакалавр» и «магистр»)*



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •
• МОСКВА • КРАСНОДАР •
2017

ББК 40.1я73

Л 88

**Лысенко Н. П., Пак В. В., Рогожина Л. В.,
Кусурова З. Г.**

Л 88 Радиобиология: Учебник / Под ред. Н. П. Лысенко и В. В. Пака. — 4-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 572 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-1330-0

В учебнике собран и обобщен материал по действию ионизирующих излучений на системы и органы различных видов животных и отдельные звенья биогеоценозов. В книгу включены обширные материалы экспериментальных исследований самих авторов.

Впервые полно освещаются вопросы радиоэкологии Севера, основы сельскохозяйственной радиоэкологии и организации ведения животноводства в условиях радиоактивного загрязнения внешней среды, ветсанэкспертизы продукции животноводства при радиационных поражениях.

Учебник предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Ветеринария» и направлению подготовки «Зоотехния», а также может быть использован для направления подготовки «Биология» (биохимия, биофизика, биоэкология), полезен смежным специальностям: товароведу, эксперту по сырью животного происхождения при оценке качества сырья, технологу по переработке продукции животноводства, слушателям ФПК — ветврачам-радиологам, преподавателям высших учебных заведений.

ББК 40.1я73

Рецензенты:

М. Л. ГУСАРОВА — доктор биологических наук, профессор, зав. кафедрой радиобиологии и безопасности жизнедеятельности Нижегородской сельскохозяйственной академии; *Н. Н. КОТОВ* — доктор биологических наук, профессор кафедры радиационной гигиены Российской медицинской академии последиplomного образования; *А. И. ЖУРАВЛЕВ* — доктор биологических наук, профессор кафедры биофизики и физики Московской государственной академии ветеринарной медицины и биотехнологии им. К. И. Скрябина, заслуженный деятель науки РФ.

Обложка

Е. А. ВЛАСОВА

*Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.*

*Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2017

© Коллектив авторов, 2017

© Издательство «Лань»,

художественное оформление, 2017



ВВЕДЕНИЕ

Радиобиология изучает закономерности и механизмы действия ионизирующего излучения на биоорганические вещества, вирусы, бактерии, клетки, ткани, целостные организмы, популяции, биогеоценозы, их сообщества и биосферу в целом.

Открытия и обобщения в области радиобиологии, большой экспериментальный материал, полученный за сравнительно короткое время, легли в основу радиационной медицины, прогнозирования радиационной опасности. Они широко используются также в генетике, молекулярной биологии, экологии, сельском хозяйстве и т. д.

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 меченых атомов 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 ионизирующих 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.

Важнейшими практическими задачами радиобиологии являются обучение методам контроля и прогнозирования радиоактивных загрязнений продуктов животноводства и кормов (радиометрия, дозиметрия и защита от излучений), проведение комплекса организационных и специальных мероприятий при ведении животноводства в условиях радионуклидного загрязнения внешней среды, рационального использования загрязненной радионуклидами продукции растениеводства и животноводства, а также проведение комплекса мероприятий по диагностике, лечению и профилактике радиационных поражений сельскохозяйственных животных, применение радионуклидов и радиационной биотехнологии в ветеринарии и животноводстве.

Таким образом, радиобиология нацелена на решение актуальной гуманитарной задачи обеспечения комфортной и безопасной среды обитания человека в условиях реальных и потенциальных радионуклидных загрязнений.

Учебник «Радиобиология» предназначен для студентов ветеринарных вузов и зооинженерных факультетов, а также изучающих проблемы переработки, хранения, маркетинга пищевых продуктов и сырья животного происхождения, мониторинга природных и сельскохозяйственных экосистем. Книга может быть полезна ветврачам-радиологам, научным работникам, аспирантам, занимающимся вопросами радио-

биологии, радиоэкологии, а также широкому кругу читателей, интересующихся проблемами охраны и качества окружающей среды.

Учебник написан в соответствии с примерной программой дисциплин ветеринарных вузов и отвечает требованиям Государственного образовательного стандарта Российской Федерации.

В свете современных представлений в учебнике рассматриваются программные вопросы физических основ радиобиологии, дозиметрии и радиометрии ионизирующих излучений, биологического действия ионизирующих излучений, а также лучевые (радиационные) поражения у животных. В соответствии с «Положением о системе государственного ветеринарного контроля радиоактивного загрязнения объектов ветеринарного надзора в Российской Федерации» рассматриваются радиометрические, радиохимические и спектрометрические методы радиационного контроля объектов ветеринарного надзора и внешней среды, основы радиационной безопасности.

В учебнике собран и обобщен большой литературный материал по действию ионизирующих излучений на системы и органы различных видов животных и отдельные звенья биогеоценозов. В книгу включены обширные материалы экспериментальных исследований самих авторов. Впервые полностью освещаются вопросы радиоэкологии Севера, основы сельскохозяйственной радиоэкологии и организации ведения животноводства в условиях радиоактивного загрязнения внешней среды, ветсанэкспертизы продукции животноводства при радиационных поражениях. Широко представлены разделы: токсикология радиоактивных веществ, комбинированные лучевые поражения, отдаленные последствия действия радиации, а также пути использования радионуклидов и источников ионизирующих излучений в животноводстве и ветеринарии.



ГЛАВА ПЕРВАЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОБИОЛОГИИ. СТРОЕНИЕ АТОМА

Все в природе состоит из веществ. *Вещество* — это любая совокупность атомов и молекул, находящихся в определенном агрегатном состоянии. Вещества бывают простые и сложные. В состав *простых веществ* входят атомы только одного элемента. *Сложные вещества*, или *химические соединения*, содержат атомы нескольких элементов.

Атом — мельчайшая частица химического элемента, которая является носителем его химических свойств (от греч. atomos — неделимый, термин предложил древнегреческий ученый Демокрит, IV в. до н. э.).

В природе только инертные газы обнаруживаются в виде атомов, так как их внешние оболочки замкнутые; все остальные вещества существуют в виде молекул.

Атом любого элемента можно разделить на субатомные (элементарные) частицы, и в этом случае он утратит свойства, характерные для данного элемента. К элементарным частицам относят *электроны, протоны, нейтроны, мезоны, нейтрино* и ряд других. Однако определение «элементарные» не означает, что эти частицы простейшие, бесструктурные элементы материи. Электрон, например, так же многообразен, как и атом.

Вместе с тем изучение атомов всех элементов, входящих в периодическую систему, в конечном итоге сводится к изучению свойств и взаимодействию трех частиц — *электронов, протонов и нейтронов*. Один элемент отличается от другого только числом и расположением этих частиц.

В начале XX в. было выдвинуто несколько теорий строения атома, которые называли моделями атома. При помощи

моделей ученые пытались объяснить различные физические свойства атомов — линейность спектра излучения газов при высокой температуре, электрическую нейтральность и устойчивость атома и многие другие явления.

В 1911 г. Э. Резерфорд предложил *планетарную модель атома*. Согласно этой модели в центре атома расположено положительно заряженное ядро с диаметром $10^{-13} \dots 10^{-12}$ см. Вокруг ядра вращаются по эллиптическим орбитам электроны, образующие электронную оболочку атома.

В 1913 г. датский ученый Н. Бор усовершенствовал эту модель (квантовая теория Бора). Согласно этой теории электроны в атоме могут занимать не любое положение, а только определенный уровень (1, 2, 3 и т. д.), т. е. энергия электрона в атоме не может меняться непрерывно, а изменяется скачкообразно, т. е. дискретно. Переход электрона с одного уровня на другой совершается скачкообразно и сопровождается испусканием или поглощением кванта электромагнитного излучения.

Основные положения своей теории Бор сформулировал в виде *постулатов* (утверждения без доказательств). Согласно постулатам Бора электроны вращаются вокруг ядра по определенным (стационарным) круговым орбитам, не излучая при этом энергии. Излучение происходит при скачкообразном переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую. На разных энергетических уровнях электрон имеет разную кинетическую энергию (чем дальше от ядра, тем она больше) и энергию связи с ядром (чем дальше от ядра, тем она меньше).

Электронная оболочка. В зависимости от энергии, которая удерживает электроны при вращении вокруг ядра, они группируются на той или иной электронной орбите. Иначе электронную орбиту называют уровнем или слоем. Число слоев у различных атомов неодинаковое. В атомах с большой атомной массой число орбит достигает семи. Их обозначают либо цифрами: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, либо буквами латинского алфавита: K, L, M, N, O, P, Q (рис. 1).

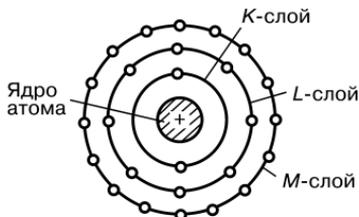


Рис. 1
Схема атома

Ближайший к ядру — K -слой. На этом слое энергия связи (Есв) электрона с ядром максимальна и возрастает с увеличением атомного номера элемента.

Например: ${}^{12}_6\text{C} = 0,28 \text{ КэВ}$, ${}^{90}_{30}\text{Sr} = 16 \text{ КэВ}$, ${}^{137}_{55}\text{Cs} = 36 \text{ КэВ}$.

На внешних орбитах — Есв e^- минимальна (1...2 эВ), поэтому внешний электрон легче других сорвать с орбиты при действии на атомы энергии извне, например энергии ионизирующего излучения.

Число электронов в каждом слое строго определенное. Так, K -слой имеет не более двух электронов, L -слой — до 8, M -слой — до 18, N -слой — 32 электрона и т. д. (см. рис. 1). Число электронов на орбите определяется по формуле $2n^2$, где n — номер электронного уровня.

Электрон e^- — устойчивая элементарная частица с массой покоя¹, равной 0,000548 атомной единицы массы (а. е. м.)², а в абсолютных единицах массы $9,1 \cdot 10^{-28}$ г. Энергетический эквивалент электрона составляет $0,000548 \cdot 931 = 0,511 \text{ МэВ}^3$. Электрон несет один элементарный отрицательный заряд электричества, т. е. наименьшее количество электричества, встречающееся в природе, $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл ($4,8 \cdot 10^{10}$ ед. СГСЭ). Поэтому в ядерной физике заряд электрона принят за единицу.

В атоме суммарное количество электронов на орбитах всегда равно сумме протонов, находящихся в ядре. Например, атом гелия содержит два протона в ядре и имеет два электрона на орбите, атом натрия — 11 протонов в ядре и 11 электронов на орбитах, атом свинца — 82 протона в ядре и 82 электрона на орбитах и т. д. Вследствие равенства суммы положительных и отрицательных зарядов атом представляет собой электрически нейтральную систему.

¹ Масса покоя (собственная масса) — масса частицы, скорость которой равна 0.

² а. е. м. — это относительная (безмерная) величина атомной массы, которая показывает, во сколько раз атом данного элемента тяжелее 1/12 части атома изотопа ${}^{12}\text{C}$. Энергетический эквивалент 1 а. е. м. составляет 931 МэВ.

³ В ядерной физике энергию частиц выражают в электронвольтах (эВ). Электронвольт — энергия, которую приобретает электрон, проходящий в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 В. Величина энергии равная 1 тыс. эВ называется килоэлектронвольт (кэВ), а равная 1 млн эВ — мегаэлектронвольт (МэВ).

На каждый из движущихся вокруг ядра электронов действуют две равные, противоположно направленные силы: *кулоновская сила* притягивает электроны к ядру, а равная ей *центробежная сила* инерции стремится вырвать электрон из атома. Кроме того, электроны, вращаясь по орбите, одновременно имеют собственный момент количества движения, т. е., подобно волчку, вращаются вокруг собственной оси. Собственный момент количества движения носит название *спин*. Спины отдельных электронов могут быть ориентированы параллельно или антипараллельно друг другу. Все это обеспечивает устойчивое положение электронов в атоме.

Однако на связь электрона с ядром действуют не только кулоновская сила притяжения и центробежная сила инерции, но и сила отталкивания других электронов. Этот эффект называют *экранировкой*. Чем дальше электронная орбита от ядра, тем сильнее экранировка электронов и тем слабее энергетическая связь этих электронов с ядром. На внешних орбитах энергия связи электронов не превышает 1...2 эВ, тогда как у электронов *K*-слоя она во много раз больше и возрастает с увеличением атомного номера элемента (так, у углерода энергия связи электронов *K*-слоя составляет 0,28 кэВ, у стронция — 16 кэВ, у цезия — 36 кэВ, у урана — 280 кэВ). Поэтому электроны внешней орбиты больше подвержены воздействию излучений низкой энергии.

При сообщении электронам извне дополнительной энергии (например, энергии ионизирующего излучения) они могут переходить с одного энергетического уровня (орбиты) на другой или даже покидать пределы данного атома.

В зависимости от энергии ионизирующего излучения будет возникать либо *эффект возбуждения*, либо *эффект ионизации* (рис. 2).

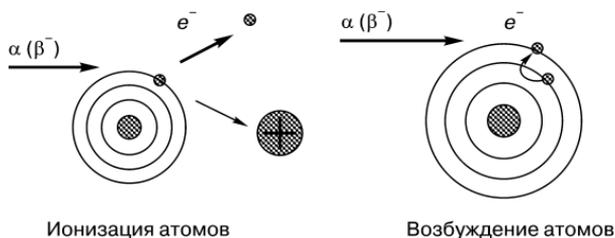


Рис. 2
Эффекты
ионизации и
возбуждения
атомов

Так, если воздействие будет слабее энергии связи электрона с ядром ($E_{\text{изл}} \leq E_{\text{св}}$), то электрон перейдет лишь с одного энергетического уровня на другой, более отдаленный от ядра атома. Такой атом остается нейтральным, однако он отличается от остальных нейтральных атомов этого химического элемента *избытком энергии*. Атомы, обладающие избытком энергии, называют *возбужденными*, а переход электронов с одного энергетического уровня на другой, более удаленный от ядра, — *процессом возбуждения*.

Поскольку в природе всякая система стремится перейти в положение, при котором ее энергия будет наименьшей, то и атом из возбужденного состояния возвращается в первоначальное. При этом электроны с внешних орбит переходят на внутренние с выделением избытка энергии в виде рентгеновского излучения с длиной волны, характерной для каждого энергетического уровня данного атома. Это рентгеновское излучение называют *характеристическим*.

Переходы электронов в пределах, наиболее удаленных от ядра, орбит дают оптический спектр, который состоит из ультрафиолетовых, световых и инфракрасных лучей.

При воздействии на электроны извне энергии, *превышающей энергию связи электронов с ядром* ($E_{\text{изл}} \geq E_{\text{св}}$), они вырываются из атома и удаляются за его пределы. Атом, лишившийся одного или нескольких электронов, превращается в положительно заряженный ион, а присоединивший к себе один или несколько электронов — в отрицательный. Следовательно, на каждый положительный ион образуется один отрицательный ион. Таким образом, возникает пара ионов.

Процесс образования ионов из нейтральных атомов называют *ионизацией*. Атом в состоянии иона существует в обычных условиях чрезвычайно короткий промежуток времени. 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.

Энергия, выделяющаяся при рекомбинации ионов, количественно примерно равна затраченной на ионизацию. Процесс ионизации атомов имеет важное практическое значение

для обнаружения и дозиметрии излучений, а также для понимания биологического действия ионизирующей радиации.

Ядро атома. Ядро атома состоит из двух типов частиц: протонов и нейтронов, связанных между собой огромными силами. Протоны и нейтроны имеют общее название нуклоны (ядерная частица от *греч.* nucleus — ядро); они в ядре могут превращаться друг в друга. Ядро атома имеет положительный заряд, носителем которого является протон. Положительный заряд ядра в атоме уравновешивается отрицательным зарядом электронов, вращающихся на разных орбитах атома (рис. 3).

Протон p — устойчивая элементарная частица с массой покоя, равной 1,00758 а. е. м. ($1,6725 \cdot 10^{-24}$ г), которая примерно в 1840 раз больше массы покоя электрона. Протон имеет один элементарный положительный электрический заряд, равный заряду электрона. Атом водорода представляет собой ядро, содержащее один протон, вокруг которого вращается один электрон. Если «сорвать» этот электрон, то оставшаяся часть атома и будет протоном. Поэтому протон часто определяют как ядро атома водорода.

Каждый атом любого элемента содержит в ядре определенное число протонов, которое постоянно и определяет в основном химические свойства элемента: так, в ядре атома серебра их 47, в ядре урана — 92. Число протонов в ядре Z называют атомным номером или зарядовым числом; оно соответствует порядковому номеру элемента в периодической системе Д. И. Менделеева.

Нейтрон n — электрически нейтральная частица, масса покоя которой равна 1,00898 а. е. м. ($1,6749 \times 10^{-24}$ г), т. е. она так же, как и у протона, примерно равна 1 а. е. м.

Вследствие своей электрической нейтральности нейтрон не отклоняется под действием магнитного поля,

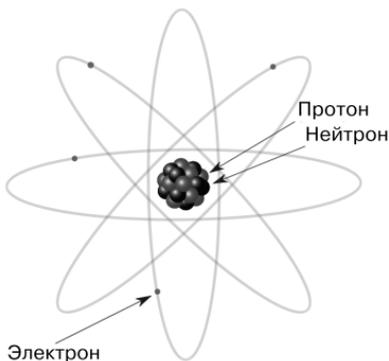


Рис. 3
Планетарная модель атома

не отталкивается атомным ядром и, следовательно, обладает большой проникающей способностью, что создает серьезную опасность как фактор биологического действия излучения. Число нейтронов, находящихся в ядре, дает в основном только физическую характеристику элемента, так как в разных ядрах одного и того же химического элемента может быть далеко не одинаковое число нейтронов (от одного до десяти).

В ядрах легких устойчивых элементов число протонов относится к числу нейтронов как 1:1. Чем дальше расположен элемент в периодической системе элементов Д. И. Менделеева (начиная с 21-го элемента — скандия), тем больше в его атомах число нейтронов по сравнению с протонами, тем более атом неустойчив. В самых тяжелых ядрах число нейтронов в 1,6 раза больше числа протонов. Например, ядро урана ^{238}U содержит 92 протона и 146 нейтронов (число нуклонов равно 238).

Диаметр ядра атома равен примерно $10^{-13} \dots 10^{-12}$ см и составляет 0,0001 диаметра всего атома. Однако практически вся масса атома (99,95...99,98%) сосредоточена в его ядре. Рассчитано, что если бы удалось получить 1 см³ чистого ядерного вещества, то масса его составила бы 100...200 млн тонн. Масса электронной оболочки незначительна, поэтому масса ядра почти совпадает с массой атома. В настоящее время массы атомов измерены с большой точностью (до шестого и седьмого десятичных знаков) с помощью современных масс-спектрометров.

Суммарное число протонов и нейтронов в ядре называют *массовым числом* и обозначают буквой A (или M). Число нейтронов N в ядре равно разности между массовым числом и атомным номером Z элемента: $N = A - Z$.

При обозначении атомов обычно пользуются символом элемента, которому принадлежит атом, и указывают слева вверху массовое число A , а внизу — атомный (порядковый) номер Z в форме индексов ${}^A_Z X$, где X — символ элемента. Например, ядро углерода ${}^{12}_6\text{C}$ содержит 12 нуклонов, из них 6 протонов; ядро натрия ${}^{23}_{11}\text{Na}$ имеет 23 нуклона, из них 11 протонов и т. д. Порядковый номер Z иногда опускают, так как символ элемента вполне определяет его место в периодической системе.

ПОНЯТИЕ ОБ ИЗОТОПАХ, ИЗОМЕРАХ, ИЗОБАРАХ И ИЗОТОНАХ

Большинство химических элементов в природе представлены в виде смеси атомов с разным числом нейтронов в их ядрах, но одинаковым количеством протонов.

Атомы с одинаковым числом протонов (т. е. с одинаковым зарядом Z), но различные по числу нейтронов, называют *изотопами* (*isos* — одинаковый, *topos* — место). Такие элементы имеют одинаковый номер в таблице Д. И. Менделеева, но разное массовое число A (рис. 4). Поскольку заряды ядер этих атомов одинаковые, электронные оболочки их имеют почти однотипное строение, а атомы с такими ядрами чрезвычайно близки по химическим свойствам и спектрам. Большинство (71 из 90) природных элементов представляет собой смесь 2...10 (для олова) изотопов. Причем обычно преобладает какой-то один изотоп, а остальные составляют доли процентов.

Например, природный калий состоит из трех изотопов: ${}_{19}^{39}\text{K} — 93,08\%$; ${}_{19}^{40}\text{K} — 0,0119\%$; ${}_{19}^{41}\text{K} — 6,91\%$.

Элементы, ядра которых имеют одинаковое массовое (A) и зарядовое (Z) число, но отличаются по уровню энергии, называют *изомерами*. Про изомер с избытком энергии говорят, что он находится в метастабильном состоянии. Символически такое состояние обозначают латинской буквой m , поставленной рядом с массовым числом (${}^{80m}\text{Br}$). Отдавая излишек энергии, метастабильный бром совершает изомерный переход в основное состояние.

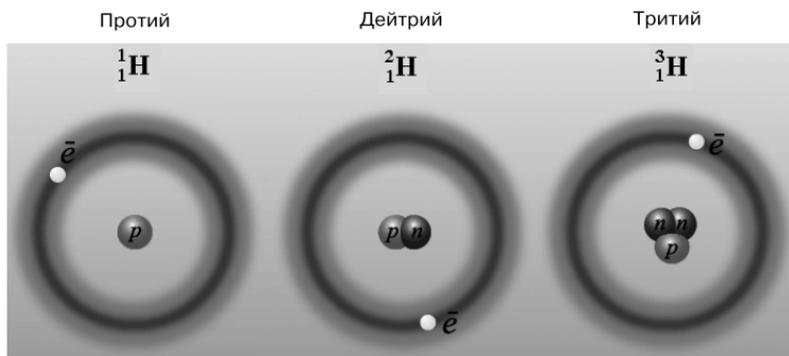


Рис. 4
Изотопы водорода

Например, при бомбардировке стабильного кобальта нейтронами образуется метастабильный радиоактивный кобальт, который совершает изомерный переход и превращается в радиоактивный кобальт с меньшей энергией и другим периодом полураспада:



В природе существуют атомные ядра разных элементов с одинаковым массовым числом (A), но с различным атомным номером (Z). Такие атомы называют *изобарами* (например, $^{40}_{18}\text{Ar}$, $^{40}_{19}\text{K}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$).

Атомные ядра разных элементов с равным количеством нейтронов называют *изотонами*, например $^{13}_6\text{C}$ и $^{14}_7\text{N}$. В ядрах углерода и азота по семь нейтронов, но разное количество протонов. Эти элементы разные по химическим, но близкие по физическим свойствам.

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ, ДЕФЕКТ МАССЫ

Если ядра атомов состоят только из нуклонов (протонов и нейтронов), то как объяснить устойчивость этих ядер? Казалось бы, одноименно заряженные протоны согласно закону Кулона, отталкиваясь друг от друга, должны были бы разлететься в разные стороны. Однако в действительности ядра атомов — очень прочные образования. Следовательно, внутри ядра должны действовать большие силы сцепления как между протонами и нейтронами, так и между одноименными частицами.

Расчеты показывают, что ими не могут быть гравитационные силы, действующие в соответствии с законом всемирного тяготения, так как их величина во много раз меньше сил электрического отталкивания протонов. Значит, *ядерные силы* представляют собой новый вид сил, природа которых изучена еще недостаточно.

Считают наиболее вероятным, что ядерные силы возникают в процессе непрерывного обмена между нуклонами особыми частицами (квантами ядерного поля), которые называют пи-мезонами или пионами.

Ядерные силы обладают зарядовой независимостью, т. е. силы взаимодействия разноименных зарядов примерно такие же, как и между одноименно заряженными частицами.

Ядерные силы короткодействующие. Они значительны только на очень малых расстояниях, сравнимых с поперечником самих ядерных частиц (10^{-13} см). С увеличением расстояния между ядерными частицами ядерные силы очень быстро уменьшаются и становятся практически равными нулю.

Ядерные силы обладают свойством насыщения, т. е. каждый нуклон взаимодействует только с ограниченным числом соседних нуклонов. Поэтому при увеличении числа нуклонов в ядре ядерные силы значительно ослабевают. Этим объясняется меньшая устойчивость ядер тяжелых элементов, в которых содержится значительное количество протонов и нейтронов.

Чтобы разделить ядро на составляющие его протоны и нейтроны и удалить их из поля действия ядерных сил, надо совершить работу, т. е. затратить энергию. Эту энергию называют *энергией связи ядра*. При образовании ядра из нуклонов выделяется энергия связи.

Если рассчитать массу ядра, например атома гелия, по формуле

$$m_{\text{я}} = m_p N_p + m_n N_n,$$

где $m_{\text{я}}$ — масса ядра; m_p — масса протона; N_p — число протонов; m_n — масса нейтрона; N_n — число нейтронов, то она будет равна

$$m_{\text{я}} = 1,0076 \cdot 2 + 1,0089 \cdot 2 = 4,033 \text{ а. е. м.}$$

Вместе с тем фактическая масса ядра гелия равна 4,003 а. е. м. Таким образом, фактическая масса ядра гелия оказывается меньше расчетной на величину 0,03 а. е. м. В этом случае говорят, что ядро имеет дефект массы (недостаток массы).

Разницу Δm между расчетной и фактической массой ядра называют *дефектом массы*.

Дефект массы показывает, насколько прочно связаны частицы в ядре, а также, сколько энергии выделилось при образовании ядра из отдельных нуклонов. Этот расчет можно

провести на основании уравнения взаимосвязи между массой и энергией, выведенного А. Эйнштейном:

$$E = mc^2,$$

где E — энергия, эрг; m — масса, г; c — скорость света, равная $3 \cdot 10^{10}$ см/с.

В соответствии с этим законом масса и энергия представляют собой разные формы одного и того же явления. Ни масса, ни энергия не исчезают, а при соответствующих условиях переходят из одного вида в другой, т. е. любому изменению массы Δm системы соответствует эквивалентное изменение ее энергии ΔE :

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

Учитывая, что $1 \text{ а. е. м.} = 1,6 \cdot 10^{-24}$ г, подсчитаем по этому уравнению энергию, которая выделится при образовании ядра гелия из отдельных нуклонов:

$$\Delta E = 0,03 \cdot 1,6 \cdot 10^{-24} (3 \cdot 10^{-10})^2 = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ эрг.}$$

Как уже отмечалось, в ядерной физике за единицу энергии принят электронвольт, поэтому энергию связи ядра можно выразить в электронвольтах, исходя из того, что энергетический эквивалент 1 а. е. м. составляет 931 МэВ :

$$\Delta E = 0,03 \cdot 931 = 27,93 \text{ МэВ} \approx 28 \text{ МэВ.}$$

Если бы существовал способ разделения ядра атома гелия на два протона и два нейтрона, то для этого потребовалось бы затратить не менее 28 МэВ энергии.

Среднюю энергию связи, приходящуюся на один нуклон, называют удельной энергией связи. Для гелия она составляет $28 : 4 = 7 \text{ МэВ}$. Следовательно, зная дефект массы, можно легко вычислить энергию связи ядра. Энергия связи ядер соразмерно возрастает с увеличением числа нуклонов, однако не строго пропорционально их числу.

Например, энергия ядра дейтерия составляет $2,2 \text{ МэВ}$, азота — $104,56$, а урана — 1800 МэВ . Если не считать самых легких ядер (дейтерий, тритий), то энергия связи на один нуклон составляет для всех ядер примерно 8 МэВ .

Для сравнения необходимо напомнить, что химическая энергия связи атомов в молекулах в расчете на один атом рав-

на нескольким электронвольтам (2...5 эВ). Именно этим объясняется, что ядерные реакции характеризуются в миллион раз большими энергиями, чем обычные химические реакции.

Таким образом, закон взаимосвязи массы и энергии показывает, откуда возникает та колоссальная энергия, которая выделяется при синтезе и делении ядер.

ЯВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ

В конце прошлого столетия были сделаны два крупнейших открытия. В 1895 г. В. Рентген обнаружил лучи, которые возникали при пропускании тока высокого напряжения через стеклянный баллон с разреженным воздухом, а в 1896 г. А. Беккерель открыл явление радиоактивности. Беккерель обнаружил, что соли урана самопроизвольно испускают невидимые лучи, вызывающие почернение фотопластинки и флуоресценцию некоторых веществ.

В 1898 г. Пьер Кюри и Мария Складовская-Кюри открыли еще два элемента — полоний и радий, которые давали подобные излучения, но интенсивность их во много раз превышала интенсивность излучения урана. Впоследствии были установлены свойства этих излучений и определена их природа. Кроме того, было обнаружено, что радиоактивные вещества непрерывно выделяют энергию в виде теплоты.

Явление самопроизвольного излучения было названо радиоактивностью, а вещества, испускающие излучения, — радиоактивными (от *лат.* *radius* — луч и *activus* — действенный).

Радиоактивность — это свойство атомных ядер определенных химических элементов самопроизвольно (т. е. без каких-либо внешних воздействий) превращаться в ядра других элементов с испусканием особого рода излучения, называемого радиоактивным.

Само явление называется *радиоактивным распадом*. Таким образом, радиоактивность является исключительно свойством атомного ядра и зависит только от его внутреннего состояния. Нельзя повлиять на течение процесса радиоактивного распада, не изменив состояния атомного ядра. На скорость течения радиоактивных превращений не оказывают никакого воздействия изменения температуры и давления, наличие

электрического и магнитного полей, вид химического соединения данного радиоактивного элемента и его агрегатное состояние.

Радиоактивные явления, происходящие в природе, называют *естественной радиоактивностью*; аналогичные процессы, происходящие в искусственно полученных веществах (через соответствующие ядерные реакции), — *искусственной радиоактивностью*. Однако деление это условно, так как оба вида радиоактивности подчиняются одним и тем же законам.

ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ СЕМЕЙСТВА

Впервые естественная радиоактивность была обнаружена в 1986 г. французским ученым Анри Беккерелем, который показал, что соли урана самопроизвольно испускают лучи, способные, подобно рентгеновским лучам, проходить через черную бумагу и засвечивать фотопластинку.

В условиях нашей солнечной системы и Земли стабильные и естественно-радиоактивные изотопы образовались очень давно, несколько миллиардов лет назад, и продолжают образовываться вследствие радиоактивного распада и под влиянием космического излучения.

Радиоактивные элементы распространены в природе в ничтожных количествах. Они содержатся в твердых породах земной коры, в воде, воздухе, а также в растительных и животных организмах, в которые они попадают из окружающей среды. В земной коре естественно-радиоактивные элементы есть преимущественно в урановых рудах, и почти все они являются изотопами тяжелых элементов с атомным номером более 83.

Ядра тяжелых элементов неустойчивы. Они претерпевают в ряде случаев многократные последовательные ядерные превращения. В результате возникает целая цепочка радиоактивных распадов, в которой изотопы оказываются генетически связанными между собой.

Такая цепочка — совокупность всех изотопов ряда элементов, возникающих в результате последовательных радиоактивных превращений из одного материнского элемента, —

называется *радиоактивным семейством или рядом*. Семейства названы по первым элементам, с которых начинаются радиоактивные превращения, т. е. по их родоначальникам.

В настоящее время известно три естественно-радиоактивных семейства: урана–радия (${}_{92}^{238}\text{U-Ra}$), урана–тория (${}_{90}^{232}\text{Th}$) и урана–актиния (${}_{89}^{235}\text{Ac}$).

Исходный элемент семейства урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ в результате 14 последовательных радиоактивных превращений (8 α - и 6 β -распадов) переходит в устойчивый изотоп свинца ${}_{82}^{206}\text{Pb}$. Поскольку это семейство включает в себя важный радиоактивный элемент — радий, а также продукты его распада, то оно часто обозначается как семейство *урана–радия*.

Родоначальник семейства тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$ путем 10 последовательных превращений (6 α - и 4 β -распадов) переходит в стабильный изотоп свинца ${}_{82}^{208}\text{Pb}$.

Родоначальником семейства актиния является изотоп урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, который раньше называли актиноураном AcU , так как среди членов ряда имеется изотоп актиния ${}_{89}^{227}\text{Ac}$. Путем 11 превращений (7 α - и 4 β -распадов) ${}_{92}^{235}\text{U}$ переходит в стабильный изотоп свинца ${}_{82}^{206}\text{Pb}$.

Родоначальники всех семейств являются долгоживущими изотопами. Период полураспада у них порядка $10^8 \dots 10^{10}$ лет.

Немаловажным *естественным радионуклидом* является ${}^{40}\text{K}$. Он находится во всех живых тканях. Например, в человеке массой 70 кг содержится 140 г естественных изотопов калия, среди которых и K-40 , который создает годовую дозу — 0,18 мЗв.

Естественными источниками радиоактивности внеземного происхождения являются *радионуклиды* ${}^{14}\text{C}$ и ${}^3\text{H}$. Они непрерывно образуются в космосе в результате ядерных реакций и создают годовую дозу облучения — 0,015 мЗв.

Таким образом, естественные радиоактивные элементы условно можно разделить на три группы:

- входящие в состав радиоактивных семейств, родоначальниками которых являются уран, торий и актиноуран;
- не входящие в состав радиоактивных семейств (K-40 , Ca-48 , и др.);
- элементы, непрерывно возникающие под действием космических лучей (C-14 , H-3).

ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Радиоактивное излучение невидимо. Оно обнаруживается с помощью различных явлений, происходящих при его действии на вещество (свечение люминофоров или флуоресцирующих экранов, ионизация вещества, почернение фотоэмульсии после проявления и т. п.). Характер испускаемого радиоактивными веществами излучения изучен как по поглощению его в веществе, так и по отклонению этих лучей в электрическом и магнитном полях. Было обнаружено, что радиоактивное излучение в поперечном магнитном поле разделяется обычно на три пучка (рис. 5). Пока не была выяснена природа этих излучений, лучи, отклоняющиеся к отрицательно заряженной пластинке, условно были названы альфа-лучами, отклоняющиеся к положительно заряженной пластинке — бета-лучами, а лучи, которые совсем не отклонялись, были названы гамма-лучами. Такое разделение радиоактивного излучения в электрическом поле позволило установить, что только гамма-лучи представляют собой истинные лучи, так как они даже в сильном электрическом или

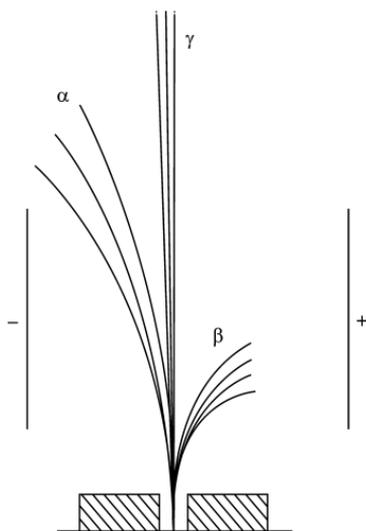


Рис. 5

Разделение радиоактивного излучения в магнитном поле

магнитном поле не отклоняются; альфа- и бета-лучи являются заряженными частицами и способны отклоняться (табл. 1).

Альфа-частицы (α-частицы) представляют собой ядра атомов гелия и состоят из двух протонов и двух нейтронов; они имеют двойной положительный заряд ($2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10} = 9,6 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ) и относительно большую массу, равную 4,003 а. е. м.

Масса этих частиц превышает массу электрона в 7300 раз; энергия их колеблется в пределах 2...11 МэВ. Для каждого данного изотопа энергия альфа-частиц постоянна. В спек-

Таблица 1

Сравнительная характеристика α -, β - и γ -излучения

Характеристика излучения	Вид излучения		
	α	β	γ
Природа	Поток положительно заряженных частиц (дважды ионизированных атомов гелия)	Электроны или позитроны ядерного происхождения	Электromагнитное излучение ядерного происхождения
Масса покоя	4,003 а. е. м	0,000548 а. е. м	0
Заряд	«+» = 4,8 \cdot 10 ¹⁰ абс. эл. стат. ед. ед. \cdot 2 = 9,6 \cdot 10 ¹⁰	«+» и «-» = 4,8...10 ¹⁰ абс. эл. стат. ед.	0
Скорость движения	Примерно 2000000000 см/с или 0,08 скор. света	2,9...10 ¹⁰ см/с	3,0...10 ¹⁰ см/с
Путь пробега	В воздухе — 2...11 см; в биологических тканях — 5...100 микрон	В воздухе — 2,0...25 м; в биологических тканях — 0,8 см	В воздухе — 150 м; в биологических тканях — примерно такой же
Способность к ионизации	250 тыс. пар ионов (высокая)	1000...25 000 пар ионов (высокая)	10...250 пар ионов (низкая)
Распределение энергии	Одинаковый уровень энергии (монохромный)	Различный уровень энергии от 0 до max (сплошной спектр)	Различный уровень энергии (линейчатый спектр)

тре альфа-излучения очень незначительный процент короткопробежных и длиннопробежных частиц, поэтому альфа-излучение считают монохроматическим. Пробег альфа-частиц в воздухе составляет в зависимости от энергии 2...10 см, в биологических тканях — несколько десятков микрометров.

Так как альфа-частицы массивны и обладают сравнительно большой энергией, путь их в веществе прямолинеен; они вызывают сильно выраженные эффекты ионизации и возбуждения.

В воздухе на 1 см пути альфа-частица образует 10...25 тыс. пар ионов. Поэтому альфа-излучатели при попадании в организм крайне опасны для человека и животных. Вся

энергия альфа-частиц передается клеткам организма, что наносит им вред.

Бета-частицы (β-частицы) представляют собой поток частиц (электроны или позитроны) ядерного происхождения. Позитрон — элементарная частица, подобная электрону, но с положительным знаком заряда. Физическая характеристика электронов ядерного происхождения (масса, заряд) такая же, как и у электронов атомной оболочки. Бета-частицы обозначаются символом β^- или e^- , β^+ или e^+ .

В отличие от альфа-частиц, бета-частицы одного и того же радиоактивного элемента обладают различным запасом энергии (от нуля до некоторого максимального значения). Это объясняется тем, что при бета-распаде из атомного ядра одновременно с бета-частицей вылетают нейтрино⁴.

Энергия, освобождаемая при каждом акте распада, распределяется между бета-частицей и нейтрино. Если бета-частица вылетает из ядра с большим запасом энергии, то нейтрино испускается с малым уровнем энергии, и наоборот. Поэтому энергетический спектр⁵ бета-излучения *сплошной*, или *непрерывный*.

Средняя энергия бета-частиц в спектре равна примерно 1/3 их максимальной энергии. Максимальную энергию обозначают $E_{\text{макс}}$, среднюю — $E_{\text{ср}}$ (рис. 6).

Поскольку бета-частицы одного и того же радиоактивного элемента имеют различный запас энергии, то величина их пробега в одной и той же среде будет неодинаковой. Путь бета-частиц в веществе извилист, так как, имея крайне малую массу, они легко изменяют направление движения под действием электрических полей встречных атомов. Бета-излучение обладает меньшим эффектом ионизации, чем альфа-излучение. Оно образует 50...100 пар ионов на 1 см пути в воздухе и имеет «рассеянный тип ионизации».

⁴ *Нейтрино* — это электронейтральная частица, которая движется со скоростью света, имеет массу покоя и обладает большой проникающей способностью; зарегистрировать ее очень трудно. Частица, испускаемая вместе с позитроном (β^+), названа нейтрино (ν^+), вместе с электроном (β^-) — антинейтрино (ν^-).

⁵ Распределение частиц по энергиям называется спектром радиоактивного излучения.

Пробег бета-частиц в воздухе может составлять в зависимости от энергии до 25 м, в биологических тканях — до 1 см. Скорость движения бета-частиц в вакууме равна $1 \cdot 10^{10} \dots 2,9 \cdot 10^{10}$ см/с (0,3...0,99 скорости света).

Различные радиоактивные изотопы значительно отличаются друг от друга по уровню энергии бета-частиц. Максимальная энергия бета-частиц различных элементов имеет широкие пределы — от 0,015...0,05 МэВ (мягкое бета-излучение) до 3...12 МэВ (жесткое бета-излучение).

Гамма-излучение (γ) представляет собой поток электромагнитных волн, так же как радиоволны, видимый свет, ультрафиолетовые и инфракрасные лучи, рентгеновское излучение.

Различные виды электромагнитного излучения отличаются условиями образования и определенными свойствами (длиной волны, энергией).

Рентгеновское излучение возникает при торможении электронов в электрическом поле ядер атомов вещества (тормозное рентгеновское излучение) или при перестройке электронных оболочек атомов при ионизации и возбуждении атомов и молекул (характеристическое рентгеновское излучение). При различных переходах атомов и молекул из возбужденного состояния в невозбужденное может происходить испускание видимого света, инфракрасных и ультрафиолетовых лучей.

Гамма-кванты — это излучение ядерного происхождения. Они испускаются ядрами атомов при альфа- и бета-распаде природных и искусственных радионуклидов в тех случаях, когда в дочернем ядре оказывается избыток энергии, не захваченный корпускулярным излучением (альфа- и бета-частицей). Этот избыток мгновенно высвечивается в виде гамма-квантов.

Гамма-кванты лишены массы покоя. Это значит, что фотоны существуют только в движении. Они не имеют заряда

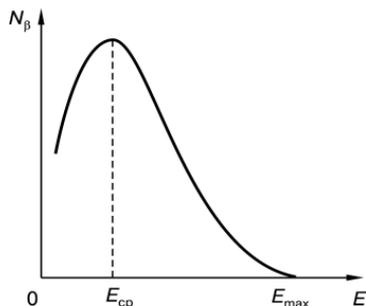


Рис. 6
Распределение β -частиц по энергиям:

N_β — число β -частиц; E — их энергия.

и поэтому в электрическом и магнитном полях не отклоняются. В веществе и вакууме гамма-лучи распространяются прямолинейно и равномерно во все стороны от источника. Скорость распространения их в вакууме равняется скорости света ($3 \cdot 10^{10}$ см/с).

Энергия гамма-кванта E_γ пропорциональна частоте колебаний и определяется по формуле

$$E_\gamma = h\nu,$$

где h — универсальная постоянная Планка, или энергетический эквивалент ($6,62 \cdot 10^{27}$ эрг/с, или $4,13 \cdot 10^{21}$ МэВ/с); ν — частота колебаний, с^{-1} .

Частота колебаний гамма-квантов связана с длиной их волны. Чем больше длина волны, тем меньше частота колебаний, и наоборот, т. е. частота колебаний обратно пропорциональна длине волны. Чем меньше длина волны и больше частота колебаний излучения, тем больше его энергия и, следовательно, проникающая способность. Энергия гамма-излучения естественных радиоактивных элементов колеблется от нескольких килоэлектронвольт до 2...3 МэВ и редко достигает 5...6 МэВ.

Гамма-излучатели редко имеют однозначную энергию квантов (моноэнергетический или монохроматический спектр). В состав потока гамма-излучения чаще входят кванты различной энергии. Однако «набор» их для каждого изотопа постоянен и образует линейчатый спектр излучения.

Примером моноэнергетического гамма-излучателя может служить ^{137}Cs . При изомерном переходе его дочернего ядра ^{137}Ba высвечиваются кванты с энергией 0,661 МэВ. Линейчатый спектр излучения наблюдается при распаде изотопа йода (^{131}I), когда высвечиваются пять групп квантов с энергиями 0,08; 0,163; 0,364; 0,637 и 0,722 МэВ. Бром (^{82}Br) излучает 11 групп гамма-квантов с энергиями в пределах 0,248...1,453 МэВ, а кадмий (^{115}Cd) — 13 групп от 0,335 до 1,28 МэВ.

Гамма-кванты, не имея заряда и массы покоя, вызывают слабое ионизирующее действие, но обладают большой проникающей способностью. Путь пробега в воздухе достигает 100...150 м.

ТИПЫ ЯДЕРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Ядра атомов устойчивы, но изменяют свое состояние при нарушении определенного соотношения протонов и нейтронов. В легких ядрах должно быть примерно поровну протонов и нейтронов. Если в ядре слишком много протонов или нейтронов, то такие ядра неустойчивы и претерпевают самопроизвольные радиоактивные превращения, в результате которых изменяется состав ядра и, следовательно, ядро атома одного элемента превращается в ядро атома другого элемента. При этом процессе ядра испускают радиоактивные излучения.

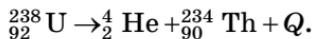
Существуют следующие типы ядерных превращений, или видов радиоактивного распада: альфа-распад, бета-распад (электронный, позитронный), электронный захват, внутренняя конверсия.

Альфа-распад. Сопровождается испусканием из ядра неустойчивого элемента — альфа-частицы, представляющей собой ядро атома гелия. При вылете альфа-частицы ядро теряет два протона и два нейтрона и превращается в другое ядро, в котором число протонов (заряд ядра) уменьшено на 2, а число частиц (массовое число) — на 4. Следовательно, при радиоактивном распаде в соответствии с правилом смещения (сдвига), сформулированным Фаянсом и Содди (1913), образующийся при альфа-распаде элемент (дочерний) смещен влево относительно исходного (материнского) на две клетки периодической системы Д. И. Менделеева.

Процесс альфа-распада можно представить так:



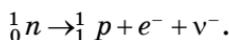
где X — символ исходного ядра; Y — символ ядра дочернего элемента; Q — освобожденный избыток энергии. Например,



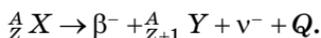
Альфа-распад — достаточно распространенное ядерное превращение тяжелых ядер; в настоящее время известно более 160 альфа-активных видов ядер. Ядра с порядковым номером больше 82 ($Z = 82$ для Pb), за редким исключением, альфа-активны, а с Z , меньшим 82, стабильны по отношению к альфа-распаду.

Бета-распад. Ряд естественных и искусственных радиоактивных элементов претерпевают распад с испусканием электронов. У некоторых искусственных радиоактивных изотопов наблюдается распад с испусканием позитронов. Электроны и позитроны, испускаемые ядрами, называют бета-частицами или бета-излучением, а сами ядра — бета-активными. Из-за сходства между электронным и позитронным распадом эти два вида распада называют бета-распадом.

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:

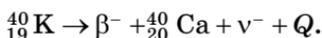


Электронный распад описывают уравнением

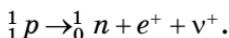


При этом распаде заряд ядра и соответственно атомный номер элемента увеличиваются на единицу (т. е. дочерний элемент сдвинут в периодической системе Д. И. Менделеева на один номер вправо от исходного), а массовое число остается без изменения.

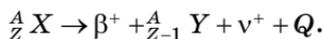
Электронный бета-распад характерен для многих естественных и искусственно полученных радиоактивных элементов. Примером бета-распада может служить распад изотопа калия с превращением его в кальций:



Если неблагоприятное соотношение нейтронов и протонов в ядре обусловлено избытком 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:



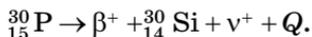
Позитронный распад можно описать уравнением



Заряд ядра и соответственно атомный номер элемента уменьшаются на единицу, и дочерний элемент будет зани-

мать место в периодической системе Д. И. Менделеева на один номер влево от материнского; массовое число остается без изменения.

Позитронный распад наблюдается у некоторых искусственно полученных изотопов. Например, распад изотопа фосфора с образованием кремния



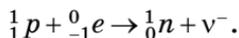
Позитрон, вылетев из ядра, срывает с оболочки атома «лишний» электрон или взаимодействует со свободным электроном, образуя пару «позитрон–электрон», которая мгновенно превращается в два гамма-кванта с энергией, эквивалентной массе частиц (e^+ и e^-).

Процесс превращения пары позитрон–электрон в два гамма-кванта получил название *аннигиляции* (уничтожения), а возникающее электромагнитное излучение — *аннигиляционно*. В данном случае происходит превращение одной формы материи (частиц вещества) в другую — гамма-фотоны. Это подтверждается существованием обратной реакции — реакции образования пары, при которой гамма-фотон, имеющий достаточно высокую энергию, пролетая через вещество, под действием сильного электрического поля вблизи ядра атома превращается в пару электрон–позитрон.

Таким образом, при позитронном распаде в конечном результате за пределы материнского атома вылетают не частицы, а два гамма-кванта, каждый из которых обладает энергией в 0,511 МэВ, равной энергетическому эквиваленту массы покоя частиц — позитрона и электрона:

$$E = 2m_e c^2 = 0,511 \text{ МэВ}.$$

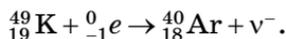
Электронный захват. Превращение ядра может быть осуществлено путем электронного захвата, когда один из протонов ядра захватывает электрон с одной из оболочек атома, чаще всего с ближайшего к нему *K-слоя* или реже (примерно в 100 раз) с *1-слоя*, и превращается в нейтрон. Такой процесс называют электронным *K-* или *L-*захватом. Протон превращается в нейтрон согласно следующей реакции:



Порядковый номер нового ядра становится на единицу меньше порядкового номера исходного ядра, а массовое число не меняется. Дочерний элемент в периодической системе элементов Д. И. Менделеева отстоит на одну клетку влево от материнского. Превращение ядер при K -захвате записывают в следующем виде:



Например,

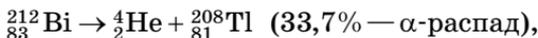


Освободившееся место, которое занимал в K - или L -слое захваченный электрон, заполняется электроном из более удаленных от ядра слоев оболочки атома. Избыток энергии, освободившейся при таком переходе, испускается атомом в виде характеристического рентгеновского излучения. Атом по-прежнему сохраняет электрическую нейтральность, так как количество протонов в ядре при электронном захвате уменьшается на единицу.

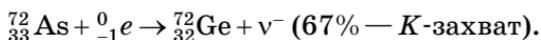
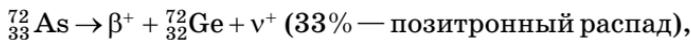
Позитронный распад и электронный захват, как правило, наблюдают только у искусственно-радиоактивных изотопов.

Некоторые ядра могут распадаться двумя или тремя способами: путем альфа- и бета-распадов и через K -захват, сочетанием трех типов распада. В таких случаях превращения осуществляются в строго определенном соотношении.

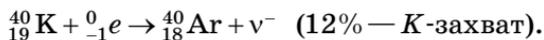
Например,



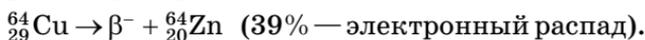
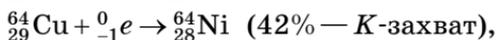
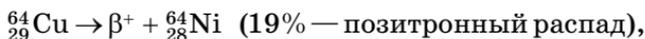
или



Естественный долгоживущий радиоизотоп калия (${}^{40}_{19} K$; $T = 1,49 \cdot 10^9$ лет), количество которого в смеси нерадиоактивного калия (${}^{39}_{19} K$) составляет 0,0119%, подвергается электронному распаду и K -захвату:



У изотопа меди ${}_{29}^{64}\text{Cu}$ превращение в никель осуществляется путем позитронного распада и K -захвата, а в цинк — путем электронного распада:



Внутренняя конверсия. Возбужденное (в результате того или иного ядерного превращения) состояние ядра атома свидетельствует о наличии в нем избытка энергии. В состоянии с меньшей энергией (нормальное состояние) возбужденное ядро может переходить не только путем излучения гамма-кванта или выбрасывания какой-либо частицы, но и путем внутренней конверсии, или конверсии с образованием электронно-позитронных пар.

*Явление внутренней конверсии состоит в том, что ядро передает энергию возбуждения одному из электронов внутренних слоев (K -, L - или M -слой), который в результате этого удаляется (вырывается) за пределы атома. Такие электроны получили название *электронов внутренней конверсии*.*

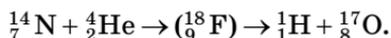
Следовательно, испускание электронов конверсии обусловлено непосредственным электромагнитным взаимодействием ядра с электронами оболочки. Конверсионные электроны имеют линейчатый спектр энергии, в отличие от электронов бета-распада, дающих сплошной спектр.

Если энергия возбуждения превосходит 1,022 МэВ, то переход ядра в нормальное состояние может сопровождаться излучением пары электрон–позитрон с последующей их аннигиляцией (см. Позитронный распад).

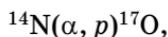
После того как произошла внутренняя конверсия, в электронной оболочке атома появляется «вакантное» место вырванного электрона конверсии. Один из электронов с более отдаленных слоев (с более высоких энергетических уровней) осуществляет квантовый переход на «вакантное» место с испусканием характеристического рентгеновского излучения.

ИСКУССТВЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР

Впервые искусственное превращение ядра осуществил Э. Резерфорд в 1919 г. При изучении взаимодействия альфа-частиц с ядрами азота он выявил случаи, когда альфа-частица, попадая в атомное ядро, остается в нем, выбивая протон. При этом стабильный изотоп азота ${}^1_7\text{N}$ превращается в изотоп кислорода ${}^{17}_8\text{O}$ согласно следующей реакции:



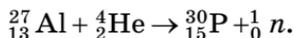
При написании ядерных реакций используют сокращенную форму записи:



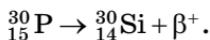
т. е. вначале пишут символ облучаемого элемента (ядро-мишень), затем в скобках указывают первой бомбардирующую частицу, второй — частицу или квант, вылетающие из ядра; после скобки указывают символ изотопа, продукта ядерной реакции. Проникновение альфа-частицы в ядро азота приводит к образованию неустойчивого ядра фтора, которое сразу же превращается в ядро кислорода с испусканием протона.

Искусственные преобразования ядер были осуществлены и на других элементах. В 1934 г. И. Кюри и Ф. Жолио-Кюри обнаружили, что при бомбардировке алюминия, магния и бора альфа-частицами полония эти элементы сами становятся на некоторое время радиоактивными, о чем можно судить по испускаемому излучению. Этот процесс происходит следующим образом: альфа-частицы, проникая в ядра бомбардируемых атомов, вызывают коренную перестройку атомного ядра, сопровождающуюся выделением нейтронов и увеличением числа протонов. В результате образуются атомные ядра новых элементов.

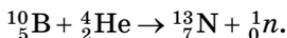
Образование новых элементов было подтверждено химическим анализом. Установлено, что бор превращается в один из изотопов азота, а алюминий — в один из изотопов фосфора, которые оказываются радиоактивными. Эти реакции могут быть записаны следующим образом:



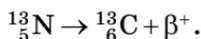
Затем радиоактивный изотоп фосфора ^{30}P , возникший из стабильного ядра алюминия, распадается, превращаясь в устойчивый элемент кремния с выделением позитрона:



При бомбардировке бора происходит следующая реакция:



Радиоизотоп азота распадается также с выделением позитрона:



Эти ядерные реакции были первыми, в которых по воле человека создавались новые, ранее не существовавшие радиоактивные изотопы. Так была открыта искусственная радиоактивность и положено начало получению искусственных радиоизотопов практически всех элементов периодической системы.

Отметим, что И. Кюри и Ф. Жолио-Кюри открыли не только искусственную радиоактивность, но и новый вид радиоактивного распада — позитронный распад, который не наблюдается у естественных радиоактивных элементов. В настоящее время радиоактивные изотопы можно получить при разнообразных ядерных реакциях с использованием в качестве бомбардирующих ядерных частиц протонов, дейтронов и нейтронов, а также гамма-квантов.

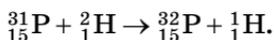
Сущность *ядерных реакций* состоит в том, что ядра — мишени стабильных атомов, подвергаясь бомбардировке элементарными частицами, захватывают их и получают дополнительную энергию (кинетическую энергию частиц-снарядов). В результате образуется составное ядро с избытком энергии (возбужденное ядро). Переход ядра из возбужденного состояния в стабильное осуществляется путем излучения избыточной энергии в виде альфа-, бета-частиц и гамма-квантов, т. е. происходит процесс радиоактивного распада.

При использовании протонов, дейтронов и альфа-частиц в качестве частиц-снарядов ядерная реакция (проникновение их в ядро) идет с большим трудом, так как все они имеют положительный заряд и отталкиваются от ядра в результате действия кулоновских сил. Чтобы частицы-снаряды проникли в положительно заряженное ядро, они должны иметь

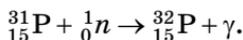
большую кинетическую энергию. В связи с этим были сконструированы приборы для разгона заряженных частиц в сильном электрическом поле. Такие приборы получили общее название ускорителей (линейные ускорители, циклотроны, бетатроны и фазотроны).

Особенно удачной бомбардирующей частицей для ядерных превращений оказались свободные нейтроны, получаемые обычно в атомных реакторах. Обладая достаточной массой и не имея заряда, они не отталкиваются ядром, а беспрепятственно взаимодействуют с ним, преобразуя ядро-мишень стабильного элемента в радиоактивный изотоп. При бомбардировке ядра-мишени стабильного элемента всеми вышеуказанными частицами происходит или превращение одного элемента в другой (трансмутация элементов), или же образуется изотоп исходного элемента. В ряде случаев один и тот же радиоактивный изотоп может быть получен при использовании различных ядерных реакций. Например, изотоп фосфора $^{31}_{15}\text{P}$ можно получить при помощи следующих реакций.

1. При взаимодействии природного фосфора $^{31}_{15}\text{P}$ и ядра тяжелого водорода (дейтерия) — дейтрона:

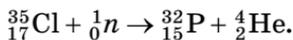


2. При бомбардировке природного фосфора медленными нейтронами:



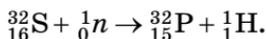
При этой реакции происходит захват нейтрона, причем ядро теряет часть избыточной энергии в форме γ -квантов. Эта реакция получила название *реакции радиационного захвата* или реакции активации. Отметим, что реакция активации возникает при столкновении потока медленных нейтронов со стабильными ядрами, которые захватывают их и превращаются в собственный радиоактивный изотоп. Именно такая реакция активации наблюдается у стабильных элементов крови и других тканей при нейтронном облучении животных, вызывая *наведенную радиоактивность организма*.

3. При бомбардировке хлора нейтронами:



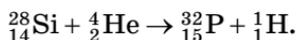
При этой реакции нейтрон выбивает из ядра альфа-частицу, что приводит к уменьшению его заряда на две единицы и образованию радиоизотопа фосфора.

4. При воздействии на стабильный изотоп серы медленными нейтронами:

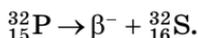


В данном случае нейтрон выбивает из ядра протон, образуя ядро радиоизотопа фосфора.

5. При бомбардировке кремния альфа-частицами также образуется радиофосфор:



Известны и другие ядерные реакции получения фосфора ${}_{15}^{32}\text{P}$. Однако каким бы способом ни был получен радиоизотоп фосфора, он распадается и превращается в серу, испуская при этом бета-частицу:



Создание ускорителей, а также использование нейтронов в ядерных реакторах расширили возможности получения искусственных радиоактивных изотопов, которые нашли широкое применение в биологии, медицине, ветеринарии, а также в других отраслях науки и практики.

ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Количество любого радиоактивного изотопа со временем уменьшается вследствие радиоактивного распада (превращения ядер). Скорость распада определяется строением ядра, и поэтому нельзя повлиять на этот процесс никакими обычными физическими или химическими способами, не изменив состояния атомного ядра. 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 распадается в единицу времени. Постоянную распада выражают в обратных

единицах времени: с^{-1} , мин^{-1} , ч^{-1} и т. д., чтобы показать, что количество радиоактивных ядер не растет, а убывает.

Величину, обратную постоянной распада ($\tau = 1/\lambda$), называют *средней продолжительностью жизни ядра*.

Основной закон радиоактивного распада устанавливает, что *за единицу времени распадается всегда одна и та же доля имеющихся в наличии ядер*. Математически закон радиоактивного распада выражается уравнением

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_t — число радиоактивных ядер, оставшихся по прошествии времени t ; N_0 — исходное число радиоактивных ядер в момент времени $t = 0$ ($N_0 > N_t$); e — основание натуральных логарифмов ($e = 2,72$); λ — постоянная радиоактивного распада; t — время.

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

Для характеристики скорости распада радиоактивных элементов в практике пользуются вместо постоянной распада периодом полураспада.

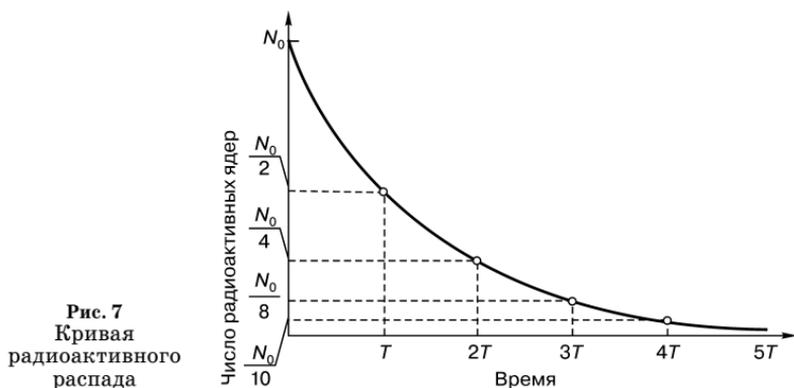
Период полураспада — это время, в течение которого распадается половина исходного количества радиоактивных ядер. Он обозначается буквой T и выражается в единицах времени.

Для различных радиоактивных изотопов период полураспада имеет значения от долей секунды до миллиардов лет. Причем у одного и того же элемента могут быть изотопы с различными периодами полураспада. Соответственно и радиоактивные элементы разделяются на короткоживущие (часы, дни) и долгоживущие (годы).

Связь между периодом полураспада и постоянной распада легко выводится из уравнения закона радиоактивного распада $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$. Если в это выражение подставить $t = T$ и $N_t = N_0/2$, то получим $N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T}$. Сократив N_0 и взяв натуральный логарифм, получим $\lambda T = \ln 2$, т. е. $\lambda T = 0,693$, откуда

$$\lambda = 0,693/T; \quad T = 0,693/\lambda.$$

Это соотношение показывает, что между постоянной распада и периодом полураспада имеется обратная зависи-



мость, т. е. чем больше значение λ , тем меньше значение T , и наоборот. Заменяя λ в формуле ее значением, получим $N_t = N_0 e^{0,693t/T}$.

Таким образом, число ядер радиоактивного изотопа уменьшается со временем по экспоненциальному закону (рис. 7). Как видно из рисунка, с увеличением числа периодов полураспада число не распавшихся атомов убывает, постепенно приближаясь к нулю.

Особенность радиоактивного распада состоит в том, что ядра одного и того же элемента распадаются не все сразу, а постепенно, в различное время. Момент распада каждого ядра не может быть предсказан заранее. Поэтому распад любого радиоактивного элемента подчиняется статистическим закономерностям, носит вероятностный характер и может быть математически определен для большого количества радиоактивных атомов.

Иными словами, *распад ядер происходит неравномерно* — то большими, то меньшими порциями. Из этого следует практический вывод, что при одном и том же времени измерения числа импульсов от радиоактивного препарата мы можем получить разные значения. Следовательно, для получения верных данных необходимо измерения одной и той же пробы проводить не один, а несколько раз, и чем больше, тем точнее будут результаты. Однако при определении радиоактивности короткоживущих препаратов будут возникать другие ошибки. Во избежание этого необходимо правильно выбрать время счета (таблица Бэлла и др.).

АКТИВНОСТЬ РАДИОАКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА И ЕДИНИЦЫ АКТИВНОСТИ

Количество радиоактивного вещества обычно определяют не единицами массы (грамм, миллиграмм и т. п.), а *активностью* данного вещества, которая равна числу распадов в единицу времени. Чем больше радиоактивных превращений испытывают атомы данного препарата в секунду, тем больше его активность.

Таким образом, *активность радиоактивного вещества — это физическая величина, характеризующая число распадов в единицу времени.*

Активность *характеризует абсолютную скорость распада* данного изотопа и обозначается буквой A .

Как следует из закона радиоактивного распада, *активность радионуклида пропорциональна числу радиоактивных атомов*, т. е. возрастает с увеличением количества данного вещества. Поэтому активность любого радиоактивного препарата по истечении времени t можно определить 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; T — период полураспада; значения T и t должны иметь одинаковую размерность (минуты, часы, сутки и т. д.).

Поскольку скорость распада разных радионуклидов различна, то одинаковые по массе их количества будут иметь различную активность. Так, если взять радионуклиды ^{235}U , ^{32}P и ^8Li одинаковой массы, но с различными периодами полураспада ($4,5 \cdot 10^9$ лет, 14,3 дня и 0,89 с соответственно), то самая высокая активность будет у лития и фосфора и очень малая у урана, так как наибольшее число распадов в 1 с будет у первых двух изотопов.

Радиоактивность измеряется как в системных, так и в несистемных единицах. Единицей активности *в системе единиц (СИ) служит Беккерель (Бк)*. В ранее опубликованных работах часто встречаются и внесистемные единицы, поэтому здесь мы приводим и те и другие.

Беккерель — это такая активность радионуклида, при которой в нем за 1 с происходит 1 акт распада: $1\text{Бк} = 1\text{ расп/с} = 1\text{с}^{-1}$.

Наиболее распространенной внесистемной международной единицей до введения системы Си являлась единица Кюри (Ки).

Кюри — это такое количество любого радиоактивного вещества, в котором число радиоактивных распадов в секунду равно $3,7 \cdot 10^{10}$. Единица Кюри соответствует радиоактивности 1 г радия.

Кюри очень большая величина, поэтому обычно употребляют дробные производные единицы: милликюри ($1\text{мКи} = 10^{-3}\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^7\text{ расп/с}$); микрокюри ($1\text{мкКи} = 10^{-6}\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^4\text{ расп/с}$); нанокюри ($1\text{нКи} = 10^{-9}\text{Ки} = 3,7 \cdot 10\text{ расп/с}$); пикокюри ($1\text{пКи} = 10^{-12}\text{Ки} = 0,037\text{ расп/с}$).

На практике часто пользуются числом распадов в минуту. Тогда единица радиоактивности Кюри и дробные производные от нее принимают следующие значения: $1\text{Ки} = 2,22 \cdot 10^{12}\text{ расп/мин}$; $1\text{мКи} = 2,22 \cdot 10^9\text{ расп/мин}$; $1\text{мкКи} = 2,22 \cdot 10^6\text{ расп/мин}$; $1\text{нКи} = 2,22 \cdot 10^3\text{ расп/мин}$; $1\text{пКи} = 2,22\text{ расп/мин}$.

Концентрация активности радиоактивного вещества часто определяется величиной удельной или объемной активности (Q), т. е. активности, приходящейся на единицу массы $Q = A/m$ (Ки/кг или Бк/кг) или объема $Q = A/V$ (Ки/л или Бк/л). Плотность загрязнения радионуклидами территории оценивается в единицах поверхностной активности (табл. 2).

Таблица 2

Единицы активности радионуклидов и их соотношения

Физическая величина	Системные единицы	Несистемные единицы	Соотношения между единицами
Активность нуклида	1Бк	1Ки	$1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{ Бк}$
Удельная активность	Бк/л, Бк/кг	Ки/л, Ки/кг	$1\text{Ки/кг} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{ Бк/кг}$
Поверхностная активность	кБк/м ²	Ки/км ²	$1\text{Ки/км}^2 = 37\text{кБк/м}^2$ $1\text{кБк/м}^2 = 27 \cdot 10^{-3}\text{ Ки/км}^2$

Согласно закону радиоактивного распада можно рассчитать активность любого радиоактивного препарата по истечении времени t , зная его начальную активность (A_0).

П р и м е р. 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 сут. рассчитывается по формуле

$$A_t = A_0 e^{-0,693t/T} = 5 \cdot 2,72^{0,693 \cdot 7/14} = 5 \cdot 2,72^{0,34} = 3,55 \text{ мКи.}$$

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ

Обнаружение и регистрация всех видов ядерных излучений (альфа-, бета-частицы, нейтроны, гамма-кванты, и т. д.), выбор материала для защиты, оценка биологического действия излучений, их регистрация основаны на эффектах, которые возникают при взаимодействии излучений с веществом.

Проходя через любую среду, в том числе через ткани человеческого организма, все ионизирующие излучения действуют, в принципе, одинаково: все они передают свою энергию атомам, вызывая их возбуждение и ионизацию. Но распределение ионов по пути следования будет различным в зависимости от вида и энергии излучения. Для понимания принципов этих явлений необходимо знать, каким образом различные по природе излучения взаимодействуют с веществом. Различают корпускулярные и электромагнитные излучения.

Корпускулярные излучения представляют собой поток атомных или элементарных частиц: альфа-частиц, электронов, нейтронов. Они характеризуются массой, зарядом и скоростью частиц.

Электромагнитные излучения представляют собой электромагнитные волны, которые характеризуются длиной волны и частотой колебаний. К ним относятся рентгеновские и гамма лучи.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОРПУСКУЛЯРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ

Выделяют упругое и неупругое взаимодействие корпускулярных излучений с веществом. *Под упругим* понимают такое взаимодействие, при котором частица лишь изменяет направление своего движения, но не теряет свою кинетическую энергию.

Неупругое взаимодействие — это процесс, при котором наряду с изменением направления движения частица теряет свою энергию.

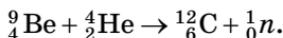
Кинетическая энергия частицы расходуется на ионизацию и возбуждение атомов, возбуждение и расщепление ядер или на характеристическое и тормозное рентгеновское излучение.

Альфа-частицы. Альфа-частицам присущи оба вида взаимодействия.

Упругое взаимодействие: α -частица с достаточно большой энергией ($E\alpha \uparrow$), проходя вблизи ядра легкого элемента ($\rho \downarrow$), под действием кулоновских сил отталкивания одноименных зарядов (положительный заряд альфа-частицы и ядра) изменяет направление своего движения, практически не теряя энергию.

Неупругое взаимодействие возможно с ядром атома, электрическим полем ядра, с электронами атома.

Взаимодействие α -частицы с ядром атома редко, но возможно, если она обладает очень высокой энергией (например, если ее разогнать в ускорителе). При этом α -частица, преодолев силы отталкивания, долетает до ядра легкого элемента и выбивает из него протон 1_1p или нейтрон 1_0n . На практике это явление используется для получения нейтронов в радиоизотопных источниках по реакции



Источником альфа-частиц часто служит полоний, а мишенью — бериллий. Таким образом получают полоний-бериллиевый Po(Be), плутоний-бериллиевый Pu(Be) и радий-бериллиевый Ra(Be) источники нейтронов. Характерная особенность таких источников нейтронов — отсутствие гамма-излучения.

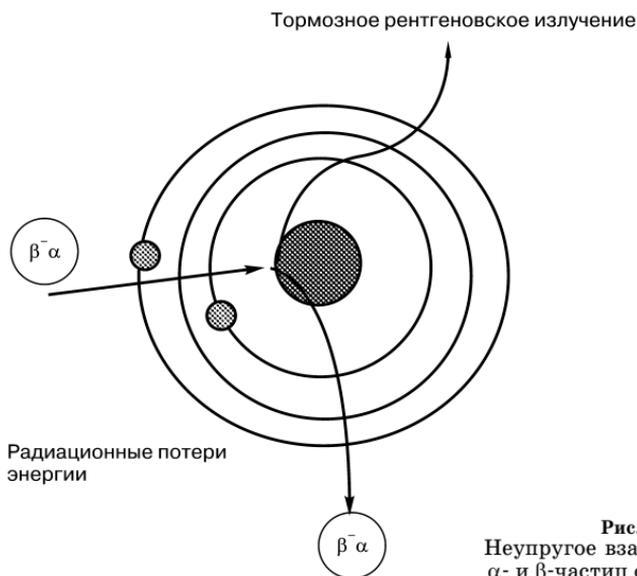


Рис. 8
Неупругое взаимодействие α- и β-частиц с полем ядра

Неупругое взаимодействие с электрическим полем ядра возникает, если α-частица обладает достаточно высокой энергией ($E\alpha \uparrow$) и сталкивается с атомами тяжелых элементов ($\rho \uparrow$). При этом она тормозится в электронном поле ядра, меняет направление своего движения, а часть ее энергии выделяется в виде излучения, которое по своей длине волны близко к рентгеновскому и называется тормозным рентгеновским излучением (рис. 8).

Если энергия α-частицы невелика, то она взаимодействует с электронами атома, растрачивая свою энергию в основном на ионизацию и возбуждение атомов (см. рис. 2).

При переходе атомов из возбужденного в нормальное состояние избыток энергии испускается в виде *характеристического рентгеновского излучения*.

Потери энергии, при которых возникают дополнительные излучения (характеристическое или тормозное рентгеновское), называют радиационными потерями (РП) энергии. Потери энергии, которая идет на ионизацию атомов, называют ионизационными потерями энергии.

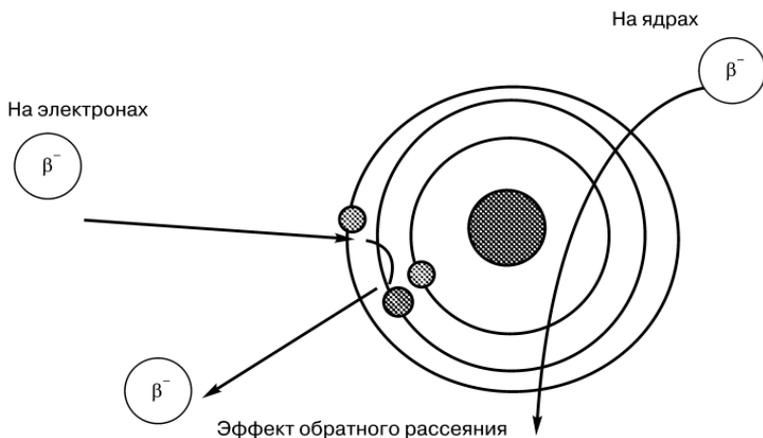
Для тяжелых α-частиц радиационные потери практически не имеют особого значения, поскольку величина этих по-

теперь обратно пропорциональна квадрату массы частицы, т. е. $РП = 1/m^2$. Высокая ионизирующая способность α -частиц обуславливает большие ионизационные потери при их взаимодействии с веществами.

Бета-частицы. При взаимодействии бета-частиц с веществом наблюдаются те же варианты, что и у α -частиц.

Упругое взаимодействие возможно у β -частиц небольших энергий с плотными материалами. Поскольку β -частица имеет небольшую массу, возможно упругое рассеяние *на ядрах* (за счет притяжения разноименных зарядов) или *на электронах* (за счет отталкивания одноименных зарядов). При этом β -частица меняет направление своего движения, вплоть до обратного возвращения (рис. 9). Этот эффект называют *эффектом обратного рассеяния* и используют в радиометрии с целью увеличения скорости счета от β -излучающих препаратов.

Таким образом, траектория полета бета-частиц в веществе сильно изломана вследствие рассеяния на орбитальных электронах и, особенно, в результате притяжения к положительно заряженным ядрам атомов. Вследствие значительного рассеяния бета-частиц в веществе истинная длина пути в 1,5...4 раза больше их пробега, т. е. путь бета-частиц всегда больше, чем пробег.



Путь β -частицы > пробега β -частицы

Рис. 9

Упругое рассеяние β -частиц на электронах и ядрах

Энергетические характеристики взаимодействия. Величиной, определяющей энергетическую сторону ионизации, служит так называемая *работа (потенциал) ионизации* — *средняя работа, затрачиваемая на образование одной пары ионов.*

В воздушной среде этот показатель составляет в среднем 35 эВ для альфа-частиц и 34 эВ для бета-частиц. Если известна энергия заряженной частицы, легко можно подсчитать полную ионизацию I , т. е. количество пар ионов, образованных на всем пути частицы:

$$I = E/W,$$

где E — энергия частицы, W — средняя энергия, затраченная на образование одной пары ионов.

Заряженные частицы, различные по природе, но с одинаковой энергией, образуют практически одинаковое число пар ионов (одинаковая полная ионизация). Однако *плотность ионизации*, или удельная ионизация, т. е. число пар ионов на единицу пути частицы в веществе, будет различная. Плотность ионизации возрастает с увеличением заряда частицы и с уменьшением ее скорости. Это обусловлено тем, что частицы с большим зарядом сильнее взаимодействуют с электронами, а частицы, обладающие меньшей скоростью, большее время находятся вблизи электронов, и их взаимодействие с ними также оказывается более сильным. Удельная ионизация у альфа-частиц самая большая из всех ядерных излучений. В воздухе на 1 см пути альфа-частица образует несколько десятков тысяч пар ионов, в то время как бета-частица — 50...100 пар ионов.

Проходя через вещество, заряженные частицы постепенно теряют энергию и скорость, поэтому плотность ионизации вдоль пути частицы возрастает и достигает наибольшей величины в конце пути (рис. 10). Процесс ионизации будет происходить до тех пор, пока энергия альфа- и бета-частиц будет способна производить ионизацию. В конце пробега альфа-частица присоединяет к себе два электрона и превращается в атом гелия, а бета-частица (электрон) может включиться в один из атомов среды или на какое-то время остается свободным электроном.

Путь, проходимый альфа- или бета-частицей в веществе, на протяжении которого она производит ионизацию, называют *пробегом* частицы. Пробег альфа-частиц в воздухе мо-

жет достигать 10 см, а в мягкой биологической ткани — нескольких десятков микрометров. Пробег бета-частиц в воздухе достигает 25 м, а в биологической ткани — до 1 см.

Распространяются альфа-частицы в веществе прямолинейно и изменяют направление движения только при соударениях с ядрами встречных атомов.

Бета-частицы, имея малую массу (в 7000 раз легче альфа-частицы), большую скорость и отрицательный заряд, значительно отклоняются от первоначального направления в результате соударения с орбитальными электронами и ядрами встречных атомов (эффект рассеяния). Претерпевая многократное рассеяние, бета-частицы могут даже двигаться в обратном направлении — *обратное рассеяние*.

Следует отметить еще одно различие в прохождении альфа- и бета-частиц через вещество. Поскольку все альфа-частицы, испускаемые данным радиоактивным изотопом, обладают относительно равной энергией и движутся в веществе прямолинейно, то число альфа-частиц в параллельном пучке, проходящем через единицу поверхности поглотителя, резко падает до нуля лишь в конце пробега. Спектр бета-частиц непрерывен, поэтому с увеличением толщины поглотителя A число бета-частиц в параллельном пучке, проходящем через единицу поверхности, уменьшается постепенно (рис. 11), так как бета-частицы различной энергии будут поглощаться различными слоями поглотителя.

Ослабление интенсивности потока бета-частиц в веществе приближенно подчиняется экспоненциальной зависимости:

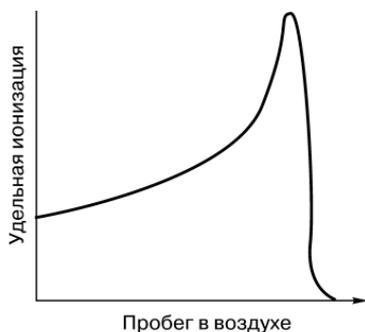


Рис. 10
Изменение удельной ионизации β -частиц вдоль пробега (кривая Брэга)

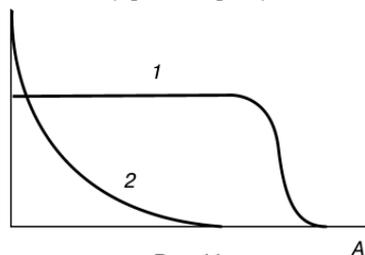


Рис. 11
Кривые поглощения α -частиц (1) и β -частиц (2) в веществе

$$N = N_0 e^{-\mu d},$$

где N — число бета-частиц, прошедших через слой поглотителя толщиной d (см); N_0 — число бета-частиц, поступающих за 1 с на поверхность поглотителя площадью 1 см^2 ; e — основание натуральных логарифмов, $e = 2,72$; μ — линейный коэффициент ослабления излучения, характеризующий относительное ослабление интенсивности потока бета-частиц после прохождения слоя поглотителя толщиной 1 см .

Обычно толщину слоя поглотителя выражают не в единицах длины (см или мм), а в г/см^2 или мг/см^2 , т. е. указывают массу поглотителя, приходящуюся на 1 см^2 его поверхности.

Нейтроны. Вследствие того что нейтроны не имеют заряда, а масса их 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*.

Нейтронное излучение опасно вследствие своей высокой проникающей способности и возможности вызвать в живых организмах наведенную радиоактивность.

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

Сверхбыстрые нейтроны. Такие нейтроны получают в ядерных реакторах; они возникают при ядерных взрывах. Энергия их составляет $10 \dots 50 \text{ МэВ}$. При взаимодействии с тяжелыми элементами сверхбыстрые нейтроны вызывают деление их ядер. При этом образуются сильно возбужденные ядра. В результате нарушения соотношения протонов и нейтронов в ядрах уменьшаются силы ядерного сцепления и нуклоны под действием сил отталкивания расходятся к противоположным полюсам. Ядро деформируется, в центре образуется перетяжка, и оно расщепляется на два-три осколка. Во время каждого акта деления высвобождается колоссальная энергия (около 200 МэВ) и вылетают два-три свободных нейтрона, которые способны вызвать деление других ядер. Так возникает цепной процесс деления ядер.

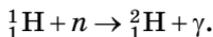
Из большого числа ядерных осколков и их дочерних продуктов интерес для радиобиологии представляют в первые

месяцы после ядерного взрыва ^{131}J , ^{140}Ba , ^{89}Sr , а в последующем ^{90}Sr , ^{137}Cs .

Быстрые нейтроны. Такие нейтроны образуются в результате ядерных реакций. Энергия их превышает 100 кэВ. При соударении с ядрами атомов быстрые нейтроны передают им часть своей энергии, образуя быстролетящие 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, т. е. с протонами, им передается в среднем до 60% энергии нейтрона, так как массы этих частиц практически равны. Поэтому быстрые нейтроны хорошо замедляются легкими веществами, содержащими много атомов водорода, такими как вода, парафин, ткань, и свободно проходят через большие толщины тяжелых веществ (свинец и др.). При взаимодействии с ядрами нейтроны постепенно замедляются вплоть до тепловых скоростей, т. е. до скоростей движения молекул среды.

Промежуточные нейтроны. Энергия таких нейтронов от 100 эВ до 1 кэВ. Они чаще взаимодействуют с веществом по типу упругого рассеяния.

Медленные и тепловые нейтроны. Энергия медленных нейтронов не превышает 1 кэВ. В отличие от быстрых нейтронов, медленные захватываются ядрами атомов, в результате чего 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 гамма-квантов с энергией, равной 2,18 МэВ:



Энергия тепловых нейтронов достигает 0,025 эВ. Тепловые нейтроны, так же как и медленные, захватываются поглощающей средой.

Для защиты от нейтронов с низкой энергией необходимо использовать, кроме поглотителя (вода, бор или кадмий), и экран из тяжелого материала (свинец, барий) для ослабления гамма-излучения.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

При радиоактивном распаде ядра испускают гамма-кванты с энергией в пределах от нескольких килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт. Проходя через вещество, гамма-кванты теряют энергию в результате проявления практически трех эффектов: фотоэлектрического поглощения (фотоэффект), комптоновского рассеяния (комpton-эффект), образования электронно-позитронных пар. Относительная величина каждого из этих эффектов зависит от атомного номера поглощающего материала и энергии фотона.

Фотоэффект. При фотоэлектрическом поглощении гамма-квант, сталкиваясь с прочно связанным электроном (чаще электронами *K*-слоя) в атомах облучаемого вещества, полностью передает ему свою энергию, сам исчезает, а электрон приобретает кинетическую энергию, равную энергии гамма-кванта минус энергия связи электрона в атоме: $E_e = E_\gamma - E_{св}$ (рис. 12).

Таким образом, при фотоэффекте вся энергия первичного гамма-кванта преобразуется в кинетическую энергию фотоэлектронов, которые ионизируют атомы и молекулы. На освободившееся место в орбите *K*-слоя перескакивает электрон *L*-слоя, на *L*-слой — электрон *M*-слоя и т. д. с высвечиванием квантов характеристического рентгеновского излучения.

Фотоэлектрическое поглощение преобладает тогда, когда энергия гамма-кванта не превышает 0,05 МэВ, а поглотитель представляет собой вещество с большим атомным номером (например, свинец).

Фотоэффект невозможен на слабосвязанных и свободных электронах (не связанных с атомом), так как они не могут поглощать гамма-кванты. В воздухе, воде и биологических

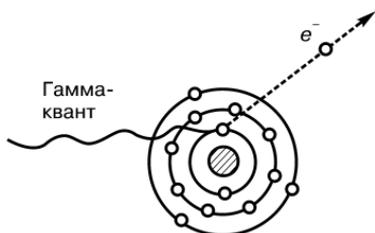


Рис. 12
Фотоэффект

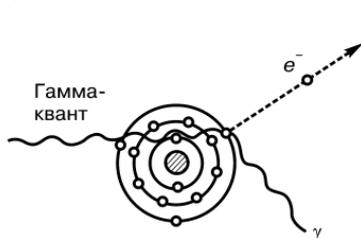


Рис. 13
Комpton-эффект

тканях фотоэлектрическое поглощение составляет 50% при энергии гамма-квантов порядка 60 кэВ. При $E_\gamma = 120$ кэВ доля фотоэлектрического поглощения составляет около 10%, а начиная с 200 кэВ этим процессом можно пренебречь. В этом случае гамма-излучение ослабляется за счет комптоновского рассеяния.

Комптон-эффект. Этот эффект состоит в том, что гамма-кванты, сталкиваясь с электронами, передают им не всю свою энергию, а только часть ее и после соударения изменяют направление своего движения, т. е. рассеиваются (рис. 13). Вследствие соударения с гамма-квантами электроны (электроны отдачи) приобретают значительную кинетическую энергию и расходуют ее на ионизацию вещества (вторичная ионизация).

В отличие от процесса фотоэлектрического поглощения, при комптон-эффекте гамма-кванты взаимодействуют с внешними, валентными электронами, энергия связи которых минимальная. Комптоновское рассеяние возможно на свободных электронах, легких элементов при $E_\gamma \geq 0,05$ МэВ.

Таким образом, в результате комптон-эффекта интенсивность гамма-излучения ослабляется вследствие того, что гамма-кванты, взаимодействуя с электронами среды, рассеиваются в различных направлениях и уходят за пределы первичного пучка, а также в результате передачи электронам части своей энергии: $E_{\gamma 2} = E_{\gamma 1} - E_e$.

Если энергия падающего гамма-кванта будет равна 0,13 МэВ, то на фотоэффект будет приходиться 1%, а на комптон-эффект — 99%. Если $E_{\gamma 1} = 0,511$ МэВ, то на комптон-эффект придется 100% взаимодействия.

Образование электронно-позитронных пар. Некоторые гамма-кванты с энергией не ниже 1,022 МэВ, проходя через плотное вещество, превращаются под действием сильного электрического поля вблизи ядра атома в пару электрон — позитрон (рис. 14). В данном случае одна форма



Рис. 14
Образование пар

материи — гамма-излучение преобразуется в другую — в частицы вещества. Образование такой пары частиц возможно только при энергиях гамма-квантов не меньших, чем энергия, эквивалентная массе обеих частиц — электрона и позитрона. Поскольку массы электрона и позитрона одинаковы, то для образования их без сообщения им дополнительной кинетической энергии энергия гамма-кванта должна удовлетворять соотношению взаимосвязи массы и энергии:

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

Если энергия гамма-квантов больше 1,022 МэВ, то избыток ее передается частицам. Тогда кинетическая энергия образующихся частиц E_k равна разности между энергией фотона E_{γ} и удвоенной энергией покоя электрона:

$$E_k = E_{\gamma} - 2mc^2 = h\nu - 1,022 \text{ МэВ.}$$

Образовавшаяся электронно-позитронная пара в дальнейшем исчезает (аннигилирует), превращаясь в два вторичных гамма-кванта с энергией, равной энергетическому эквиваленту массы покоя частиц (0,511 МэВ). Вторичные гамма-кванты способны вызвать лишь комптон-эффект и в конечном счете фотоэффект, т. е. терять энергию только при соударениях с электронами. Вероятность процесса образования пар увеличивается с возрастанием энергии гамма-квантов и плотности поглотителя.

Гамма-лучи высоких энергий (более 8 МэВ) могут взаимодействовать с ядрами атомов (ядерный эффект). Вероятность такого эффекта весьма мала, и этот вид взаимодействия практически не ослабляет излучений в веществе.

Закон ослабления гамма-излучения веществом. Он существенно отличается от закона ослабления потока альфа- и бета-частиц. Пучок гамма-лучей поглощается непрерывно с увеличением толщины слоя поглотителя; его интенсивность не обращается в нуль ни при каких толщинах слоя поглотителя. Это значит, что, какой бы ни была толщина слоя вещества, нельзя полностью поглотить поток гамма-лучей, а можно только ослабить его интенсивность в любое заданное число раз (рис. 15). В этом существенное отличие характера ослабления гамма-излучения от ослабления по-

тока альфа- и бета-частиц. Всегда можно подобрать такой слой вещества, в котором полностью поглощается поток альфа- или бета-частиц.

Закон ослабления пучка гамма-лучей имеет следующий вид:

$$I = I_0 e^{-\mu d},$$

где I — интенсивность пучка гамма-лучей, прошедших через слой поглотителя толщиной d (см); I_0 — интенсивность падающего пучка гамма-лучей; e — основание натуральных логарифмов, $e = 2,72$; μ — линейный коэффициент ослабления излучения, характеризующий относительное уменьшение интенсивности пучка гамма-лучей после прохождения слоя поглотителя толщиной 1 см.

Линейный коэффициент ослабления — суммарный коэффициент, который учитывает ослабление пучка гамма-лучей за счет всех трех процессов: фотоэффекта τ_{ϕ} , комптон-эффекта τ_{κ} и образования пар τ_{Π} . Таким образом,

$$\mu = \tau_{\phi} + \tau_{\kappa} + \tau_{\Pi}.$$

Поскольку значение μ зависит от энергии поглощаемого пучка гамма-квантов и от материала поглотителя, то его можно выразить через отношение μ/ρ , где ρ — плотность вещества. В этом случае коэффициент μ будет носить название *массового коэффициента ослабления*.

Закон ослабления может быть выражен также через слой половинного ослабления ($\Delta^{1/2}$). Толщина поглотителя, после прохождения которого интенсивность излучения ослабляется вдвое, называется *слоем половинного ослабления*; $\Delta^{1/2}$ измеряется в единицах

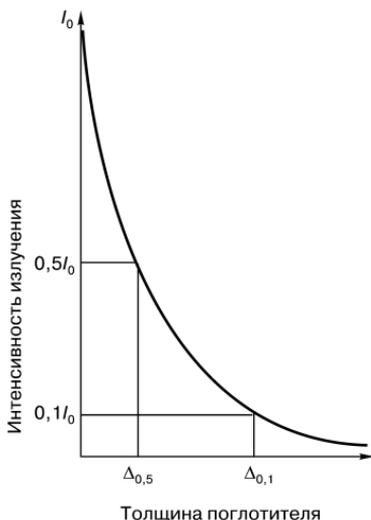


Рис. 15
Зависимость ослабления интенсивности гамма-излучения от толщины поглотителя

поверхностной плотности ($\text{мг}/\text{см}^2$) и зависит от энергии излучения и плотности поглотителя. Между линейным коэффициентом ослабления и слоем половинного ослабления существует следующая взаимосвязь:

$$\Delta^{1/2} = 0,693/\mu, \text{ или } \mu = 0,693/\Delta^{1/2}.$$

Зная слой половинного ослабления, можно довольно легко определить, какой нужно взять слой поглотителя, чтобы ослабить излучение в данное число раз. Например, один слой уменьшает интенсивность излучения в 2 раза, два слоя — в 4 раза, три слоя — в 8 раз и т. д., n слоев — в 2^n раз. Следовательно, чтобы ослабить интенсивность излучения, например в 512 раз, надо взять столько слоев половинного ослабления n , чтобы $2^n = 512$. В нашем случае $n = 9$, т. е. девять слоев половинного ослабления уменьшают интенсивность излучения в 512 раз.

Контрольные вопросы

1. Что такое естественная и искусственная радиоактивность? Причины их возникновения.
2. Какие элементарные частицы входят в состав атома?
3. Что такое явление изотопии?
4. В чем практическое значение закона радиоактивного распада?
5. Какие эффекты возникают при взаимодействии корпускулярных и электромагнитных излучений с веществом?
6. Чем определяется биологическая опасность ионизирующих излучений?



ГЛАВА ВТОРАЯ

ДОЗИМЕТРИЯ И РАДИОМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Дозиметрия (от *греч.* *dosis* — доза, порция; *metro* — измерять) — измерение рассеяния и поглощения энергии ионизирующего излучения в определенном материале. Доза излучения строго зависит от энергии и вида падающего излучения, а также от природы поглощающего материала.

Несмотря на различие задач радиометрии и дозиметрии, базируются они на общих методических принципах обнаружения и регистрации ионизирующих излучений.

ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Доза излучения и единицы ее измерения. Биологическое действие рентгеновского и ядерных излучений на организм обусловлено ионизацией и возбуждением атомов и молекул биологической среды. На процесс ионизации излучения расходуют свою энергию. В результате взаимодействия излучений с биологической средой живому организму передается определенное количество энергии. Часть излучения, которое пронизывает облучаемый объект (без поглощения), действия на него не оказывает. Поэтому основная физическая величина, характеризующая действие излучения на организм, находится в прямой зависимости от количества поглощенной энергии. Для измерения количества поглощенной энергии введено понятие «доза излучения», т. е. величина энергии, поглощенная в единице объема (массы) облучаемого вещества.

Доза излучения (экспозиционная доза). Так как поглощенная энергия расходуется на ионизацию среды, то для измерения ее необходимо подсчитать число пар ионов, образующихся при излучении. Однако измерить ионизацию непосредственно в глубине тканей живого организма трудно. В связи с этим для количественной характеристики рентгеновского и гамма-излучений, действующих на объект, определяют так называемую экспозиционную дозу $D_{\text{эксп}}$, которая характеризует ионизирующую способность рентгеновских и гамма-лучей в воздухе.

Экспозиционная доза ($D_{\text{эксп}}$) — это количественная характеристика ионизирующей способности рентгеновского или γ -излучения в воздухе, измеренная по количеству образованных зарядов (пар ионов) в воздухе.

От экспозиционной дозы с помощью соответствующих коэффициентов переходят к дозе, поглощенной в объекте. Экспозиционную дозу определяют по ионизирующему действию излучения в определенной массе воздуха и только при значениях энергии рентгеновских и гамма-лучей в диапазоне от десятков кэВ до 3 МэВ.

Международная система единиц СИ. В 1960 г. на Генеральной конференции по мерам и весам в Париже принята Международная система единиц измерения (Systeme International, сокращенно SI, или система интернациональная — СИ). В СССР она введена в 1963 г. в качестве государственного стандарта (ГОСТ). Учитывая, что специалисты в опубликованных ранее монографиях, статьях, отчетах будут еще многие годы встречаться с внесистемными единицами, в этой главе мы приводим и те и другие, а также будем приводить соотношения между ними (табл. 3).

За единицу экспозиционной дозы в Международной системе единиц (СИ) принят кулон на килограмм (Кл/кг), т. е. такая экспозиционная доза рентгеновских или гамма-лучей, при которой в 1 кг сухого воздуха образуются ионы, несущие заряд в один кулон электричества каждого знака.

Несистемной единицей экспозиционной дозы является рентген. *Рентген (Р)* — экспозиционная доза рентгеновского или гамма-излучения, при которой в 1 см³ воздуха (0,001293 г сухого воздуха) при нормальных условиях (0°С и 1013 ГПа) образуется $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов ($1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$).

Поскольку на образование одной пары ионов в воздухе в среднем затрачивается 34 эВ, то энергетический эквивалент рентгена в 1 см³ воздуха составляет $2,08 \cdot 10^9 \cdot 34 \cdot 10^{-6} = 7,08 \cdot 10^4$ МэВ/см³ = 0,114 эрг/см³, или в 1 г воздуха 88 эрг (0,114/0,001293 = 88 эрг).

Производные единицы рентгена: килорентген (1 кР = 10³ Р), миллирентген (1 мР = 10⁻³ Р), микрорентген (1 мкР = 10⁻⁶ Р).

Для характеристики распределения во времени экспозиционной (а также любой другой) дозы используют величину **мощности дозы**. Тогда расчет ведется на единицу времени (табл. 3).

Доза облучения (поглощенная доза). Степень, глубина и форма лучевых поражений, развивающихся в биологических объектах при воздействии на них ионизирующего излучения, в первую очередь зависит от величины поглощенной энергии излучения. Для характеристики этого показателя используют понятие «поглощенная доза», т. е. энергия излучения, поглощенная в единице массы облучаемого вещества.

Таблица 3

Единицы экспозиционных доз ионизирующих излучений и их соотношения

Физическая величина	Наименование единицы и ее обозначение		Соотношение между единицами
	внесистемное	системное (СИ)	
Экспозиционная доза излучения	Р	Кл/кг	1 Р = 2,58 · 10 ⁻⁴ Кл/кг 1 Кл/кг = 3876 Р
Мощность экспозиционной дозы излучения	Р/с	А/кг	1 Р/с = 2,58 · 10 ⁻⁴ А/кг 1 А/кг = 3876 Р/с

Таблица 4

Единицы поглощенных доз ионизирующих излучений и их соотношения

Физическая величина	Наименование единицы и ее обозначение		Соотношение между единицами
	внесистемное	системное (СИ)	
Поглощенная доза	рад	Гр	1 рад = 1 · 10 ⁻² Гр 1 Гр = 100 рад
Мощность поглощенной дозы	рад/с	Гр/с	1 рад/с = 1 · 10 ⁻² Гр/с 1 Гр/с = 100 рад

Доза поглощенная $D_{\text{п}}$ — это величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу:

$$D_{\text{п}} = \Delta E / \Delta m,$$

где ΔE — средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме; Δm — масса вещества в этом объеме.

Единицы поглощенных доз представлены в табл. 4.

За единицу поглощенной дозы в Международной системе единиц (СИ) принят джоуль на килограмм (Дж/кг), т. е. такая поглощенная доза, при которой в 1 кг массы облученного вещества поглощается 1 Дж энергии излучения. Этой единице присвоено собственное наименование — грей (Гр). *Один грей* — это поглощенная доза ионизирующего излучения любого вида, при которой в 1 кг массы вещества поглощается 1 Дж энергии излучения (1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад).

В радиобиологии и радиационной гигиене широкое применение получила внесистемная единица поглощенной дозы — рад. Единица рад (rad — radiation absorbent dose) — поглощенная доза любого вида ионизирующего излучения, при которой в 1 г массы вещества поглощается энергия излучения, равная 100 эрг (1 рад = 100 эрг/г = 10^{-2} Дж/кг). Производные единицы рад: килорад (1 крад = 10^3 рад), миллирад (1 мрад = 10^{-3} рад), микрорад (1 мкрад = 10^{-6} рад).

Поскольку при одной и той же энергии гамма-квантов и частиц в 1 г биологической ткани, разной по химическому составу, поглощается различное количество энергии, поглощенную в тканях дозу определяют в радах расчетным путем по формуле

$$D_{\text{рад}} = D_{\text{эксп}} f,$$

где $D_{\text{рад}}$ — поглощенная доза, рад; $D_{\text{эксп}}$ — экспозиционная доза в той же точке; f — переходный коэффициент, значение которого зависит от энергии излучения и от рода поглощающей ткани (плотности).

Если в воздухе доза излучения в 1 Р энергетически эквивалентна 88 эрг/г, то поглощенная энергия для этой среды составит $88 : 100 = 0,88$ рад. Таким образом, для воздуха поглощенная доза, равная 0,88 рад, соответствует экспозици-

онной дозе в 1 Р. Переходный коэффициент (f) обычно определяют опытным путем. Для воды и мягких тканей коэффициент $f_{\text{тк}}$ округленно принят за единицу (фактически он составляет 0,93). Следовательно, поглощенная доза в радах численно почти равна соответствующей экспозиционной дозе в рентгенах. Для костной ткани коэффициент $f_{\text{к}} = 2 \dots 5$.

В настоящее время широко применяются понятия: *эквивалентная доза, эффективная доза*.

Эквивалентная доза. Величина поглощенной дозы учитывает только энергию, абсорбированную облучаемым объектом, и не оценивает «качество излучения». *Понятие качества излучения выражает его способность производить различные радиационные эффекты в зависимости как от сорта частиц, так и в первую очередь от ЛПЭ.* С возрастанием плотности ионизации меняется степень повреждения живых систем.

Из-за различия характера радиационного эффекта, зависимостей от состава излучения и временных характеристик процесса облучения и т. д., казалось бы, трудно сводить качество излучения к одной только характеристике, допустим, к ЛПЭ. Однако во многих случаях это просто необходимо: сюда относится широкий круг проблем экологии, радиационной безопасности и защиты от излучений. Нередко нет возможности определить состав излучения и многие другие факторы, а обстоятельства требуют предвидеть или оценить эффекты хотя бы в среднем.

Поэтому в целях противорадиационной защиты используются не конкретные значения биологической эффективности того или иного действия излучений, а так называемый коэффициент качества (КК) излучения. Такой «фактор качества» (ныне принято выражать его в виде «взвешивающих коэффициентов») является регламентированной величиной, его значения определены специальными комиссиями и включены в международные и национальные нормы, предназначенные для контроля радиационной опасности. КК зависит только от интервала значений ЛПЭ, а его детализация в виде взвешивающих коэффициентов зависит также от того, какой орган или часть тела подвергается облучению. Для учета биологической эффективности различных видов излучения введено понятие эквивалентной дозы H .

Эквивалентная доза H — поглощенная доза в органе или ткани $D_{\text{п}}$, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент \bar{Q} для данного вида излучения:

$$H = D_{\text{п}} \bar{Q}.$$

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

$$H = \sum D_{\text{п}i} \bar{Q}_i,$$

где i — вид излучения.

Значения коэффициентов \bar{Q} для разных видов излучения: рентгеновское, гамма- и бета-излучения — 1; альфа-частицы, протоны — 10; нейтроны: медленные (тепловые) — 3...5; быстрые — 10; тяжелые ядра отдачи — 20.

В системе СИ за единицу эквивалентной дозы принят Зиверт (Зв). Внесистемная единица эквивалентной дозы — биологический эквивалент рада — бэр. Как и для поглощенной дозы, его эквивалентом является 1 Дж/кг (1 бэр = $1 \cdot 10^{-2}$ Дж/кг). 1 Зв = 100 бэр (табл. 5).

В практике используют дольные единицы: миллибэр (1 мбэр = $1 \cdot 10^{-3}$ бэр), микробэр (1 мкбэр = $1 \cdot 10^{-6}$ бэр), нанобэр (1 нбэр = $1 \cdot 10^{-9}$ бэр).

Пример 1. Рассчитать поглощенные физическую и эквивалентную дозы от смешанного источника излучения, если доза от гамма-излучения 1 рад, от бета-излучения — 10 рад, от альфа-излучения — 1 рад и от быстрых нейтронов — 1 рад.

Решение:

$$D_{\text{п}} = \sum D_{\text{п}i} = 1 + 10 + 1 + 1 = 13 \text{ рад}.$$

Подставив значения $D_{\text{п}i}$ и \bar{Q}_i , получим

$$H = \sum D_{\text{п}i} \bar{Q}_i = 1 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 10 + 1 \cdot 10 = 31 \text{ рад}.$$

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

Эффективная доза облучения. При общем однократном облучении организма разные органы и ткани (а в клетке — органеллы, макромолекулы) обладают различной чувствительностью к действию радиации. Так, при одинаковой эквивалент-

Таблица 5

Единицы эквивалентных доз ионизирующих излучений и их соотношения

Физическая величина	Наименование единицы и ее обозначение		Соотношение между единицами
	внесистемное	системное (СИ)	
Эквивалентная доза	бэр	Зв	1 бэр = $1 \cdot 10^{-2}$ Зв 1 Зв = 100 бэр
Мощность эквивалентной дозы	бэр/с	Зв/с	1 бэр/с = $1 \cdot 10^{-2}$ Зв/с 1 Зв/с = 100 бэр/с

ной дозе риск генетических повреждений наиболее вероятен при облучении репродуктивных органов. Риск возникновения рака легких при воздействии, например, α -излучения радона в равных условиях облучения более вероятен по сравнению, например, с раком кожи и т. п. Поэтому понятно, что дозы облучения отдельных элементов живых систем также следует рассчитывать с учетом взвешивающих коэффициентов для оценки радиочувствительности биологических систем.

Эффективная доза E — это величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет собой сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты для данного органа или ткани:

$$E = \sum H_{\text{тк}} \bar{Q}.$$

Значения взвешивающих коэффициентов для различных органов и тканей при расчете эффективной дозы: гонады — 0,2; костный мозг (красный) — 0,12; тонкая кишка — 0,12; легкие — 0,12; желудок — 0,12; мочевого пузыря — 0,05; печень — 0,05; пищевод — 0,05; щитовидная железа — 0,05; кожа — 0,01.

Эффективные дозы измеряются так же, как и эквивалентные, в берах и зивертах.

В практике используется понятие мощности дозы (поглощенной, эквивалентной, эффективной) — доза, отнесенная к единице времени.

Мощность дозы и единицы ее измерения. В биологическом отношении важно знать не просто дозу излучения,

которую получил облучаемый объект, а дозу, полученную в единицу времени. В одном случае суммарная доза, значительно превышающая смертельную, но полученная в течение длительного периода времени, не только не приведет к гибели животного, но даже не вызовет у него реакцию лучевого поражения. В другом случае доза меньше смертельной, но полученная в короткий отрезок времени, может вызвать лучевую болезнь различной тяжести. В связи с этим введено понятие мощности дозы. Мощность дозы (P) — это доза излучения D , отнесенная к единице времени t :

$$P = D/t.$$

Чем больше мощность дозы P , тем быстрее растёт доза излучения D .

Понятие мощности дозы относится как к экспозиционной, так и к поглощенной дозе. Для измерения 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. За единицу мощности поглощенной дозы в СИ принят ватт на килограмм (Вт/кг), внесистемные единицы — рад в час (рад/ч), рад в минуту (рад/мин) и т. д. Единицей мощности эквивалентной дозы является зиверт в секунду (Зв/с).

Мощность дозы, измеренную на расстоянии 1 м от поверхности зараженного объекта, называют *уровнем радиации*. Если уровень радиации во времени не изменяется, то произведение величины уровня радиации на продолжительность облучения даёт *дозу облучения*.

При заражении местности продуктами ядерного взрыва или в результате аварий на атомных предприятиях уровень радиации непрерывно снижается во времени, так как выпадают на местность и образуются из дочерних нуклидов изотопы с разным периодом полураспада: от долей секунды до многих лет. В результате распада короткоживущих изотопов уровень радиации сначала быстро снижается, а затем уменьшение его постепенно замедляется.

Степень заражения радиоактивными веществами поверхностей, выраженную в кБк/м², называют *плотностью радиоактивного загрязнения*, а содержание радиоактивных веществ в единице объема продукта — их *концентрацией* (Бк/кг, л).

Измерять активность источника радиоактивного заражения в беккерелях или кюри довольно сложно. Поэтому часто степень радиоактивного заражения измеряют в единицах мощности дозы гамма-излучения (мЗв/ч, мкЗв/ч). В этих же единицах выражены допустимые уровни заражения поверхностей, а также продовольствия, кормов, воды.

Соотношение между активностью радиоактивных препаратов и дозой, создаваемой их гамма-излучением. Для установления соотношения между активностью радиоактивного препарата и экспозиционной дозой, создаваемой им, используют гамма-постоянную (K_γ). Для точечного источника⁶ с активностью A (мКи) доза излучения D (Р), создаваемая за время t (ч), на расстоянии R (см) выражается формулой

$$D = K_\gamma A t / R^2.$$

Соответственно мощность экспозиционной дозы (Р/час):

$$P = K_\gamma A t / R^2.$$

Если вместо активности известен гамма-эквивалент радиоактивного изотопа M (мг-экв. радия), то

$$D = 8,4 M t / R^2; \quad P = 8,4 M t / R^2,$$

где 8,4 — гамма-постоянная радия, Р.

Квадрат расстояния R в знаменателе показывает, что доза от точечного источника ослабевает по закону квадратов расстояния подобно изменению интенсивности света.

Пример 2. На рабочем месте имеется радиоактивный препарат ^{60}Co , гамма-эквивалент которого 10 мг-экв. радия. Какую дозу получит работающий на расстоянии 0,5 м за 6 дней, если работает ежедневно: 1) по 30 мин; 2) по 3 мин?

Решение:

$$1) D = 8,4 M t / R^2 = 8,4 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 6 / 2500 = 0,1 \text{ Р};$$

$$2) D = 8,4 \cdot 10 \cdot 0,05 \cdot 6 / 2500 = 0,01 \text{ Р}.$$

При пересчете в единицы СИ необходимо учесть, что $1 \text{ Р} = 10^{-2} \text{ Гр}$.

⁶ Источник называют точечным, если доза или интенсивность излучения в данной точке изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Источник можно считать точечным, если его линейные размеры в 5...10 раз меньше расстояния, на котором измеряют дозы.

Принцип расчета доз при внутреннем (инкорпорированном) облучении. При работе с открытыми источниками ионизирующих излучений радиоактивные вещества могут вследствие нарушения техники безопасности или при аварии попасть в организм через дыхательные пути, желудочно-кишечный тракт, поры кожи и открытые повреждения. Иногда радиоактивные вещества вводят в организм с диагностической, терапевтической или экспериментальной целью. Во всех случаях попадания радиоактивных веществ в организм создается опасность лучевого поражения. Определить дозу, полученную в результате внутреннего облучения, трудно и особенно тогда, когда неизвестно количество радиоактивного вещества, поступившего в организм.

Следует отметить, что при одних и тех же количествах радиоактивного вещества внутреннее облучение во много раз опаснее внешнего. Это связано с рядом особенностей:

- резко возрастает время облучения, так как попавшие внутрь организма радиоактивные вещества вступают в химическую связь с различными элементами живой ткани и медленно выводятся из нее;
- расстояние от источника облучения до облучаемой ткани сокращается практически до нуля, а телесный угол, при котором излучение воздействует на организм, достигает 4π ;
- внешнее облучение воздействует на все ткани практически в равной степени, тогда как радиоактивные вещества откладываются внутри организма неравномерно и могут концентрироваться вблизи особо чувствительных к излучению и важных для жизнедеятельности органов или непосредственно в них (критические органы);
- наибольшая опасность внутреннего облучения связана еще и с тем, что в числе поражающих факторов при внутреннем облучении необходимо учитывать линейную плотность ионизации, характеризуемую коэффициентом ОБЭ. Особенно это относится к альфа-излучению.

Содержание радиоактивных веществ в организме со временем уменьшается в результате двух одновременно протекающих процессов: физического распада и биологического выведения их из организма. Следовательно, эффективная постоянная выведения $\lambda_{\text{эфф}}$ будет складываться из постоян-

ной физического распада $\lambda_{\text{физ}}$ и постоянной биологического выведения $\lambda_{\text{биол}}$:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{физ}} + \lambda_{\text{биол}}.$$

Скорость биологического выведения больше у тех радиоактивных веществ, которые имеют меньшее «сродство» с элементами живой ткани. Радиоактивные вещества, вступающие в обмен веществ и прочные биологические соединения, удерживаются в организме длительное время.

Если перейти от постоянных выведения к периодам полураспада $T_{\text{физ}}$ и периодам полувыведения $T_{\text{биол}}$, то убывание активности (эффективный период полувыведения $T_{\text{эфф}}$) можно определить по формуле

$$T_{\text{эфф}} = \frac{T_{\text{физ}} T_{\text{биол}}}{T_{\text{физ}} + T_{\text{биол}}}.$$

Эффективный период полувыведения $T_{\text{эфф}}$ показывает, за какое время количество радиоактивного изотопа в организме (органе) уменьшится в два раза. Дозу при внутреннем облучении можно подсчитать, если известны радиоактивный изотоп, характер распределения его в организме и продолжительность облучения. Со временем концентрация радиоактивного изотопа в тканях организма будет уменьшаться по экспоненциальной зависимости:

$$C_t = C_0 e^{-\lambda_{\text{эфф}} t},$$

где C_0 — исходная концентрация радиоактивного изотопа, кБк/г; C_t — концентрация радиоактивного изотопа, оставшаяся по прошествии времени t , кБк/г; e — основание натуральных логарифмов; $\lambda_{\text{эфф}}$ — эффективная постоянная выведения; t — время, прошедшее от начального момента ($t = 0$) до данного.

Мощность дозы при однократном поступлении радиоактивного вещества пропорциональна концентрации и, следовательно, также будет убывать по экспоненте:

$$P_t = P_0 e^{-\lambda_{\text{эфф}} t}.$$

Полная поглощенная доза $D_{\gamma\infty}$ (рад), накапливающаяся от начального момента времени $t = 0$ до полного распада

изотопа, в каком-либо органе с распределенным в нем гамма-излучателем может быть рассчитана по формуле

$$D_{\gamma\infty} = 0,032K_{\gamma}C_0\rho qT_{\text{эфф}},$$

где 0,032 — постоянный расчетный коэффициент поглощенных доз; K_{γ} — гамма-постоянная изотопа; C_0 — начальная концентрация изотопа в ткани, кБк/г; ρ — плотность ткани, г/см³; q — геометрический фактор, зависящий от формы и размера объекта; $T_{\text{эфф}}$ — эффективный период полувыведения изотопа из организма (или из органа при расчете поглощенной дозы в органе).

Оценка геометрического фактора сложна. В справочниках даются ориентировочные значения q для различных точек тела разной формы (шар, цилиндр и т. д.).

Поглощенную дозу $D_{\gamma(t)}$ (рад) в любой момент времени после поступления радиоизотопа в организм вычисляют по формуле

$$D_{\gamma(t)} = 0,032K_{\gamma}C_0\rho qT_{\text{эфф}} \left(1 - e^{-\frac{0,693t}{T_{\text{эфф}}}}\right),$$

где C_0 — начальная концентрация радиоизотопа, мКи/г; t — время в днях.

Поглощенную дозу $D_{\beta(t)}$ (рад) для короткоживущего бета-излучающего изотопа, распадающегося практически полностью в течение первых суток (или одной недели) после поступления его в биологическую ткань, рассчитывают по формуле

$$D_{\beta(t)} = 73,8C_0\bar{E}_{\beta}T_{\text{эфф}},$$

где 73,8 — постоянный расчетный коэффициент поглощенных доз, если концентрация изотопа C выражена в кБк/г, а $T_{\text{эфф}}$ в сутках; \bar{E}_{β} — средняя энергия бета-частиц, МэВ.

Поглощенную дозу $D_{\beta(t)}$ (рад) в любой момент времени вычисляют по формуле

$$D_{\beta(t)} = 73,8C_0\bar{E}_{\beta}T_{\text{эфф}} \left(1 - e^{-\frac{0,693t}{T_{\text{эфф}}}}\right),$$

где t — время облучения, сут.

Альфа-излучающие вещества при попадании внутрь организма оказывают более выраженное биологическое дейст-

вие, чем гамма- и бета-излучающие вещества при равной концентрации на 1 г ткани. Это обусловлено высокой плотностью ионизации среды вдоль пути альфа-частицы. Напомним, что отношение ОБЭ альфа-излучения к ОБЭ гамма- и бета-излучений равно 10.

Поглощенную дозу $D_{\alpha(t)}$ (бэрад) от альфа-излучения за время t , когда заметно снижается концентрация радиоизотопа вследствие физических и биологических процессов, рассчитывают по формуле, аналогичной расчету поглощенной дозы от бета-излучения, но с введением в нее коэффициента ОБЭ:

$$D_{\alpha(t)} = 73,8C_0E_{\alpha}(\text{ОБЭ})T_{\text{эфф}} \left(1 - e^{-\frac{0,693t}{T_{\text{эфф}}}}\right),$$

где E_{α} — средняя энергия альфа-частиц.

Если в объекте облучения одновременно находятся альфа-, бета- и гамма-излучающие изотопы, то отдельно рассчитывают дозы от каждого вида излучения, а полученные величины складывают.

Виды дозиметрии. В зависимости от целей и задач дозиметрия бывает нескольких видов.

1. *Индивидуальная дозиметрия* — это дозиметрия уровня облучения персонала и всего населения. Сюда входят:

- повседневный радиационный контроль (от 10^{-3} до 10 бэр);
- аварийная дозиметрия (от 1 до 5000 рад);
- дозиметрия в условиях ядерной войны (от 10 до 1000 бэр);
- дозиметрия при космических полетах (от 10^{-3} до 1000 бэр);
- дозиметрия естественного излучения (от 10^{-4} до 10^{-3} бэр).

2. *Клиническая дозиметрия* при лечении и диагностике забоеваний (от 1 до 10^4 рад).

3. *Дозиметрия в радиобиологии* (от 1 до 10^7 рад).

4. *Дозиметрия в радиационной технике*:

- радиационная химия (от 10^3 до 10^8 рад);
- лучевая стерилизация ($2,5 \cdot 10^6$ рад);
- облучение продуктов питания (от 10^3 до $5 \cdot 10^6$ рад).

5. *Внутриреакторная дозиметрия* (от 10^4 до 10^9 рад, от 10^7 до 10^{14} нейтр/с/см²).

При проведении дозиметрии существует ряд трудностей:

- большой диапазон измеряемых доз (от 10^{-3} до 10^9 рад);

- необходимость регистрации и дозиметрии различных видов излучений;
- широкий спектральный состав излучения, то есть диапазоны энергий от 5 кэВ до 100 МэВ.

Следовательно, одним методом дозиметрии или одним прибором решить проблему нельзя. Поэтому существует несколько методов дозиметрии.

В качестве дозиметра можно использовать любое вещество, которое изменяется под действием излучения. При создании дозиметрической системы учитывают следующие основные критерии:

- чувствительность дозиметра, то есть нижний предел измеряемой дозы;
- зависимость чувствительности от энергии излучения;
- погрешность измерения (у большинства дозиметров в зависимости от класса точности ошибка составляет от 4 до 20%);
- возможность конструктивного решения, то есть возможность оформления дозиметра;
- возможность регистрации различных видов излучения.

Методы дозиметрии и радиометрии ионизирующих излучений. В дозиметрии используют те же методы, что и в радиометрии. Они основаны на регистрации тех эффектов, которые возникают при взаимодействии излучений с веществом. В зависимости от эффекта взаимодействия излучения с веществом методы регистрации делят на: ионизационный, сцинтилляционный, фотографический, химический и калориметрический.

Ионизационный метод основан на способности излучений производить ионизацию среды. Под воздействием ядерных излучений в изолированном объеме происходит ионизация воздуха или газа: из электрически нейтральных атомов образуются положительно и отрицательно заряженные ионы. Если в этот объем поместить два электрода, к которым подано постоянное напряжение электрического тока, то между электродами создается электрическое поле, в котором возникает направленное движение заряженных частиц: отрицательно заряженные ионы притянутся к аноду, а положительно заряженные — к катоду, в результате чего разность

потенциалов между электродами будет уменьшаться. Образуется так называемый ионизационный ток. Измеряя его величину, получают представление об интенсивности радиоактивных излучений.

Сцинтилляционный метод основан на способности ионизирующих излучений вызывать возбуждение атомов и молекул. При переходе из возбужденного состояния в основное избыток энергии испускается в виде квантов света (сцинтилляций), которые преобразуются с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) в электрические импульсы, регистрируемые соответствующими приборами.

Фотографический метод основан на изменении степени почернения фотоэмульсии. Если фотопленку, помещенную в светонепроницаемую камеру, подвергнуть воздействию гамма-излучений, а затем проявить, обнаруживается ее почернение. Плотность почернения пропорциональна дозе облучения. Сравнивая плотность почернения с эталоном, определяют дозу облучения, полученную пленкой. На этом принципе основаны индивидуальные фотодозиметры.

Химический метод основан на определении степени изменения цвета некоторых химических веществ после облучения. Так, хлороформ в воде при облучении разлагается с образованием соляной кислоты, которая дает цветную реакцию с красителем, добавленным к хлороформу. Двухвалентное железо в кислой среде окисляется в трехвалентное под воздействием свободных радикалов HO_2 и OH , образующихся в воде при ее облучении. Трехвалентное железо дает цветную реакцию. По плотности окраски судят о дозе облучения. На этом принципе основаны химические дозиметры ДП-70, ДП-70М.

Калориметрический метод основан на измерении тепловой энергии, выделяющейся при поглощении энергии излучения в веществе.

РАДИОМЕТРИЯ

Радиометрия (от греч. radio — луч, metro — измерять) — обнаружение и измерение числа распадов атомных ядер в радиоактивных источниках либо некоторой доли их по испускаемому ядрами излучению.

ПРИБОРЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Система для регистрации ионизирующих излучений состоит из двух частей:

- детектора (он является чувствительным элементом, в котором происходит взаимодействие излучения с системой);
- измерительной аппаратуры (она воспринимает сигнал с выхода детектора и выполняет функции, необходимые для производства измерений).

В зависимости от режима работы системы для регистрации ионизирующих излучений делят на:

- импульсные системы (когда на выходе детектора имеется серия отдельных, разрешенных во времени сигналов, каждый сигнал соответствует прохождению одной частицы, через чувствительный объем детектора), например счетчик Гейгера–Мюллера + электронный регистратор для счета импульсов;
- интегрирующие системы (когда измеряется непосредственно некоторый средний эффект, обусловленный попаданием в детектор множества ядерных частиц), например ионизационная камера. Ток на выходе камеры пропорционален числу частиц, падающих на детектор в единицу времени. В таких случаях не стремятся обнаружить отдельные частицы. В действительности для больших потоков ядерных частиц это сделать часто бывает невозможно. Такие системы могут быть названы системами для измерения среднего уровня излучения.

ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Радиоактивные излучения не воспринимаются органами чувств. Эти излучения могут быть обнаружены (детектированы) при помощи детекторов, работа которых основана на физико-химических эффектах, возникающих при взаимодействии излучений с веществом.

В практике наиболее употребительны ионизационные детекторы излучений, которые измеряют непосредственно

эффект взаимодействия излучения с веществом — ионизацию газовой среды, заполняющей рабочий объем детектора (ионизационные камеры, пропорциональные счетчики и счетчики Гейгера–Мюллера). В других детекторах предусматривается измерение вторичных эффектов, обусловленных ионизацией, — фотографического, сцинтилляционного (люминесцентного), химического, калориметрического и др.

Калориметрические и химические детекторы применяют главным образом при измерении больших доз (порядка сотен тысяч или миллионов рентген) и мощных потоков ионизирующих излучений. Поэтому применение детекторов в медицинской и ветеринарной радиологической практике ограничено.

Ионизационные детекторы излучения обычно представляют собой замкнутый сосуд, наполненный соответствующей газовой смесью, внутри которой находится металлический стержень или нить. Корпус сосуда и нить являются электродами и разделены хорошим изолятором. К электродам прикладывается определенное напряжение (рис. 16).

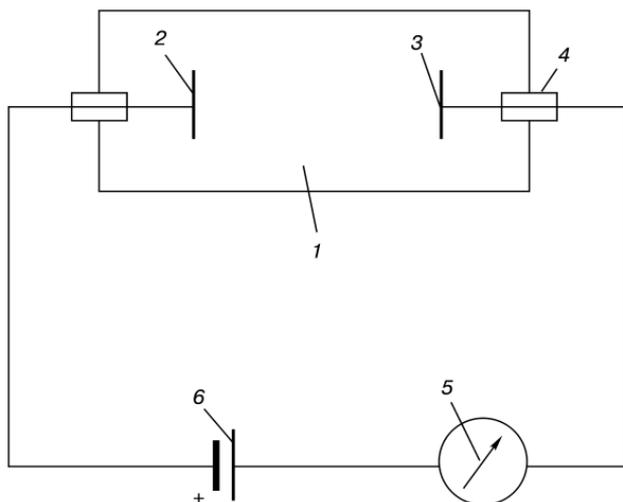


Рис. 16

Схема работы ионизационного детектора излучения:

1 — камера, заполненная воздухом или газом; 2 — анод; 3 — катод; 4 — изолятор; 5 — прибор для измерения ионизационного тока; 6 — источник питания.

Заряженные частицы (альфа- или бета-), попавшие в камеру детектора, производят в ней непосредственно первичную ионизацию газовой среды; гамма-кванты вначале образуют быстрые электроны (фотоэлектроны, комптон-электроны и электронно-позитронные пары) в стенке детектора, которые затем вызывают ионизацию газовой среды в камере.

Сухой газ (воздух) — хороший электроизолятор, так как электрически нейтральные молекулы, из которых он состоит, не перемещают электрических зарядов. Положение изменяется, если в газовую среду попадают заряженные частицы. Они образуют ионные пары, и газ (воздух) становится проводником электрического тока.

При отсутствии напряжения на электродах все ионы, созданные начальной ионизацией, полностью рекомбинируют в нейтральные молекулы. При возрастании напряжения ионы под действием электрического поля обретают направленное движение: положительные ионы собираются на катоде, а электроны — на аноде. В цепи возникает ионизационный ток, который может быть зарегистрирован прибором. Сила ионизационного тока служит мерой количества излучения.

С увеличением напряжения вероятность рекомбинации уменьшается, а следовательно, возрастает сила ионизационного тока. На рис. 17 показана кривая зависимости силы ионизационного тока от напряжения U , приложенного к электродам детектора. Эту кривую называют вольт-амперной характеристикой ионизационного детектора.

Начиная с некоторого напряжения U_n , наступает момент, когда все ионы, образованные излучением, достигают электродов, и при увеличении напряжения ионизационный ток не возрастает. Область, обозначенная на графике как $U_n - U_{п}$, в которой сила ионизационного тока остается постоянной, называется областью тока насыщения. В этом режиме работают ионизационные камеры. Сила ионизационного тока в области тока насыщения зависит от величины первичной ионизации, т. е. от числа первичных пар ионов, создаваемых ядерным излучением в камере детектора. Поэтому сила ионизационного тока от гамма-излучения меньше, чем от бета-частиц; наиболее высокая сила тока альфа-частиц, так как плотность

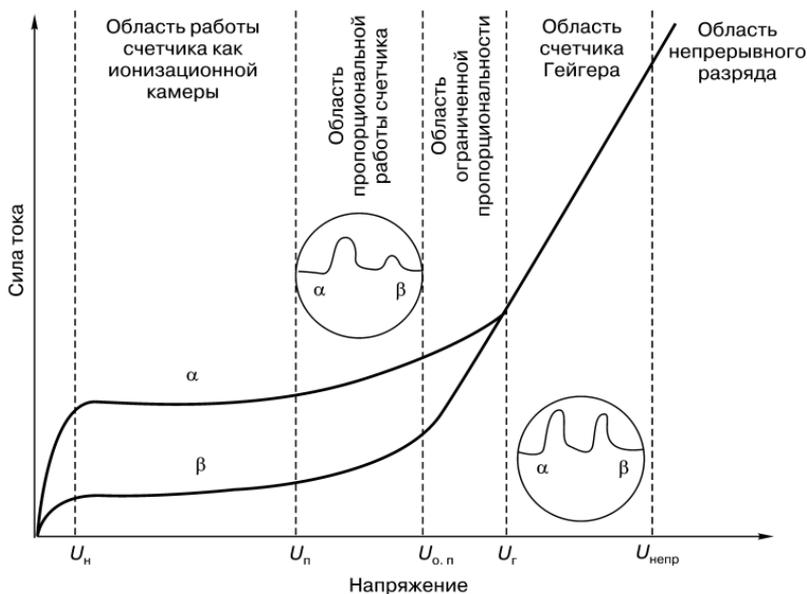


Рис. 17

Вольт-амперная характеристика ионизационного детектора излучения ионизации у альфа-излучения на два-три порядка больше, чем у двух первых.

При дальнейшем увеличении напряжения на участке $U_{п} - U_{о.п.}$ сила ионизационного тока вновь начинает возрастать, поскольку ионы, образованные излучением, а особенно электроны, приобретают при движении к электродам ускорения, достаточные для того, чтобы самим производить ионизацию вследствие соударений с атомами и молекулами газовой среды детектора (газовое усиление). Этот процесс называют ударной (вторичной) ионизацией. Чем больше напряжение, тем большую энергию приобретают ионы и, следовательно, тем больше пар ионов они создают в процессе ударной ионизации.

В области напряжений $U_{п} - U_{о.п.}$ существует строгая пропорциональность между числом первично образованных ионов и общей суммой ионов, участвующих в создании ионизационного тока. Эту область напряжений называют *областью пропорциональности*. В этом режиме работают пропорциональные счетчики.

Отношение общей суммы ионов n , участвующих в создании ионизационного тока, к числу первично образованных ионов n_0 называют коэффициентом газового усиления (КГУ):

$$\text{КГУ} = n/n_0.$$

Коэффициент газового усиления КГУ в режиме пропорциональности может достигать $10^3 \dots 10^4$.

При дальнейшем увеличении напряжения $U_{\text{о.п.}} - U_{\text{г}}$ строгая пропорциональность между числом первично образованных ионов и силой ионизационного тока нарушается. Поэтому данная область получила название *ограниченной пропорциональности*.

При еще больших значениях напряжения сила ионизационного тока уже не зависит от числа первично образованных ионов. Газовое усиление настолько возрастает (КГУ = $= 10^8 \dots 10^{10}$), что при появлении в камере детектора хотя бы одной ядерной частицы любой энергии происходит вспышка самостоятельного газового разряда, который охватывает всю камеру детектора. Область напряжений $U_{\text{г}} - U_{\text{непр}}$, при которых в детекторе возникает самостоятельный разряд, называют *областью Гейгера*. В этом режиме работают счетчики Гейгера-Мюллера.

Если продолжать увеличивать напряжение (выше значения $U_{\text{непр}}$), то детектор перейдет в область постоянного коронного разряда — непрерывного разряда, который не прекращается при удалении источника ионизирующего излучения. В этом режиме детектор выходит из строя. Это положение необходимо учитывать при работе с газоразрядными счетчиками.

Ионизационные камеры. Одним из распространенных детекторов излучения являются ионизационные камеры (рис. 18). Их применяют для измерения всех типов ядерных излучений. По конструктивному оформлению ионизационные камеры могут быть плоские, цилиндрические и сферические с объемом воздуха $0,5 \dots 5$ л. Есть миниатюрные ионизационные камеры — наперстковые, смонтированные в футляре, по форме похожие на авторучку. Их используют как индивидуальные дозиметры (ИД-1 (ДК-0,2), КИД-2, ДП-22В, ДП-24 и др.). Воздушный объем таких ка-

мер колеблется от нескольких кубических сантиметров до их долей.

Камеры с большим объемом более чувствительны, поэтому для измерения малых доз излучения используют камеры с большим объемом.

В плоской ионизационной камере электроды имеют вид пластин. Они заключены в корпус и разделены газовым слоем. Цилиндрическая ионизационная камера состоит из полого цилиндра, по оси которого расположен металлический стержень — собирающий электрод. Высокое напряжение подводят к собирающему электроду, а цилиндрический корпус заземляют. Собирающий электрод всегда хорошо изолирован и обычно снабжается заземленным охранным кольцом, препятствующим проникновению токов утечки от высоковольтного электрода. Охранное кольцо в значительной степени снижает требования к материалам электроизоляции и повышает точность измерения. Высокочувствительные цилиндрические камеры измеряют ионизационный ток силой до $10^{-14} \dots 10^{-15}$ А.

Для работы ионизационной камеры существенны: материал, толщина стенок, величина и форма камеры, природа и состояние наполняющего газа, пространственное распространение излучения в камере и способ измерения силы ионизационного тока. 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:

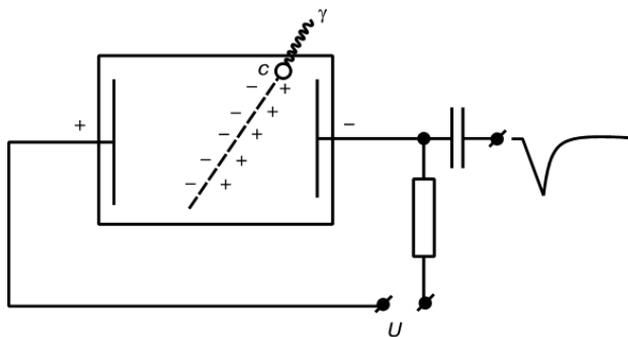


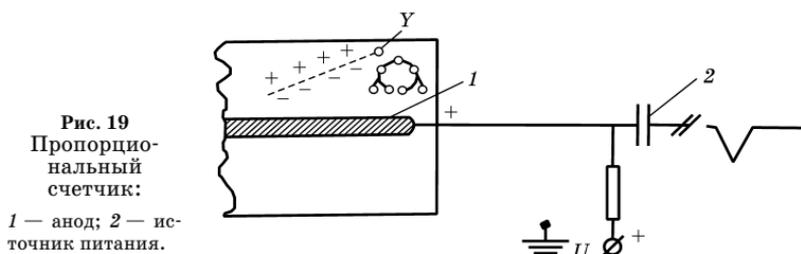
Рис. 18
Ионизационная камера

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.

Ионизационные камеры в зависимости от назначения и конструкции могут работать в импульсном и токовом (интегральном) режимах. Импульсные камеры используют для регистрации отдельных тяжелых заряженных частиц (альфа-частиц, протонов и т. д.). Удельная ионизация легких частиц (электронов и позитронов) сравнительно мала, поэтому регистрация их в импульсном режиме неэффективна. Токовые 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. Поэтому они могут быть отградуированы в единицах мощности дозы. Следовательно, ионизационные камеры могут быть использованы для измерения не только дозы излучения, но и ее мощности. Более подробно характеристики ионизационных камер изложены в технических инструкциях по их эксплуатации, с которыми студенты знакомятся на практических занятиях.

Пропорциональные счетчики. Они выгодно отличаются от ионизационной камеры тем, что начальное усиление первичной ионизации происходит внутри самого счетчика ($K_{ГУ} = 10^3 \dots 10^4$). 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, вдоль оси которого натягивают металлическую нить — анод (рис. 19). Проводящее покрытие внутренней поверхности цилиндра служит катодом. При таком устройстве все электрическое поле сосредоточивается около нити и его мак-



симальное значение оказывается тем выше, чем меньше радиус нити. Поэтому необходимые для газового усиления большие напряженности полей удается получить при сравнительно небольших разностях потенциалов между корпусом счетчика и нитью. В электрическую цепь пропорциональный счетчик включают так же, как ионизационную камеру. Пропорциональные счетчики изготовляют и торцового типа (СИ-ЗБ и др.). 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. Есть счетчики открытые, рабочая полость которых сообщается с внешним воздухом. Такие счетчики работают при атмосферном давлении, они допускают непрерывное протекание или циркуляцию наполняющего их газа, и поэтому их часто используют для регистрации активности газовых проб.

В целях повышения эффективности регистрации излучений пропорциональные счетчики иногда делают в виде плоских многонитевых детекторов (СБТ-10).

Счетчики Гейгера—Мюллера. Это газоразрядные счетчики (см. рис. 20), которые конструктивно мало чем отличаются от пропорциональных счетчиков цилиндрического и торцового типов. Основное отличие состоит в том, что внутренний объем счетчика Гейгера наполнен инертным газом при пониженном давлении (15...75 гПа), а работа осуществляется в области Гейгера, т. е. в режиме самостоятельного газового разряда (см. рис. 17).

Рассмотрим механизм газового разряда в счетчиках. При попадании ядерной частицы в счетчик происходит первичная ионизация газовой среды. Образовавшиеся положительные

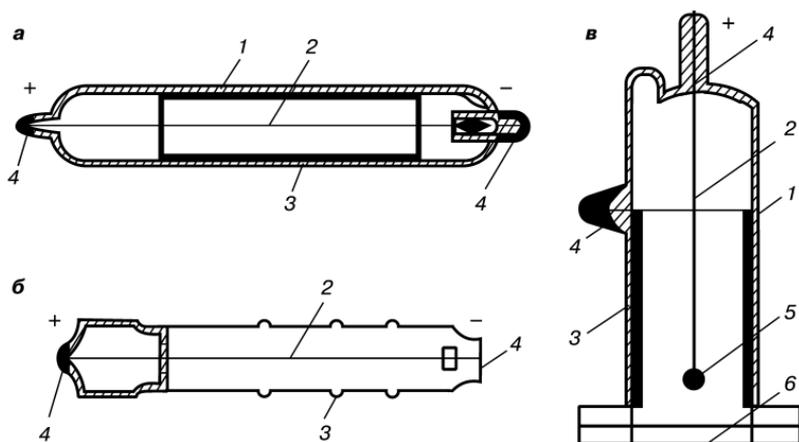


Рис. 20

Схема устройства газоразрядных счетчиков:

а — цилиндрический со стеклянными стенками для регистрации γ -излучения; *б* — цилиндрический с металлическими стенками для регистрации β -излучения; *в* — торцовый счетчик: 1 — стеклянный баллон, 2 — анод (вольфрамовая нить), 3 — катод (металлический цилиндр), 4 — колпачки выводов, 5 — стеклянная бусинка, 6 — тонкое слюдяное окно.

ионы движутся к катоду — к стенке счетчика, а электроны к аноду — к нити. Малая площадь анода по сравнению с поверхностью катода создает в области нити большую плотность силовых линий, поэтому здесь напряженность электрического поля достигает величин области Гейгера.

Под влиянием высокой разности потенциалов между электродами и пониженного давления в счетчике электроны, движущиеся к центральному электроду (аноду), приобретают большие ускорения и производят ударную вторичную ионизацию. Новые ионы, в свою очередь, приобретают скорость, при которой они способны вызвать ионизацию. Одновременно с ударной ионизацией дополнительным источником электронов становятся образовавшиеся положительные ионы. Двигаясь со значительным ускорением к катоду, они выбивают из стенки счетчика значительно больше электронов, чем необходимо для нейтрализации положительных ионов. Эти электроны еще более увеличивают лавинный эффект. Кроме того, в результате соударений атомов и молекул газовой среды с быстро движущимися ионами происходит возбуждение атомов и молекул, которое сопрово-

ждается испусканием ультрафиолетового излучения, способного также вызвать ионизацию. Эффект первоначальной единичной ионизации увеличивается во много раз, в результате чего весь чувствительный объем счетчика охватывается разрядом. Коэффициент газового усиления может достигать $10^8 \dots 10^{10}$.

Если во время быстро нарастающей вторичной ионизации в счетчик проникнет следующая ядерная частица, то она не будет зарегистрирована счетной установкой, поскольку произведенная ею 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. Обычно применяют пары многоатомных спиртов в соотношении: 90% аргона и 10% паров спирта.

Органическая добавка (гасящий компонент) обеспечивает нейтрализацию положительных ионов аргона путем отдачи слабосвязанных электронов, а также поглощение квантов ультрафиолетового излучения, выбивающих из стенок счетчика электроны. Таким образом, молекулы многоатомного газа (спирта) приостанавливают вторичную ионизацию («гасят» разряды) и счетчик становится готовым к регистрации следующей частицы.

Время, в течение которого счетчик не может зарегистрировать попавшую в него частицу (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. Эффективность счета выражает отношение числа зарегистрированных импульсов к активности (полному числу распадов, происходящих в радиоактивном источнике). Ее определяют путем измерения излучения образцовых радиоактивных источников с известной активностью (эталонов).

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. Обычно это случается после регистрации $10^8 \dots 10^9$ ядерных частиц. Чтобы продлить срок работы счетчика, не следует подавать излишне высокие напряжения. С этой целью необходимо перед началом работы снять счетную характеристику и определить рабочее напряжение счетчика.

Счетная характеристика выражает зависимость скорости счета (числа импульсов в минуту) от напряжения, приложенного к счетчику. Область напряжений, в которой устанавливается постоянство скорости счета в единицу времени, получила название «плато счетчика» (рис. 21). Чем больше протяженность и меньше наклон плато, тем лучше счетчик. В самогасящихся счетчиках протяженность плато достигает 200...300 В, наклон плато — 3...5% для торцовых и 12...15% для цилиндрических счетчиков на каждые 100 В. Рабочее напряжение обычно выбирают на расстоянии $1/3$ от начала плато.

Счетчики Гейгера–Мюллера применяют для регистрации всех видов излучений, но чаще для бета- и гамма-излучений. Конструкция счетчиков определяется теми задачами, которые они призваны решать. Для счета альфа- и бета-частиц малых энергий (0,1...0,2 МэВ) применяют торцовые счетчики (МСТ-17, СБТ и др.) с тонким входным окном (1...5 мг/см²). Эти счетчики могут регистрировать и жесткое бета-излучение.

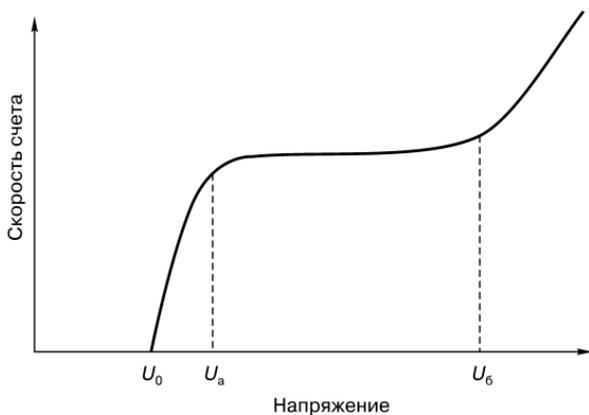


Рис. 21
Счетная характеристика счетчика Гейгера–Мюллера:

U_0 — начало счета;
 U_a – U_6 — плато счетчика.

Для обнаружения бета-излучений средней и большой энергии используют цилиндрические счетчики (СБМ-19, СБМ-20 и др.), имеющие стенки из нержавеющей стали или алюминия толщиной 40...45 мг/см².

Счетчики для регистрации гамма-излучения имеют некоторую особенность в конструкции. Регистрация гамма-излучения возможна в результате выбивания вторичных электронов из катода счетчика на основе известных трех механизмов взаимодействия этого излучения с веществом: фотоэффекта, комптон-эффекта, образования электронно-позитронных пар. Вторичные электроны (фотоэлектроны, электроны отдачи, электронно-позитронные пары), попадая в чувствительный объем счетчика, вызывают газовый разряд (ударную ионизацию), который и регистрируется радиометрическим устройством. Вследствие того что гамма-кванты слабо поглощаются веществом, эффективность гамма-счетчиков очень мала и не превышает 1%. Для повышения эффективности счета гамма-квантов стенки гамма-счетчиков делают из материалов с большим атомным номером и более толстыми (с учетом величины максимального пробега вторичных электронов в данном веществе). Промышленные гамма-счетчики, как правило, цилиндрические и имеют стеклянные стенки. Катодом у них служит напыленный на внутреннюю поверхность стекла слой графита, меди, никеля или вольфрама. Наполнитель — смесь аргона и паров спирта. В практической работе применяют счетчики ГС, МС-4, МС-6, МС-17, ВС-7, ВС-9 и другие, длина и диаметр которых варьируют в широких пределах — от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.

Галогенные счетчики. Отдельную группу составляют так называемые галогенные счетчики, у которых гасящим компонентом служат галоиды. Добавка незначительного количества (~ 0,1%) таких двухатомных газов, как Cl₂, Br₂, J₂, к неону или аргону резко снижает начальный потенциал «зажигания» самостоятельного разряда и делает эти счетчики самогасящимися. Низкое рабочее напряжение (300...400 В) позволяет применять галогенные счетчики для измерений в нестационарных полевых условиях. В качестве источника питания можно использовать сухие батареи. Преимущество

галогенных счетчиков состоит еще и в том, что срок их службы практически не ограничен, так как «гашение» разряда не связано с диссоциацией молекул галоида. Однако галогенные счетчики имеют и существенный недостаток — короткое плато счетной характеристики (~ 80 В) с большим наклоном (12...15% на 100 В). Это ограничивает применение галогенных счетчиков для точных измерений радиоактивных образцов. Промышленность выпускает несколько типов галогенных счетчиков: СИ-1Г, СИ-1БГ, СИ-ЗБГ, СБТ и др.

Сцинтилляционные счетчики. В некоторых веществах (сцинтилляторах, фосфорах) под действием излучений происходят ионизация и возбуждение атомов. При переходе атомов из ионизированного и возбужденного состояний в основное высвечивается энергия в виде вспышки света (сцинтилляции), которая может быть зарегистрирована различными способами. Лучший из них состоит в преобразовании энергии света в электрический сигнал с помощью оптически связанного со сцинтиллятором фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

Фотоэлектронный умножитель совмещает свойства фотоэлемента и усилителя тока с большим коэффициентом усиления ($10^6 \dots 10^9$). ФЭУ состоит из фотокатода, анода и динодов (эмиттеров), покрытых сурьмяно-цезиевой смесью либо изготовленных из специальных сплавов алюминия, магния и серы, обладающих большим коэффициентом вторичной эмиссии электронов. Вся система ФЭУ размещена в стеклянном баллоне с высоким вакуумом, необходимым для сохранения поверхностей фотослоя и динодов, а также для свободного движения электронов.

В сцинтилляционном счетчике ФЭУ работает в импульсном режиме. Под действием светового импульса, возникшего в сцинтилляторе, из фотокатода в результате фотоэффекта выбиваются электроны, которые собираются электрическим полем и направляются на первый эмиттер (динод), ускоряясь до энергии, достаточной для выбивания вторичных электронов из следующего эмиттера (рис. 22). Умножение числа электронов происходит при попадании потока первичных электронов на эмиттер. Выбитые при ударе электроны фокусируются на последующий динод, из которого они вновь выбивают примерно удвоенное количество электронов и т. д.

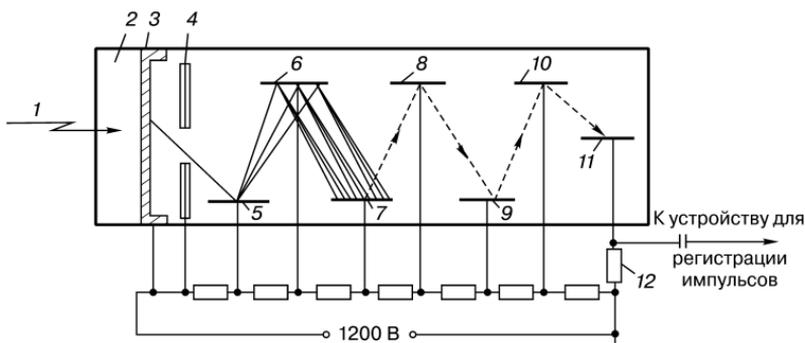


Рис. 22

Принципиальная схема сцинтиляционного счетчика:

1 — ионизирующее излучение; 2 — сцинтиллятор; 3 — фотокатод ФЭУ; 4 — фокусирующая диафрагма; 5–10 — диноды; 11 — анод; 12 — нагрузочное сопротивление.

Таким образом, лавина электронов возрастает от катода к аноду; происходит преобразование очень слабых световых вспышек, возникающих в сцинтилляторе, в регистрируемые электрические импульсы.

Сцинтиляционные счетчики обладают более высокой эффективностью счета (до 100%) и разрешающей способностью по сравнению с газоразрядными счетчиками. Разрешающая способность сцинтиляционных счетчиков достигает 10^{-5} с при регистрации альфа-частиц и 10^{-8} с при регистрации бета-частиц и гамма-квантов. Однако указанные характеристики зависят от примененного сцинтиллятора (фосфора).

По составу сцинтилляторы делят на неорганические и органические, а по агрегатному состоянию — на твердые, пластические, жидкие и газовые. Из неорганических сцинтилляторов для регистрации бета- и гамма-излучений удобно использовать йодистый натрий (цезий), активированный таллием — $\text{NaI}(\text{Tl})$, а также вольфрамат кальция — CaWO_4 , поскольку они могут быть получены в виде больших прозрачных монокристаллов. Для регистрации нейтронов применяют сцинтилляторы из йодистого лития — $\text{LiI}(\text{Sn})$, а тяжелых частиц (альфа-частиц, осколков деления) — сцинтилляторы на основе сернистого цинка (кадмия), активированного серебром $\text{ZnS}(\text{Ag})$. Сернистый цинк и сернистый кадмий представляют собой мелкие кристаллики, которые обычно наносят тонким слоем на стеклянную подложку, так как только

тонкие слои таких кристаллических порошков прозрачны для светового излучения. Неорганические сцинтилляторы обладают довольно большим временем высвечивания (большое мертвое время) — порядка 10^{-6} с.

Из органических сцинтилляторов используют монокристаллы антрацена ($C_{14}H_{10}$), стиблена ($C_{14}H_{12}$), пара-терфинила ($C_{13}H_{14}$ и др.); пластмассы (твердые растворы сцинтилляторов на основе полистирола и поливинилтолуола), жидкие фосфоры (например, раствор терфинила) и инертные газы — гелий, аргон, неон и др. Органические и газовые сцинтилляторы характеризуются малым временем высвечивания ($10^{-8} \dots 10^{-9}$).

Весь сцинтилляционный счетчик (сцинтиллятор, световоды ФЭУ) заключен в светонепроницаемый кожух, чтобы исключить попадание постороннего света на фотокатод и диоды ФЭУ. Умножитель защищен от внешних электрических и магнитных полей, которые нарушают фокусировку электронов.

Полупроводниковые детекторы. Такие детекторы представляют собой твердотельную ионизационную камеру, в которой роль носителей электрического заряда выполняют элек-

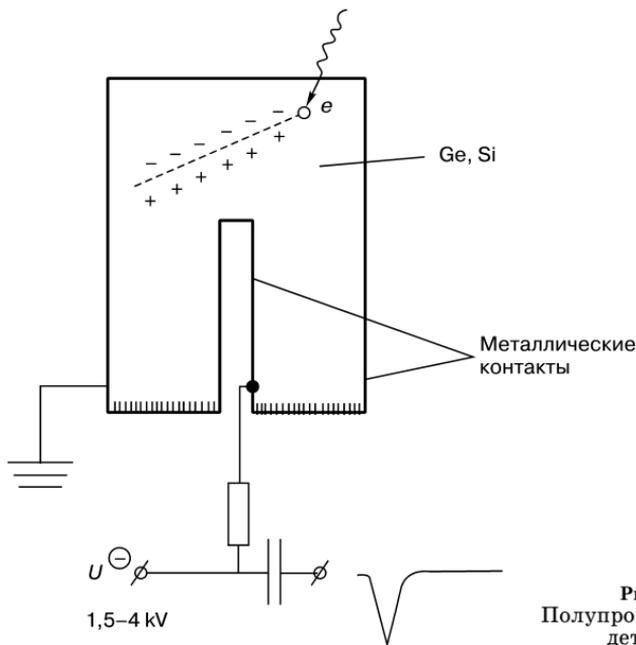


Рис. 23
Полупроводниковый
детектор

троны и так называемые дырки (рис. 23). 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 микрометров, 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.

Ядерные фотографические эмульсии. Первым способом обнаружения ядерных излучений, позволившим открыть радиоактивность, исторически стал фотографический метод. Он основан на том, что излучение, взаимодействуя с галогенидами серебра (AgBr или AgCl) фотографической эмульсии (фотоэмульсии), восстанавливает металлическое серебро подобно видимому свету, которое после проявления выделяется в виде почернения.

Степень почернения фотоэмульсии (фотопластинки) пропорциональна дозе излучения. На этом принципе основан получивший широкое распространение индивидуальный дозиметрический фотоконтроль (ИФК) для лиц, работающих с бета- и гамма-излучением.

В настоящее время фотографический метод широко применяют в ядерной физике при исследовании свойств самых различных заряженных частиц, их взаимодействий и ядерных реакций. Для этих целей были созданы специальные ядерные фотоэмульсии, толстослойные специальные ядерные фотоэмульсии и толстослойные фотопластинки. Фотографический метод дает хорошие результаты при абсолютных измерениях небольших активностей.

В биологии он сформировался в специальный метод, называемый автордиографией (см. Метод автордиографии).

Детекторы, основанные на химических методах регистрации излучений. При химических методах регистрации излучений учитывают те или иные химические изменения, возникающие под влиянием излучения (например, изменение цвета растворов или кристаллических тел, выделение газов, осаждение некоторых коллоидов и т. п.); степень изменения пропорциональна поглощенной энергии излучения.

Широко распространен ферросульфатный детектор, основанный на окислении под воздействием излучений двухвалентного иона железа Fe^{2+} в трехвалентный ион Fe^{3+} . При поглощении 100 эВ энергии ионизирующего излучения образуется 15,6 иона Fe^{3+} . Концентрацию образованных ионов Fe^{3+} в молях на 1 л раствора определяют на спектрометре. Максимальный предел измерения дозы — до 500 Гр.

Часто применяют также цериевый детектор. Концентрацию Ce^{4+} определяют до и после облучения спектрометрически или титрованием. Измерение дозы возможно до $12 \cdot 10^4$ Гр.

Под воздействием излучений изменяется молекулярный состав газов. Этим пользуются в газовых детекторах.

Некоторые прозрачные пластмассы (полистирол, полиметилметакрилат и др.) и сорта стекол (фосфатные, активированные серебром) темнеют под воздействием бета- и гамма-излучений. Коэффициент поглощения света для них растет линейно с увеличением дозы облучения. Дозу измеряют до $2 \cdot 10^6$ Гр.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

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

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.

Дозиметры предназначены для измерения эквипозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений, поглощенной

дозы излучений, мощности экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений, мощности поглощенной дозы и интенсивности ионизирующих излучений.

Спектрометры предназначены для измерения распределения излучений по энергии, заряду и массам, а также пространственно-временных распределений излучений.

РАДИОМЕТРЫ

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.

Детектор служит для обнаружения ионизирующих излучений и преобразования энергии излучения в другие виды энергии (например, в электрическую), удобные для регистрации. Амплитуда сигналов (величина заряда в импульсе), поступающих от детекторов, как правило, недостаточна для того, чтобы их можно было зарегистрировать непосредственно. Поэтому обязательными узлами большинства приборов, предназначенных для измерения ионизирующих излучений и использующих детекторы дискретного типа, являются импульсные усилители. В усилителе импульсы усиливаются, формируются и затем поступают на пересчетный прибор. Иногда сигнал с выхода усилителя подвергается амплитудному отбору с помощью интегрального дискриминатора (ИД), который вырабатывает выходной сигнал стандартной амплитуды. Основными компонентами радиометров остаются пересчетные приборы. Они служат для измерения числа импульсов, поступающих в заданный промежуток времени от детектора (непосредственно или после отбора по какому-либо

параметру), или для измерения среднего числа этих импульсов, поступающих от детектора в единицу времени. Пересчетные приборы называют также счетчиками импульсов.

Принципы построения пересчетных приборов сохранились те же, что были предложены в 1950-х годах, хотя в настоящее время существенно улучшились их эксплуатационные характеристики.

В одноканальном счетчике импульсов регистрация сигналов, как правило, ведется по двум измерительным трактам — в одном измеряется число импульсов N , поступающих от детектора, а в другом — число сигналов от времязадающего генератора, так что время измерения

$$T = N_t/f,$$

где f — частота генератора.

В пересчетных приборах чаще всего предусматривают по крайней мере два режима работы: регистрации числа импульсов N , поступивших за время T_0 , задаваемое оператором, или времени T , необходимого для набора задаваемого оператором числа импульсов N_0 (измерение с заданной предельной статистической погрешностью $Q = 1/\sqrt{N}$).

Используют и режим, при котором задают одновременно параметры N_0 и T_0 и прекращают счет импульсов после достижения какого-либо одного из этих параметров.

В зависимости от назначения прибора и его структуры пересчетный прибор может быть последним звеном измерительного канала, и данные из него выводят на индикаторные элементы для визуального определения результатов измерений (декатрон, стрелочный индикатор, самописец, звуковое или световое сигнальное устройство и т. п.).

Данные с пересчетного устройства могут быть введены для дальнейшей обработки в микропроцессорное устройство или микро-ЭВМ, а уже затем информация выводится на индикаторы, экран дисплея и т. д.

К радиометрам стационарного типа (рис. 24а, б) можно отнести малофоновую установку УМФ-2000, одноканальный счетный прибор УС-6 и др. Названные приборы — стандартизованные средства измерения, и их можно рекомендовать для оснащения радиологических подразделений с целью про-

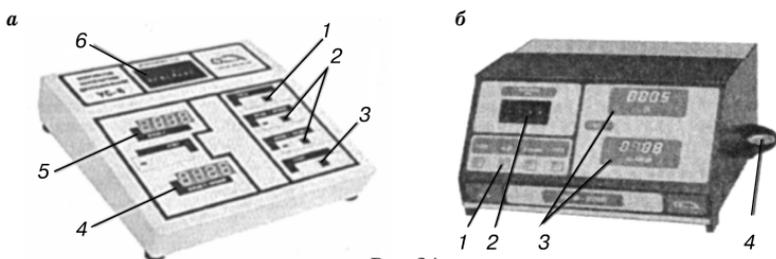


Рис. 24
Радиометры:

а — пересчетный прибор УС-6: 1 — кнопка «Пуск», 2 — кнопка индикации времени или счета, 3 — кнопка «Стоп», 4 — индикатор времени, 5 — индикатор счета, 6 — экспозиция; *б* — альфа-бета радиометр УМФ-2000: 1 — кнопки управления, 2 — экспозиция, 3 — индикаторные элементы, 4 — устройство подачи счетных образцов.

ведения радиационного контроля кормов и продуктов животноводства за содержанием радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{40}K и др.

Широкое внедрение в практику радиоиммунологических методов анализа (РИА) привело к созданию специализированных для РИА радиометрических установок, таких как RIA-GAMMA (ЛКВ-Швеция), «Гамма-2» и «Гамма-12» (для регистрации гамма-излучения с помощью твердых сцинтилляционных счетчиков). Радиометры Rack-Beta и «Бета-2» служат для регистрации бета-излучения с помощью жидких сцинтилляционных счетчиков. Перечисленные приборы снабжены системой автоматической подачи и смены образцов для счета. Управление приборами осуществляется посредством программирования всех необходимых параметров счета и обработки результатов.

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.

Из переносных радиометров можно назвать универсальный радиометр РУП-1 и КРБ-1 (рис. 25), предназначенный для обнаружения и измерения степени загрязнения различных поверхностей альфа- и бета-активными веществами, а также для определения мощности дозы гамма-излучения в широких диапазонах и плотности потока тепловых и быстрых нейтронов. Прибор РУП-1 можно использовать для ведения радиационной разведки на местности при мощности дозы гамма-излучения до 60 Р/ч. Питание прибора — от сети переменного тока, или от четырех аккумуляторов СИС-1,5, или от гальванической батареи 11.5-ПМЦГ-V-1.3. Он имеет звуковую, световую и цифровую индикацию излучений и может быть использован как в лабораторных, так и в полевых условиях. Бета- и гамма- радиометр-рентгенметр ДП-5 может быть использован в полевых и лабораторных условиях для измерения степени загрязнения различных поверхностей бета-активными веществами и уровня гамма-радиации в миллирентгенах в час.

Переносной радиометр СРП-68-01 или РСУ-01 «Сигнал», СКС-99 «Спутник» применяют для прижизненного определения содержания радиоактивного цезия в мышечной ткани сельскохозяйственных животных. Радиометр КРБ-1 (рис. 25) предназначен для контроля степени загрязнения различных поверхностей бета-активными веществами в диапазоне от $1 \cdot 10^1$ до $1 \cdot 10^7$ расп/(мин·см²). Погрешность измерения не превышает 20%.

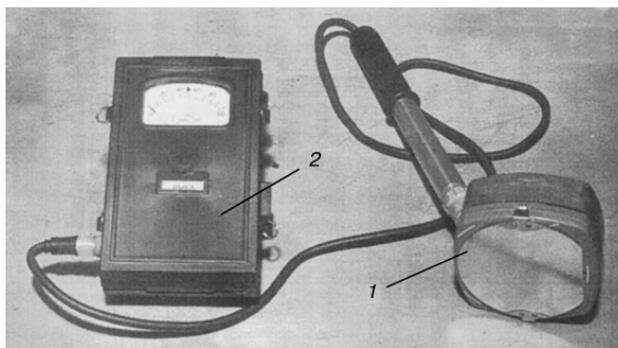


Рис. 25
Радиометр КРБ-1:

1 — детектор; 2 — измерительный пульт.

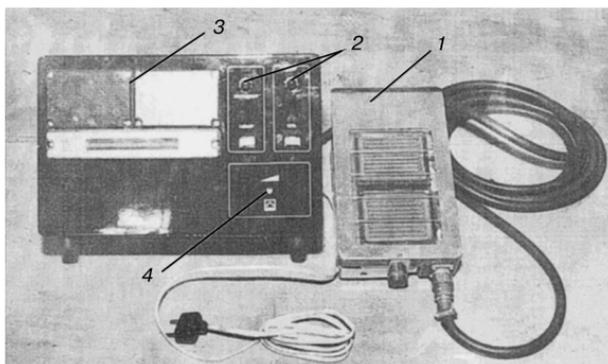


Рис. 26
Переносный радиометр СЗБ-04:

1 — блок детектирования; 2 — настройка режима работы; 3 — блок сигнализации; 4 — регулятор чувствительности.

Сигнализаторы загрязненности СЗБ-03 и СЗБ-04 (рис. 26) применяют в радиохимических лабораториях, санпропускниках и т. п. для измерения степени загрязнения рук и различных поверхностей бета-активными веществами, а также для сигнализации о превышении пороговой скорости счета импульсов. Питание прибора от сети переменного тока.

ДОЗИМЕТРЫ

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. 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. Конструктивно приборы этого типа (рис. 27) разделены на два функционально самостоятельных узла: выносной детектор и сигнально-измерительный пульт для сигнализации о превышении установленной мощности дозы. Иногда используют многоканальные дозиметрические устройства, что позволяет измерять одним регистрирующим устройством информацию, попадающую от нескольких десятков детекторов. В ряде случаев дозиметры имеют дополнительные узлы для вывода информации на ленту самописца или экран дисплея, а также для передачи звуковой или световой сигнализации о превышении дозы облучения выше допустимого уровня. Дозиметры подобного типа незаменимы для контроля дозы и мощности дозы излучения, получаемой объектом, подвергающимся специальному облучению, при использовании радиационной технологии в сельском хозяйстве, контроле уровня радиации в хранилищах, очистных сооружениях, при лучевой терапии и т. д. К приборам этого типа можно отнести стационарный сигнализатор превышения мощности дозы СД-1М, измеритель мощности дозы ИМДЦ-70, сигнально-измерительный двухканаль-

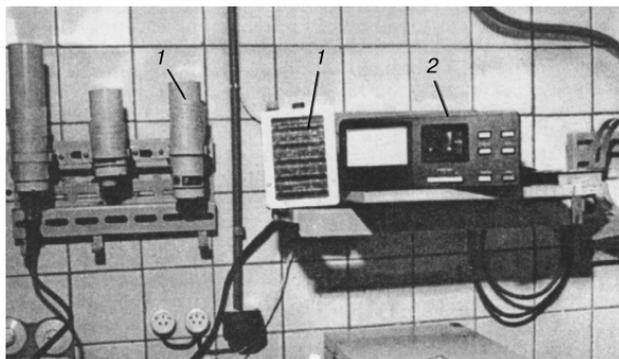


Рис. 27
Стационарный дозиметр СПСС-02:

1 — блоки детектирования; 2 — сигнально-измерительный прибор.

ный дозиметр УСИТ-2, многоканальную установку дозиметрического контроля «Система», дозиметр Vj-18, клинический дозиметр 1227, двухканальный лабораторный прибор УИМ2 для дозиметрического и технологического контроля с блоками детектирования альфа-, бета-, гамма- и нейтронного излучения. Сигнализатор превышения пороговой скорости счета импульсов СПСС-02 (рис. 27) применяют для контроля радиационной обстановки в помещениях атомных электростанций, в радиохимическом производстве, в лабораториях, санпропускниках и очистных сооружениях. В случае повышения установленного порога скорости счета импульсов (альфа-, бета- и гамма-излучений) прибор дает световой сигнал.

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.

В последнее время в Госреестр внесены ряд новых средств измерений, которые могут быть успешно использованы в радиологических подразделениях ветеринарной службы. Среди них можно выделить дозиметр-радиометр ДКС-96 (рис. 28),

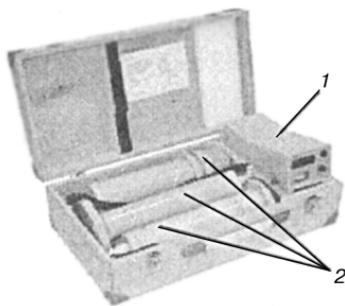


Рис. 28
Дозиметр-радиометр ДКС-96:
1 — измерительный пульт; 2 — блоки детектирования альфа-, бета- и гамма-излучения.

пользующийся большой популярностью из-за своей простоты, универсальности и надежности. Девять типов блоков детектирования полностью обеспечивают выполнение всех задач дозиметрического и радиометрического контроля окружающей среды, рабочих мест и радионуклидных установок. По мере необходимости возможно постепенное дооснащение прибора дополнительными блоками детектирования альфа-, бета-, гамма- и нейтронного излучения.

Для проведения дозиметрических измерений в полевых и лабораторных условиях можно использовать и другие дозиметры (например, ДП-5, ИД-1, СРП-68-01), которые по принятой классификации относят к носимым (полевым). Носимые (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.

В ветеринарных радиологических лабораториях широко используют полевые рентгенометры и измерители мощности дозы ДП-5 (рис. 29) для измерения уровня гамма-радиации в диапазоне от 0,05 мР/ч до 200 Р/ч, а также степени загрязнения различных объектов бета-излучающими нуклидами. Дозиметр СРП-68-01 (рис. 30) применяют для обнаружения радиоактивных веществ по гамма-излучению и измерения мощности дозы в диапазоне от 10 до 3000 мкР/ч. Измеритель мощности дозы ДКГ-01 «Сталкер» имеет устройство для определения географических координат, что дает возможность использовать его для ведения автомобильной радиационной разведки. К этому типу приборов можно отнести также дозиметры ДРГ-01Т1 (рис. 31), ДБГ-06Т и др. Дозиметр-радиометр АНРИ-01 («Сосна»), индикатор внешнего гамма-излучения «Белла», бытовые дозиметры, такие как ДБГ-01Н, МС-04Б

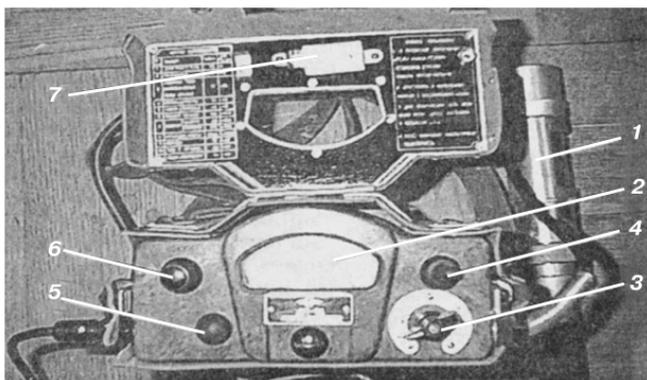


Рис. 29

Рентгенометр (измеритель мощности дозы) ДП-5:

1 — зонд; 2 — шкала прибора; 3 — переключатель поддиапазонов; 4 — ручка «Режим»; 5 — тумблер подсветки шкалы; 6 — кнопка сброса показаний; 7 — контрольный источник.

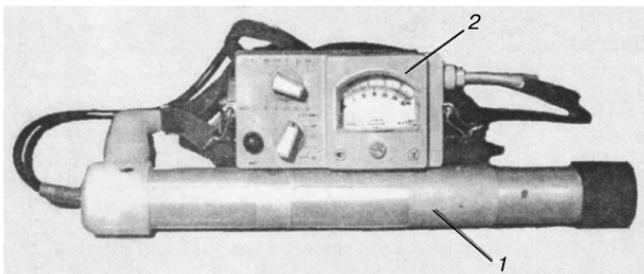


Рис. 30

Дозиметр СРП-68-01:

1 — сцинтиляционный блок детектирования; 2 — измерительный пульт.

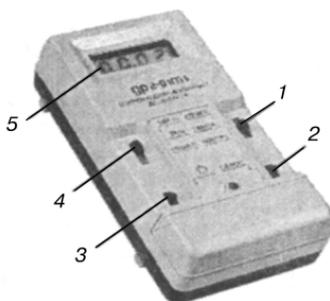


Рис. 31

Дозиметр ДРГ-01Т1:

1 — переключатель режимов работы; 2 — кнопка «Сброс»; 3 — кнопка подсветки; 4 — переключатель диапазонов; 5 — индикаторные элементы.



Рис. 32

Дозиметры-индикаторы бытовые: ДБГ-01Н, МС-04Б, «Эксперт»

«Эксперт» (рис. 32), могут быть использованы с целью оперативного контроля радиационной обстановки на местности, в рабочих и жилых помещениях, на животноводческих фермах и т. д. Дозиметр-радиометр МКС-06Н «Инспектор» позволяет измерить мощность эквивалентной дозы гамма-излучения от 0,1 до 1000 мкЗв/ч, плотность потока бета-частиц с загрязненных поверхностей от 1 до 10000 частиц/(см²/мин), удельную активность бета-излучающих нуклидов в различных объектах в диапазоне от 0,1 до 1000 кБк/кг, степень загрязнения поверхностей альфа-активными веществами в лабораториях, на местности и в промышленности в диапазоне от 1 до 10000 частиц/(см²/мин).

Индивидуальные дозиметры. К группе приборов индивидуального дозиметрического контроля относят комплекты дозиметрического контроля ИД-02 (ДК-0,2), ДП-22-В, ДП-24 и др.), которые снабжены переносным зарядно-измерительным или зарядным устройством (рис. 33). Такие дозиметры предназначены для контроля при работе с рентгеновским и гамма-излучением. Они представляют собой комплект малогабаритных (наперстковых) ионизационных камер, внешне напоминающих авторучки. Носят их обычно в нагрудном кармане халата (карманные дозиметры). Принцип работы дозиметров основан на разрядке емкости предварительно за-

ряженного конденсатора ионизационной камеры под действием ионизирующего излучения.

Величина емкостей и воздушные объемы камер у КИД-2 подобраны таким образом, что обеспечивают измерения в диапазонах: $0,005 \dots 0,05$ Р и $0,05 \dots 1$ Р. Остаточное напряжение на конденсаторе камеры измеряют ламповым вольтметром, который вместе с устройством для зарядки камер составляет схему зарядно-измерительного устройства.

Комплект ИД-1 (ДК-0,2) состоит из 10 дозиметров и зарядного устройства. В отличие от КИД-2, он позволяет визуально судить о дозе излучения в процессе работы в любой момент по положению кварцевой нити, перемещающейся по шкале, видимой в окуляр, который смонтирован в одном корпусе с ионизационной камерой. Поэтому прибор называют прямопоказывающим. Диапазон измерений составляет $0,02 \dots 0,2$ Р. Погрешность градуировки по гамма-излучению в нормальных условиях $\pm 10\%$.

Дозиметры ДП-22-В и ДП-24 рассчитаны на измерение больших доз. В комплект входит набор наперстковых камер ДКП-50-А. Устройство и питание камер такое же, как и у ИД-1, т. е. такие дозиметры относятся к прямопоказывающим.

Имеются также приборы индивидуального дозиметрического контроля, чувствительным элементом которых служат люминесцентные кристаллы и фото пленки. Принцип действия индивидуальных люминесцентных дозиметров (ИЛД)

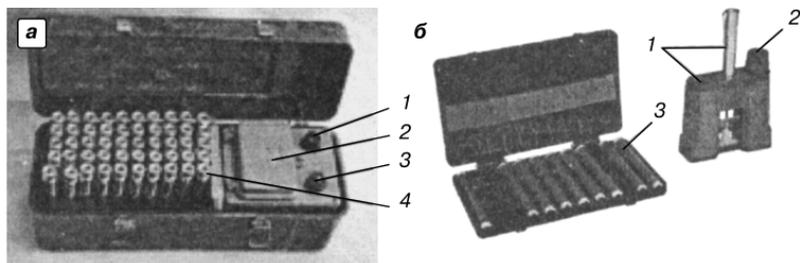


Рис. 33

Комплекты индивидуальных дозиметров:

а — комплект ДП-22-В: 1 — ручка «Режим», 2 — зарядное устройство, 3 — зарядное гнездо, 4 — дозиметр ДКП-50А; *б* — комплект ИД-02: 1 — зарядное устройство ЗД-06 со вставленным дозиметром, 2 — ручка резистора, 3 — индивидуальные дозиметры ИД-02.

основан на использовании вспышечных кристаллофосфоров. Эти фосфоры обладают свойством накапливать энергию под действием излучения пропорционально дозе, длительное время сохранять ее, а затем быстро выделять эту энергию в виде квантов света при дополнительном освещении таблеток инфракрасным светом. По яркости вспышки фосфоров судят о дозе облучения. Величина вспышки фосфоров регистрируется фотометром с измерительной схемой, чувствительным элементом которого служит фотоэлектронный умножитель. Фосфоры могут возбуждаться не только радиоактивными излучениями, но и видимым светом, поэтому таблетки фосфора упаковывают в светонепроницаемые кассеты (рис. 34).

Для определения безопасности при работе с гамма-излучением довольно широко применяют индивидуальный фотопленочный контроль, основанный на взаимодействии радиоактивного излучения с фотоэмульсией рентгеновской пленки. Под воздействием излучения фотопленка чернеет пропорционально дозе излучения. Почернение фотопленки измеряют с помощью фотометра или денситометра. Индивидуальный фотопленочный контроль осуществляют с помо-

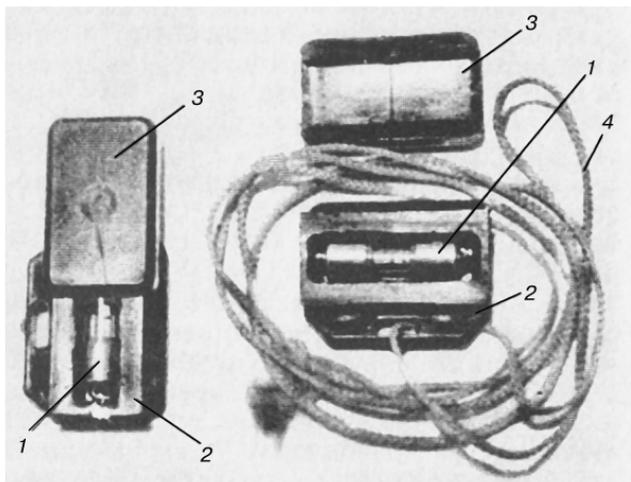


Рис. 34

Термолюминесцентный дозиметр:

1 — одиночный дозиметр; 2 — основная часть кассеты; 3 — крышка кассеты; 4 — несущий шнур.

щью комплекта ИФКУ-1. Фотопленку помещают в светонепроницаемую кассету и носят ее, как правило, в нагрудном кармане халата. По истечении определенного времени пленку проявляют и денситометрируют, сравнивая оптическую плотность почернения с контрольными фотопленками, облученными известной дозой гамма-излучения. Преимущества индивидуального фотопленочного контроля — простота и документальность. Недостатки — небольшой диапазон измерения доз (0,05...15 Р), высокая погрешность измерений (более $\pm 30\%$), длительная обработка пленки, что не позволяет быстро определить полученную дозу сразу после работы.

СПЕКТРОМЕТРЫ

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 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. Типичная схема спектрометра представлена на рис. 35.



Рис. 35
Структурная схема спектрометра

В детекторе происходит взаимодействие гамма-квантов с веществом и преобразование их энергии в электрический импульс, величина которого прямо пропорциональна энергии гамма-кванта. В спектрометрах чаще применяют сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы.

Предусилитель представляет собой чувствительный усилитель с низким уровнем собственных шумов, расположенный обычно непосредственно в детекторе или рядом с ним, чтобы свести к минимуму электрические наводки в проводах. Обычно через предусилитель подается и высокое напряжение на детектор. Главная часть любого предусилителя — полевой транзистор, подключенный непосредственно к электродам детектора или фотоэлектронного умножителя. Сочетание большой чувствительности транзистора и высокого напряжения на детекторе делает его наиболее уязвимым местом всего спектрометра. Особенно это касается полупроводниковых детекторов. При скачкообразной подаче высокого напряжения на детектор (или снятия его) полевой транзистор, как правило, выходит из строя в результате пробоя. Поэтому снимать и подавать напряжение на детектор рекомендуется плавно, без скачков.

Блок питания обеспечивает плавную подачу высокого напряжения (обычно от 500 до 4000 В) со скоростью роста напряжения 50...100 В/с (такая же скорость и снятия напряжения). Большинство блоков снабжено защитой от перегрузок, а в некоторых блоках высокого класса для полупроводниковых детекторов предусмотрено аварийное отключение при повышении температуры охлаждаемого детектора до критической (при которой детектор под напряжением выходит из строя). Блоки высокого напряжения характеризуются высокой стабильностью.

Усилитель предназначен для подготовки сигнала, поступающего с предусилителя, к обработке аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Спектрометрический усилитель не является обязательным элементом спектрометрического комплекса. Его не используют, если предусилитель дает сигнал необходимой амплитуды и формы. Усилитель имеет несколько регулировок: усиления, постоянной времени, порога дискриминатора, компенсации нуля. Все регулировки,

кроме порога дискриминатора, служат для управления формой и амплитудой импульса; дискриминатор же отсекает сигналы, амплитуды которых меньше установленного порога, т. е. убирает шум, облегчая работу аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и уменьшая нагрузку на спектрометр. Регулировка постоянной времени влияет на длительность и в какой-то мере на амплитуду импульса. Существенно, что для нормальной работы АЦП требуется, чтобы длительность импульса была одинаковой для любой амплитуды. Важная регулировка — восстановление нуля (или основной линии). Она позволяет сделать импульс почти симметричным, это является благоприятным фактором для работы АЦП.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) — сложнейшая электронная система, преобразующая значение амплитуды импульса в цифровой код. АЦП имеет некоторое количество каналов или цифровых ячеек. Обычно число ячеек 1024; 4096 или 8192, т. е. кратно 2; действительно, $1024 = 2^{10}$; $4096 = 2^{12}$; $8192 = 2^{13}$. Степень двойки означает разрядность АЦП. Говорят, что АЦП имеет 12 разрядов или 4096 каналов. Иногда используют обозначения $2^{10} = 1 \text{ К}$; $2^{12} = 4 \text{ К}$; $2^{13} = 8 \text{ К}$. Когда на вход АЦП приходит импульс напряжения, его амплитуда превращается в цифру, лежащую в диапазоне от 0 до 1024 (в случае, если АЦП имеет 10 разрядов) или от 0 до 4096 (если АЦП имеет 12 разрядов) и т. д. После этого в канал с номером, равным этой цифре, добавляется 1. И так далее для всех импульсов. В итоге в каналах АЦП набирается гистограмма амплитуд импульсов, которая является спектром гамма-излучения в цифровом виде.

Цифровой вид спектра не слишком удобен для работы, поскольку чаще всего требуется оперативная информация о виде спектра, т. е. о его графической форме. График можно построить на бумаге, используя номер канала и значение амплитуды в канале. Как правило, сейчас это делается автоматически на экране осциллографа или компьютера. Такой способ представления информации позволяет рассмотреть общий вид спектра, выделить его часть и рассмотреть в подробностях, изменить вертикальный и горизонтальный масштабы и т. д. Типичный вид спектра ^{137}Cs , полученного

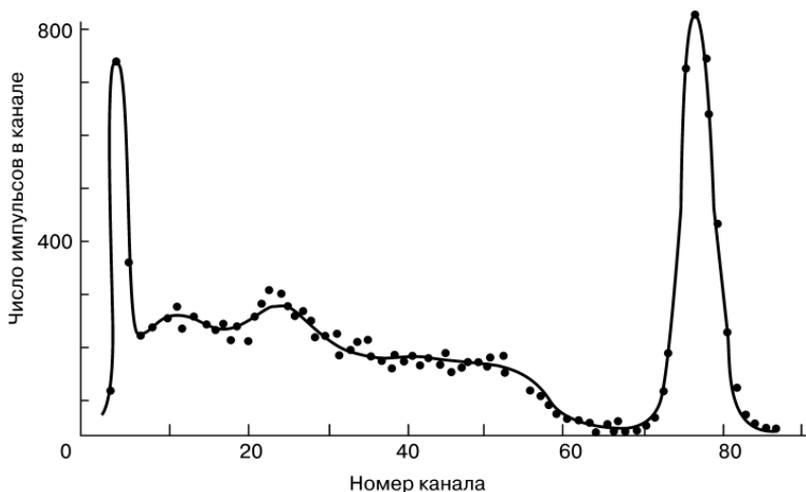


Рис. 36
Типичная форма спектра ^{137}Cs

на сцинтилляционном детекторе с помощью компьютера, представлен на рис. 36.

Для анализа проб объектов ветеринарного надзора, имеющих сложный радионуклидный состав, удобно использовать универсальный спектрометрический комплекс типа «Гамма-Плюс», «Прогресс» (рис. 37) с блоками детектирования альфа-, бета- и гамма-излучения и гамма-спектрометр с полупроводниковым детектором в свинцовой защите.

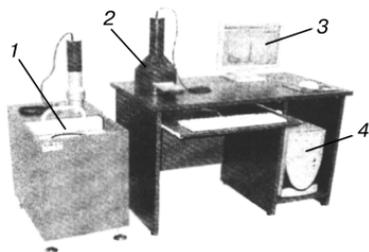


Рис. 37
Измерительный комплекс
«Прогресс-2000»:

1 — блок детектирования гамма-излучения; 2 — блок детектирования бета-излучения; 3 — монитор; 4 — компьютер.

Переносной спектрометрический комплекс MSPS-50Ge оснащается программным обеспечением, позволяющим управлять всеми функциями и параметрами спектрометра и проводить обработку полученной спектрометрической информации для определения объемной, удельной или поверхностной активности радионуклидов и мощности дозы излучения каждого радионуклида.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ

Радиоактивность препаратов можно определить абсолютным, расчетным и относительным (сравнительным) методами. Наиболее широко на практике 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 четырехпипной геометрии (4π-геометрии). В этом случае радиоактивность препаратов выражается не в импульсах в единицу времени, а в единицах активности (Бк, кБк, МБк). Для этих целей используют 4π-счетчики, конструкция которых позволяет поместить счетный образец внутрь счетчика (газоплотный счетчик, жидкостной сцинтилляционный счетчик и др.). При использовании таких счетчиков число сосчитанных импульсов в 1 минуту от счетного образца (скорость счета) совпадает с числом актов распада ядер радионуклида в 1 минуту (радиоактивность) и поэтому отпадает необходимость введения поправочных коэффициентов расчетного метода.

Относительный (сравнительный) метод. Основан на сравнении скорости счета от эталона (образец с известной активностью) со скоростью счета от счетного образца измеряемой пробы с неизвестной активностью, полученных в абсолютно одинаковых условиях измерения. Известно, что скорость счета (имп/мин) нетождественна радиоактивности (расп/мин), но пропорциональна ей в отношении как эталона, так и измеряемой пробы. Эту пропорциональность можно выразить уравнением

$$A_{\text{эт}} : N_{0\text{эт}} = A_{\text{пр}} : N_{0\text{пр}},$$

где $A_{\text{эт}}$ — радиоактивность эталона; $A_{\text{пр}}$ — радиоактивность пробы; $N_{0\text{пр}}$ — скорость счета от пробы; $N_{0\text{эт}}$ — скорость счета от эталона.

Из этого уравнения можно определить радиоактивность исследуемой пробы:

$$A_{\text{пр}} = \frac{A_{\text{эт}} N_{0\text{пр}}}{N_{0\text{эт}}}.$$

Относительный метод благодаря своей простоте, скорости выполнения, достаточной достоверности находит широкое применение в радиометрии при исследованиях радиоактивных препаратов. Более достоверные результаты определения активности относительным методом можно получить при проведении радиометрии эталона и препарата в одних и тех же условиях, на одной и той же радиометрической установке.

Эталоном называют радиоактивный препарат с известной активностью. Вид излучения изотопа, находящегося в эталоне, должен быть таким же, как и в исследуемой пробе, энергия излучения изотопов эталона и пробы должна быть одинаковой или близкой, схема распада изотопов в эталоне и измеряемом образце не должна существенно отличаться. Лучшим эталоном считается образец, содержащий тот же изотоп, что и в исследуемой пробе. Если такой возможности нет, то используют эталон, приготовленный из другого изотопа, но с учетом вышеуказанных требований.

Так, при определении радиоактивности проб объектов ветеринарного надзора, обусловленной смесью бета-излучающих изотопов неизвестного состава, радиологические отделы ветеринарных лабораторий в качестве эталона используют естественный радиоизотоп ^{40}K . Готовят его из химически чистой соли хлористого калия (KCl , ГОСТ 4232-48).

Скорость счета от эталона и счетного образца определяют в строго одинаковых условиях: на одном и том же приборе, с одним и тем же детектором, на подложках из одинакового материала и одинаковой толщины и размера, на одинаковом расстоянии от счетчика. Толщина слоя эталонного источника и исследуемого образца ($\text{мг}/\text{см}^2$) должна быть одинаковой или очень близкой. Идентичность условий радиометрии эталона и счетного образца позволяет рассчитать радиоактивность исследуемой пробы без внесения поправок на потери излучения при измерении.

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 актив-

ность. 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 (см. рис. 37).

Различают 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. Полупроводниковые детекторы имеют преимущества, но для их охлаждения требуется жидкий азот, так как при комнатной температуре разрушается структура детектора и он выходит из строя. При взаимодействии гамма-излучения со сцинтиллятором NaI (Tl) образуются кванты света; они попадают на фотокатод ФЭУ и преобразуются в электрические импульсы. Амплитуда импульса на выходе ФЭУ прямо пропорциональна энергии излучения, поглощенной в сцинтилляторе. Импульсы с ФЭУ поступают на многоканальный амплитудный анализатор (МАО), который предназначен для распределения импульсов по амплитуде. Импульсы могут усиливаться в анализаторе или отдельном усилителе. Затем импульсы поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и в память, где амплитуда импульса преобразуется в некий цифровой код,

который определяет адрес ячейки памяти, куда будет занесена информация. Эти ячейки принято называть каналами. Каждая ячейка имеет свой код в зависимости от амплитуды импульса, и поэтому каждая амплитуда будет располагаться в своем канале. Поскольку амплитуда импульса пропорциональна энергии излучения, то мы имеем право говорить о спектре, т. е. об энергии излучения. Таким образом, накапливается в памяти информация о распределении импульсов по энергиям. Получаемое амплитудное распределение отображается на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), а при необходимости может быть выведено на ленту ЦПУ, направлено для долговременного хранения в устройства внешней памяти (ЭВМ, перфоратор или магнитофон) или обработано в целях выделения пиков в распределении и их идентификации.

Для анализа полученных сведений о распределении и определении радиоактивности радионуклидов в исследуемых пробах необходимо выполнить ряд операций: энергетическую градуировку амплитудной шкалы; поиск пиков в амплитудном распределении и их выделение; разложение амплитудного распределения, полученного в результате измерений, на несколько распределений, создаваемых определенными радионуклидами; идентификацию каждого радионуклида по выделенным пикам и вычисление его активности.

Градуировку проводят с помощью радионуклидов, энергия гамма-квантов которых хорошо известна, например ^{203}Hg , ^{137}Cs , ^{60}Co и др. Для этого готовят несколько эталонных источников, каждый из которых содержит один определенный радионуклид, измеряют гамма-спектр этих источников и строят график зависимости амплитуд импульсов от энергии гамма-квантов. Градуировочный график строят при каждой смене сцинтиллятора и ФЭУ; он должен охватывать весь диапазон исследуемых энергий. Эталонные источники удобно готовить путем внесения известного количества радионуклида в неактивный порошок (тальк, сахарную пудру и др.).

Поиск пиков в амплитудном распределении исследуемых проб и их выделение, разложение амплитудного распределения на несколько распределений, создаваемых определенными радионуклидами, а также идентификация каждого радио-

нуклида по выделенным пикам и вычисление его активности выполняются автоматически с помощью ЭВМ и пакета программ, обеспечивающих выполнение этих операций. При отсутствии ЭВМ удельную активность исследуемых проб можно рассчитать путем умножения площади пика или числа импульсов в выделенном пике на коэффициент эффективности (связи). Коэффициент эффективности спектрометра определяют как отношение активности эталонного источника к площади пика или числу импульсов в этом пике, полученных при спектрометрии эталонного источника (подробнее см. в гл. 10).

Контрольные вопросы

1. Что такое дозиметрия и радиометрия?
2. Что лежит в основе методов обнаружения и регистрации ядерных излучений?
3. Что такое доза излучения, какие существуют виды доз и единицы их измерения?
4. Какие приборы используют для измерения ядерных излучений?
5. Какие методы измерения радиоактивности применяют при радиационном контроле объектов ветеринарного надзора?
6. Какие типы детекторов используют для обнаружения ионизирующих излучений, какой принцип работы детекторов?
7. Какие методы радиационного контроля вы знаете?
8. Какие основные составные части входят в состав системы для регистрации ядерных излучений?



ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ОСНОВЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ РАДИОЭКОЛОГИИ

На радиоактивные изотопы как важный экологический фактор обратили внимание в середине 1930-х годов, однако широкое развитие радиоэкологических исследований приходится на 1950-е годы, когда техногенная деятельность человека (в первую очередь испытания ядерного оружия) привела к изменению естественного радиационного фона.

Одновременно с развитием атомного производства и применением атомной энергии возникло новое научное направление — радиоэкология — учение об особенностях существования организмов и сообществ растений и животных в среде обитания с повышенной (по сравнению с нормой) радиоактивностью.

В настоящее время радиоэкология развивается по нескольким направлениям. Одним из направлений современной радиоэкологии является радиоэкология животных. Она изучает особенности существования животных и закономерности, протекающие в их естественных популяциях и биогеоценозах при воздействии на них различных факторов среды обитания.

В 1960-х годах выделился самостоятельный раздел, изучающий радиоэкологию морских организмов. Вследствие широкого использования ядерной энергии на атомных электростанциях возникла и быстро развивается радиоэкология пресноводных водоемов. Основной задачей водной радиоэкологии является изучение миграции радиоактивных элементов в гидроценозах и действия радиоактивного загрязнения

воды на гидробионты и околотовные сообщества растений и животных, а также обеспечение охраны водной среды от радиоактивного загрязнения.

Расширение исследований по изучению поведения искусственных радионуклидов в пищевых цепях, ведущих к человеку, с участием сельскохозяйственных растений и животных, а также действия ионизирующих излучений на объекты сельскохозяйственной деятельности сформировали в радиэкологии два самостоятельных направления со своими методами исследования и задачами: радиэкология сельскохозяйственных растений и радиэкология животных.

Радиэкология сельскохозяйственных животных является важнейшей частью сельскохозяйственной радиэкологии и общей экологии в целом. Она изучает закономерности и механизмы миграции радионуклидов в пищевых цепях, принципы их экологического нормирования, а также действие радионуклидов и других источников ионизирующих излучений на организм животных. Изучение этих вопросов необходимо для безопасного ведения животноводства в условиях повышенного радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Интерес к проведению работ в этой области вызван тем, что продукция животных является важнейшим источником снабжения населения продовольствием, а легкой и пищевой промышленности — сырьем. В связи с этим продукты животного происхождения (молоко, мясо, яйцо и др.) могут быть основными поставщиками радиоактивных нуклидов в организм человека и источниками дополнительного его облучения. Поступление важнейших радиоактивных продуктов деления (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{131}I) из глобальных выпадений в рацион человека с мясом может достигать 25%, с молоком — 100% суммарного потребления с пищей (Н. А. Корнеев, А. Н. Сироткин). Вследствие этого радиэкологические исследования в области животноводства приобретают не только важное теоретическое, но и практическое значение. Данные радиэкологии используются сельскохозяйственной радиологией для рационального планирования и проведения оперативного и текущего контроля за радиоактивным загрязнением внешней среды, а также для разработки научно обоснованных

методов снижения поступления радионуклидов в корма и продукцию животноводства.

Радиоэкологию сельскохозяйственных животных, как прикладную науку, интересуют все звенья экологической цепочки, которые приводят к накоплению радионуклидов в кормах и продуктах животноводства.

Радиоэкологические исследования позволяют прогнозировать судьбу радионуклидов в окружающей среде, их биологическую эффективность, оценивать последствия поступления радиоактивных веществ в биосферу, выявлять роль экологических факторов в миграции радионуклидов и при необходимости осуществлять меры по уменьшению перехода их из почвы в корма и животноводческую продукцию. За многолетний период исследований закономерностей переноса радионуклидов в системе атмосферные выпадения — вода — почва — растения — животные — продукция животноводства накоплен солидный объем информации. Однако ряд вопросов в области радиоэкологии сельскохозяйственных животных требует дальнейшего изучения. В частности, необходимо оценить вклад разных путей поступления радионуклидов в корма, молоко и мясо, разработать методику прогноза накопления их в этих продуктах, изучить отдаленные последствия действия ионизирующих излучений на организм, выявить формируемые средой лучевые нагрузки на организм, оказывающие влияние на продуктивные, репродуктивные и другие хозяйственно-полезные качества животных.

Работы радиоэкологического направления начали проводиться еще в 1930-х годах В. И. Вернадским, но основоположником радиоэкологии, обосновавшим задачи этой новой научной дисциплины явился А. А. Передельский. За рубежом работы в этой области возглавил Ю. Одум. Позднее в нашей стране проблемами *сельскохозяйственной радиоэкологии* стал заниматься академик ВАСХНИЛ В. М. Клечковский. Им были сформулированы основные направления этой науки, состоящие во всестороннем изучении закономерностей переноса радиоактивных веществ в сфере сельскохозяйственного производства.

В настоящее время огромный вклад в развитие сельскохозяйственной радиоэкологии внесли академики РАСХН

Н. А. Корнеев, Р. М. Алексахин и профессор А. Н. Сироткин. Их работы общепризнаны у нас в стране и за рубежом и стали своего рода классическим справочным материалом по данной проблеме. Кроме того, работы этих ученых легли в основу практических рекомендаций по ведению животноводства и смягчению радиационных последствий в районах, пострадавших от Чернобыльской катастрофы. Они служат своего рода передовой научной базой, на основе которой проводились и в дальнейшем будут проводиться исследования по решению комплекса экологических проблем, обусловленных радионуклидным загрязнением среды. Материалы работ этих выдающихся ученых легли в основу разделов учебника, посвященных вопросам радиоэкологии.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Все живые существа на земле постоянно подвергаются воздействию ионизирующей радиации путем внешнего и внутреннего облучения за счет естественных (космическое излучение и природные радиоактивные вещества) и искусственных (отходы атомной промышленности, радиоактивные изотопы, используемые в биологии, медицине и сельском хозяйстве, и др.) источников ионизирующих излучений.

Радионуклиды естественного и искусственного происхождения широко распространены в природе, они рассеяны в земной коре, воде, воздухе, растениях и теле животных.

К радионуклидам естественного происхождения относят те, которые образовались на Земле без участия в этом человека. Это прежде всего долгоживущие изотопы ^{238}U , ^{235}U , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и т. д., а также дочерние радиоактивные продукты распада этих изотопов. Сюда относятся также радионуклиды, образующиеся под действием космического излучения на Земле и попадающие из космоса на Землю.

В почве, воде, воздухе, строительных и других материалах всегда рассеяны природные радионуклиды. Совместно с космическим излучением они и создают природный радиоактивный фон, постоянно облучая все живые организмы на Земле.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Космическое излучение. Это ионизирующее излучение, непрерывно падающее на поверхность земли из мирового пространства (первичное космическое излучение) и образующееся в земной атмосфере в результате взаимодействия первичного космического излучения с атомами воздуха (вторичное космическое излучение).

Первичный компонент космических лучей образуется вследствие извержения и испарения материи с поверхности звезд и туманностей космического пространства. Он состоит в основном из ядер легких атомов: водорода — протонов (79%), гелия — α -частиц (20%), лития, бериллия, бора, углерода, азота, кислорода и других элементов, большинство из которых обладают очень высокой энергией — в интервале $3 \cdot 10^9 \dots 15 \cdot 10^9$ эВ, а некоторые — $10^{17} \dots 10^{18}$ эВ. Такие большие энергии первичные космические частицы приобретают за счет 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. Однако лишь немногие частицы достигают поверхности земли, так как они взаимодействуют с атомами воздуха, рождая потоки частиц вторичного космического излучения. Поэтому основную массу космических лучей, достигающих поверхности земли, составляет вторичное космическое излучение.

Вторичное космическое излучение очень сложно и состоит из всех известных в настоящее время элементарных частиц и излучений. Основную массу их, достигающих уровня моря, составляют: μ^\pm - и π^\pm -мезоны (70%), электроны и позитроны (26%), первичные протоны (0,05%), γ -кванты, быстрые и сверхбыстрые нейтроны.

Для оценки биологического воздействия (расчета дозы космического излучения) вторичное космическое излучение можно разделить по уровню энергии и составу на четыре компонента:

- мягкий, или малопроникающий, компонент (объединяет электроны, позитроны, γ -кванты и частично быстрые протоны с энергиями порядка 100 МэВ);

- жесткий, или сильнопроникающий (состоит в основном из μ^{\pm} -мезонов с энергиями порядка 600 МэВ, небольшого количества сверхбыстрых протонов, с энергией более 400 МэВ, α -частиц и незначительного количества π^{\pm} -мезонов);
- сильноионизирующий (содержит продукты ядерных расщеплений: протоны, α -частицы, дейтроны, тритоны и более тяжелые осколки ядер с энергией 10...15 МэВ);
- нейтронный компонент (нейтроны различных энергий).

На уровне моря космическое излучение состоит в основном, как правило, из мягкого и жесткого компонентов.

Мягкий компонент поглощается слоями свинца толщиной 8...10 см и железа — 15...20 см; жесткий — проходит через свинец толщиной более метра, его можно обнаружить под землей и под водой на глубине нескольких километров.

Частицы мягкого и жесткого компонентов, обладая большими энергиями в веществе, создают наименьшую плотность ионизации. Поэтому их *относительная биологическая эффективность* (ОБЭ) приравнивается к 1.

Частицы сильноионизирующего компонента обладают большой плотностью ионизации. Их ОБЭ приравнивают к ОБЭ протонов, нейтронов и α -частиц с энергией 10...15 МэВ, т. е. она равна 10.

На уровне моря сильноионизирующие частицы составляют 0,5%, а слабоионизирующие — 99,5%. Поскольку трудно учесть плотность ионизации осколков ядер с ОБЭ более 10, то этот показатель космического излучения считается приблизительно равным 2.

Проведенные измерения показали, что на уровне моря за счет космических лучей образуются 2,74 пары ионов в 1 см^3 воздуха за 1 с. Это соответствует мощности дозы $1,15 \cdot 10^{-9}$ рад/с.

Тканевая доза космических лучей на 11% больше, чем в воздухе, так как сверхбыстрые нейтроны, сталкиваясь с ядрами атомов C, N и O биологической ткани, вызывают их расщепление с образованием быстрых нейтронов, которые создают в тканях дополнительную ионизацию.

Исходя из этого установлено, что доза в ткани за сутки составляет 0,11 мрад, за год — 40 мрад, или 80 мбэрад/год ($D_{\text{тк}} = 0,11 \cdot 2 = 0,22$ мбэрад/сутки $\cdot 365 = 80$ мбэрад/год).

Природные радиоактивные вещества. Их можно разбить на три группы. В первую группу входят U и Th с продуктами их распада (см. раздел «Естественная радиоактивность и радиоактивные семейства»), а также ^{40}K и ^{87}Rb . Ко второй группе относят малораспространенные изотопы и изотопы с большим периодом полураспада: ^{48}Ca , ^{96}Zr , ^{113}In , ^{124}Sn , ^{130}Te , ^{138}La , ^{150}Nb , ^{152}Sm , ^{176}Lu , ^{180}W , ^{187}Re , ^{209}Bi . К третьей группе принадлежат радиоактивные изотопы ^{14}C , ^3H , ^7Be , ^{10}Be , образующиеся непрерывно под действием космического излучения.

Наиболее распространенным радиоактивным изотопом земной коры является ^{87}Rb , содержание которого значительно выше урана, тория и особенно ^{40}K . Однако радиоактивность ^{40}K в земной коре превышает радиоактивность суммы всех других естественных радиоактивных элементов: ^{87}Rb характеризуется мягким бета-излучением и имеет большой период полураспада, а распад ^{40}K сопровождается относительно жестким бета- и гамма-излучением. ^{40}K широко рассеян в почвах и прочно удерживается глинами вследствие процессов сорбции. Глинистые почвы почти везде богаче радиоактивными элементами, чем песчаные и известняки.

Радиоактивные тяжелые элементы (уран, торий, радий) содержатся преимущественно в горных гранитных породах. В разных районах земного шара доза гамма-излучения различных земных пород у поверхности земли колеблется в значительных пределах 26...1150 мрад/год. Однако имеются районы (например, в Бразилии, Индии и др.), где вследствие выхода на поверхность земли радиоактивных руд и пород, а также значительной примеси в почве урана и радия доза природного фона составляет 12...70 рад/год, что в 100...500 раз выше среднемирового фона. У обитающих в этих районах животных (например, самцов полевок) обнаружены изменения хромосомных aberrаций, дегенерация в зародышевом эпителии половых желез (особенно у молодых особей), заторможенное половое созревание и стерильность половозрелых самцов в 58,3% случаев (Верховская и др., 1965, 1967).

Так как земные породы используют в качестве строительного материала, то от последнего зависит гамма-радиация внутри зданий. Наибольшие значения гамма-радиации установлены в домах из железобетона с глиноземом — 171 мрад/год,

наименьшее — в деревянных домах — 50 мрад/год (Sievert и др., 1952, 1957).

Радиоактивность воде придают в основном уран, торий и радий, образующие растворимые комплексные соединения, которые вымываются почвенными водами, а также газообразные продукты их радиоактивных превращений — радон и торон. 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. Так, наличие радона в водах кислых магматических пород в несколько раз выше, чем осадочных пород. Концентрация урана в реках, протекающих на юге, обычно выше, чем в северных реках. Наиболее значительным содержанием радиоактивных элементов характеризуются воды урановых месторождений и минеральные (Виноградов, 1957). В минеральных водах Кавказа содержание радия не превышает $7,5 \cdot 10^{-9}$ Ки/л, радона — $2,6 \cdot 10^{-8}$ Ки/л. Количество ^{40}K в водах рек и озер примерно соответствует содержанию радия: в реках — $7,7 \cdot 10^{-12}$ Ки/л, в озерах — $1,3 \cdot 10^{-11}$ Ки/л.

Радиоактивность атмосферы обусловлена наличием в ней радиоактивных веществ в газообразном состоянии (радон, торон, ^{14}C , тритий) или в виде аэрозолей (^{40}K , уран, радий и др.). Радон и торон поступают из земных пород, а углерод и тритий образуются из атомов азота и водорода в результате воздействия на их ядра нейтронов вторичного космического излучения.

Суммарная радиоактивность атмосферного воздуха колеблется в широких пределах ($2 \cdot 10^{-14} \dots 4,4 \cdot 10^{-13}$ Ки/л) и зависит от места, времени года, погодных условий и от состояния магнитного поля Земли.

Из естественных радиоактивных веществ наибольшую удельную активность в растениях составляет ^{40}K ($1,2 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^{-8}$ Ки/кг), особенно в бобовых растениях: горохе, бобах, фасоли, сое. Содержание в растениях урана, радия, тория и ^{14}C ничтожно мало.

В животных организмах обычно содержится ^{40}K меньше, чем в растениях.

Уран, торий и углерод-14 встречаются в биологических объектах в очень незначительных концентрациях по сравнению с ^{40}K .

Таким образом, на организм животных оказывают воздействие внешние источники природного радиоактивного фона — космическая радиация и излучения природных радионуклидов, рассеянных в почве, воде, воздухе, строительных и других материалах, а также источники природной радиации ^{40}K , ^{226}Ra , ^{14}C , ^3H , содержащиеся в самом организме и поступающие в него в составе пищи, воды и воздуха.

Эти внешние и внутренние источники, действуя непрерывно, сообщают организму определенную поглощенную дозу.

Среднегодовая доза для человека составляет около 0,12 рад на гонады и 0,13 рад на скелет и считается безопасной.

Радионуклиды искусственного происхождения образуются в результате деятельности человека по использованию атомной энергии, испытаний и применения ядерного оружия, ядерного синтеза с помощью специальных установок и источников излучений и т. д.

ИСКУССТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

При *ядерных взрывах* осуществляется реакция деления ядер тяжелых элементов (^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U , ^{238}U), возникающая в результате действия на них нейтронов. В принципе реакция деления может быть вызвана при бомбардировке тяжелых элементов и другими элементарными частицами (α , p , d), но наибольший практический интерес представляет реакция деления ядра под действием нейтронов.

Механизм этой реакции можно схематически представить следующим образом: нейтрон попадает в ядро расщепляющегося элемента, например изотопа ^{235}U , и приводит к образованию сильно возбужденного ядра — ^{236}U . Нуклоны в результате нарушения ядерного сцепления под действием сил отталкивания расходятся к противоположным полюсам, ядро деформируется, принимает удлинненную форму. В центральной части ядра образуется перетяжка, ядерные силы уже не могут противостоять действию сил отталкивания между протонами, и ядро расщепляется на два или три асимметричных ядра — осколка. Весь этот процесс происходит мгновенно.

венно. Во время каждого акта деления освобождается энергия порядка 200 МэВ и вылетают 2...3 свободных нейтрона. Если нейтроны на своем пути встретят другие тяжелые ядра, способные к делению, то возникает цепной процесс деления.

При достаточном количестве делящегося материала возникает мгновенная неуправляемая цепная реакция взрывного характера.

Процесс деления может быть самоподдерживающимся, регулируемым, с непрерывным выделением определенного количества энергии. Это осуществлено в ядерных реакторах, в которых плотность нейтронного потока регулируется особыми стержнями — поглотителями нейтронов.

При ядерных взрывах образуется около 250 изотопов 35 элементов (из них 225 радиоактивных) как непосредственных осколков деления ядер тяжелых элементов (^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U , ^{238}U), так и продуктов их распада.

Количество радиоактивных продуктов деления (РПД) возрастает соответственно мощности ядерного заряда. Часть образовавшихся РПД распадается в ближайшие секунды и минуты после взрыва, другая часть имеет период полураспада порядка нескольких часов. Другие радионуклиды, такие как ^{86}Rb , ^{89}Sr , ^{91}Y , ^{95}Cd , ^{125}Sn , ^{125}Te , ^{131}I , ^{133}Xe , ^{136}Cs , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{156}Eu , ^{161}Vb , обладают периодом полураспада в несколько дней, а ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{125}Sb , ^{137}Cs , ^{147}Pm , ^{151}Sm , ^{155}Eu — от одного года до нескольких десятков лет.

Группа, состоящая из ^{87}Rb , ^{93}Zr , ^{129}I , ^{135}Cs , ^{144}Nd , ^{137}Sm , характеризуется чрезвычайно медленным распадом, продолжающимся миллионы лет.

Большинство образующихся радионуклидов является бета- и гамма-излучателями (^{131}I , ^{137}Cs , ^{140}Ba и др.), остальные испускают или только β - (^{90}Sr , ^{135}Cs и др.), или только α -частицы (^{144}Nd , ^{147}Sm). Помимо РПД, в число образовавшихся радионуклидов входит и непрореагировавшая часть «ядерного горючего», так как коэффициент использования его в современных ядерных устройствах составляет около 20%. Основная масса вещества заряда (урана, плутония) не успевает разделиться в период цепной реакции и распыляется силой взрыва на мельчайшие частицы, содержащие атомы со свойствами исходных радионуклидов.

Дополнительным источником радиоактивного загрязнения местности в районе взрыва служит *наведенная радиоактивность*, возникающая в результате воздействия потока нейтронов, образующихся при цепной реакции деления урана или плутония, на ядра атомов различных веществ окружающей среды (реакция активации). Захват нейтронов ядрами многих химических элементов приводит к появлению радиоизотопов (продуктов активации) в атмосферном воздухе (^{14}C , ^3H , ^{39}Ar), воде (^{24}Na , $^{31,32}\text{P}$, $^{53,54}\text{Mn}$, ^{35}S , ^{65}Zn и др.), почве (^{45}Ca , ^{24}Na , ^{27}Mg , ^{29}Al , ^{31}Si и др.), в материалах сооружений и т. п. Большая часть их распадается с испусканием β -частиц и гамма-излучения со сравнительно малым периодом полураспада (за исключением ^{14}C).

Суммарная активность остатков ядерного заряда и радионуклидов, образовавшихся в результате реакции активации, намного меньше общей активности радиоактивных продуктов деления. Последние являются основным источником радиоактивного загрязнения внешней среды.

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}Ru и ^{106}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 опасность в смеси осколков деления представляют ^{131}I , ^{140}Ba и ^{89}Sr , а в последующем — ^{90}Sr и ^{137}Cs (см. гл. 5).

Средняя энергия осколков деления в возрасте 10 дней — 2 лет составляет около 0,7 МэВ по гамма-излучению и 0,3 МэВ по β -излучению.

Радиоактивные нуклиды составляют смесь продуктов деления, скорость распада которых неодинаковая. Поэтому соотношение их в этой смеси с течением времени будет непрерывно изменяться в сторону обогащения ее долгоживущими продуктами деления вследствие распада короткоживущих

радионуклидов. Активность продуктов атомного взрыва особенно быстро снижается в первые часы и сутки, поскольку в общей массе всех радиоактивных продуктов наибольшее количество изотопов имеют малый период полураспада.

Так, например, через 7 ч с момента деления суммарная радиоактивность составляет примерно 10% ее количества, определенного на 1 час и в течение первых суток за счет короткоживущих изотопов общая активность снижается в 50 раз. Через 2 сут остается около 1% этого количества и через 14 сут — 0,1%. В связи с этим уменьшение активности РПД после взрыва нельзя определить по закону радиоактивного распада, а лишь с известным приближением можно рассчитать по формуле, предложенной Вей и Вигнером:

$$A = A_0 t^{-x},$$

где A — активность смеси осколков деления через t время после взрыва; A_0 — активность смеси при $t = 1$ дню; x — показатель степени, равный $1/2$ в интервале времени от нескольких часов до 200 дней после взрыва.

В начальный момент времени радиоактивность продуктов ядерного деления быстро падает, поскольку интенсивно распадаются короткоживущие радионуклиды.

Наряду с радиоактивными продуктами деления возникает определенное количество радиоактивных продуктов нейтронной активации, состав которых зависит от материалов, подвергшихся активации. Наибольшую долю в суммарной радиоактивности продуктов нейтронной активации в первые часы составляет ^{28}Al ($t_{1/2}$ — 2,3 мин), до 20 ч ^{24}Na и ^{56}Mn ($t_{1/2}$ соответственно 14 и 2,6 часа), а также ^{59}Fe и ^{60}Co . Период полураспада смеси этой группы радионуклидов примерно соответствует распаду смеси радиоактивных продуктов деления. Испытания ядерного и термоядерного оружия показали, что радионуклиды конденсируются на веществах, вовлеченных в сферу взрыва. Эти радиоактивные вещества в виде частиц разной дисперсности (от 1 см до долей микрона) выпадают на следе от радиоактивного взрыва. По мере удаления радиоактивного облака от места взрыва размеры выпадающих частиц уменьшаются, а также меняется биологическая доступность радионуклидов.

При *термоядерных взрывах* в момент реакции синтеза (слияние ядер легких элементов — дейтерия и трития и образование более тяжелого ядра — гелия, происходящее при десятках миллионов градусов) возникает интенсивный поток нейтронов, вызывающий образование значительного количества продуктов активации (наведенной радиоактивности), в частности трития, бериллия, углерода-14.

Ядерные устройства, основанные на принципе деление — синтез — деление, загрязняют окружающую среду радиоактивными осколками деления ^{238}U и ^{239}Pu , а также тритием и радиоуглеродом. На 1 мегатонну ядерного взрыва образуется 7,4 кг ^{14}C , что количественно в среднем равняется образованию этого изотопа в атмосфере под действием космических лучей в течение года.

Например, в результате проведенных рядом стран до 1959 г. термоядерных взрывов в земном резерве образовалось около 560 кг ^{14}C .

Загрязнение местности зависит от характера ядерного взрыва (наземный, воздушный и т. д.), калибра ядерного устройства, атмосферных условий (скорость ветра, влажность, выпадение осадков, распределение температуры по высоте, которое влияет на перемещение масс воздуха), географических зон и широт и др.

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

При воздушном взрыве не происходит значительного локального загрязнения местности РПД, так как они распыляются на очень большой площади.

Однако под влиянием атмосферных осадков, выпавших в момент прохождения радиоактивного облака, может повыситься загрязнение в том или ином районе.

Средние и малые взрывы до нескольких килотонн тритиевого 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 РПД способны совершать очень большой путь, вплоть до нескольких оборотов вокруг земного шара, поэтому радиоактивное загрязне-

ние может возникнуть в любой точке земного шара, т. е. наступает глобальное загрязнение.

По данным американских авторов В. Лэнгхэма и Е. Андерсена (1959), при взрывах зарядов большой мощности (в несколько мегатонн) продукты взрывов распределяются следующим образом: при взрыве на большой высоте 99% их задерживается в стратосфере, локальных загрязнений нет; при наземном взрыве 20% из них попадает в стратосферу, а 80% выпадает в районе взрыва; при взрывах у поверхности моря 30% остается в стратосфере, а 70% выпадает локально.

Скорость выпадения радиоактивных осадков зависит от времени года и широты местности: она больше в Северном полушарии, чем в Южном. В пределах небольших районов скорость выпадения может колебаться также в зависимости от выпадения дождя или снега в течение года.

РПД могут находиться в тропосфере около 2...3 мес, в стратосфере — 3...9 лет. Вследствие этого при воздушных взрывах на землю в основном выпадают только долгоживущие радиоактивные продукты, так как короткоживущие изотопы распадаются, находясь в стратосфере.

По данным некоторых исследователей, ежегодно из имеющихся в стратосфере РПД осаждаются 10% ^{90}Sr и ^{137}Cs .

По подсчетам, к 1959 г. в результате ядерных испытаний количество продуктов деления, образовавшихся во всем мире, равнялось 90...100 МКи, из них на долю ^{90}Sr приходилось около 10 МКи, ^{137}Cs — 18 МКи и ^{239}Pu — 0,5 МКи.

Считают, что примерно 40% ^{90}Sr и ^{137}Cs (4 и 7 МКи соответственно) выпало в районе испытаний в виде местных осадков и столько же в виде глобальных. Остальные 20% ^{90}Sr и ^{137}Cs (2 и 4 МКи) остались в стратосферном резервуаре, из них наибольшая часть (9/10) — в Северном полушарии.

В связи с широким использованием атомной энергии в мирных целях все большее значение приобретают радиоактивные отходы промышленных предприятий и установок (атомных электростанций, предприятий по переработке ядерного материала, реакторов), лабораторий и научно-исследовательских институтов, работающих с РВ высокой активности, как потенциальный, а в отдельных случаях и как реальный

фактор локального (на ограниченной территории) загрязнения внешней среды.

В настоящее время искусственные радионуклиды получают и используют в таких количествах, что возникающее при этом излучение имеет интенсивность, в миллионы раз превосходящую интенсивность естественных источников излучения.

Искусственные радионуклиды по различным причинам попадают в окружающую среду, повышая тем самым радиационный фон. Кроме того, они включаются в биологические системы и поступают непосредственно в организм животных и человека. Все это создает опасность для нормальной жизнедеятельности животного организма.

Особого внимания в связи с этим заслуживает деятельность АЭС, поскольку в процессе их работы и деятельности предприятий по переработке ядерного топлива образуется большое количество опасных радионуклидов.

В настоящее время человек сталкивается также с искусственными источниками радиации, не связанными с загрязнением внешней среды. К ним относятся рентгеновские установки, ускорители элементарных частиц, закрытые источники радиоактивных изотопов, использующиеся в медицине, промышленности и научно-исследовательской работе.

ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ВО ВНЕШНЮЮ СРЕДУ

Радиоактивные вещества поступают во внешнюю среду в результате испытаний ядерного и термоядерного оружия, особенно если они проводятся на поверхности земной коры, в воздухе, в 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 при добыче урановой руды, выделении из нее и обогащении урана, переработке отработанных тепловыделяющих элементов (твэлов) в целях получения ядерного горючего Pu-239, а также в результате транспортировки и хранения радиоактивных отходов.

Урановая руда содержит не более 0,2% урана, а также таких радионуклидов, как ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po . Часть из них при обогащении урана концентрируется, а основная часть поступает в отвалы и промывные воды, выделяющийся при этом газообразный радон поступает в атмосферу. По этой причине в местах добычи и обогащения урана радиационный фон возрастает.

Например, при сбрасывании радиоактивных отходов в реку Колорадо (США) в 1958 г. ниже места расположения урановых предприятий было зарегистрировано увеличение содержания радионуклидов в 400 раз. При работе атомных электростанций в окружающую среду поступает незначительное количество ^3H , ^{85}Kr , ^{131}I , а при хранении отработанных тепловыделяющих элементов — ^{129}I , они представляют большую потенциальную опасность.

Радионуклиды, загрязняющие внешнюю среду, имеют различное происхождение и физико-химические свойства. Часть из них представляет собой осколки и продукты радиоактивного распада этих осколков при делении ядер. Радиоактивные вещества могут распространяться в виде радиоактивного облака, состоящего из летучих веществ и частиц различных размеров. Радиоактивные вещества, состоящие из частиц, осаждаются в виде радиоактивных выпадений, распределение которых зависит, главным образом, от метеорологических условий.

Химические свойства радионуклидов обусловлены местом расположения элемента в периодической системе Д. И. Менделеева. Высокой химической активностью обладают нуклиды элементов 1-й группы и галогенов, которые не образуют труднорастворимых соединений, менее подвижны нуклиды щелочноземельных элементов. Наименьшей химической активностью обладают нуклиды редкоземельных элементов, цирконий, ниобий и радионуклиды трансурановых элементов. В результате проведения экспериментальных ядерных воздушных и надводных взрывов выявлено, что радиоактивные продукты состоят из легкорастворимых соединений, а при наземном взрыве химическая подвижность радиоактивных веществ значительно снижается, при надводных взрывах выявлено, что радиоактивные продукты состоят из

легкорастворимых соединений, а при наземном взрыве химическая подвижность радиоактивных веществ значительно снижается по сравнению с воздушным, в то же время растворимость радионуклидов тесно связана с составом почвы и грунтов, на которых произведен взрыв. При взрыве на силикатных грунтах радиоактивные вещества взрыва представлены стеклообразными оплавленными частицами с весьма малой растворимостью. В случае взрыва на карбонатных грунтах продукты взрыва представлены в основном карбонатами и оксидами щелочноземельных элементов, обладающими сравнительно высокой растворимостью в природных средах. Биологическая доступность радионуклидов из оплавленных частиц определяется временем их образования, составом и дисперсностью. Растворимость радионуклидов из мелких частиц, как правило, выше, чем из крупных. Частицы, содержащие радионуклиды глобальных выпадений, крайне малы (до 1 мкм), практически полностью растворимы в воде, и биологическая подвижность радионуклидов соизмерима с подвижностью их в водных растворах.

При радиационных авариях на атомных электростанциях происходит выброс в окружающую среду большого количества радиоактивных веществ, которые загрязняют среду обитания всего живого на Земле, в том числе и сельскохозяйственные угодья. При этом установлено, что основные дозовые нагрузки на население обусловлены потреблением продуктов питания, выращенных на загрязненных территориях, в основном молока.

Радиационные аварии различаются по объему выброса, радионуклидному составу, по тяжести последствий этих выбросов и размерам территорий, подвергшимся загрязнению, и т. д.

К настоящему времени в мире произошло несколько крупных радиационных аварий, среди которых наибольший ущерб нанесла Чернобыльская (табл. 6).

При радиационной аварии выделяют несколько периодов в развитии радиационной ситуации. Первый период называют периодом 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. Через 2 месяца после завершения основных выбросов на Чернобыль-

Таблица 6

Сравнительная характеристика крупнейших радиационных аварий

Место аварии	Суммарный выброс (Бк)	В том числе ^{131}I (Бк)	В том числе ^{90}Sr (Бк)	В том числе ^{137}Cs (Бк)	Территория, выведенная из хозяйственного пользования, км ²
Южный Урал (Россия, 1957)	$7,4 \times 10^{16}$	—	2×10^{15}	$2,7 \times 10^{13}$	1000
Уиндскейл (Великобритания, 1957)	$7,4 \times 10^{14}$	$4,4 \times 10^{14}$	$7,4 \times 10^{10}$	3×10^{12}	—
Айдахо (США, 1961)	3×10^{12}	4×10^{11}	$1,1 \times 10^{10}$	$1,1 \times 10^{10}$	—
Чернобыль (Россия, 1986)	$3,7 \times 10^{18}$	65×10^{16}	2×10^{16}	$8,7 \times 10^{16}$	3000

ской АЭС количество ^{131}I уменьшилось в 250 раз. При поедании животными загрязненных йодом кормов происходит его интенсивный переход в молоко и мясо.

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

Третий период радиэкологической 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 этого периода может быть несколько десятков лет, если в составе аварийных выбросов присутствует большое количество долгоживущих изотопов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu и др.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В БИОСФЕРЕ

Радиоактивные продукты ядерного деления выпадают либо сами по себе («сухие» осадки), либо чаще с атмосферными осадками («мокрые» осадки), а также в виде радиоактивных отходов включаются в компоненты биосферы — абиотические

(почва, вода) и биотические (флора, фауна) и принимают участие в биологическом цикле круговорота веществ.

Наиболее короткий путь продуктов деления до человека, кроме непосредственного попадания из атмосферы, — через сельскохозяйственные растения и животных. При этом продукты деления могут попадать в организм человека как непосредственно через растительную пищу, так и через животных, питающихся растениями, содержащими радиоактивные вещества.

Из радиоактивных продуктов деления наибольшую опасность представляют в первый период изотопы йода в силу большого процента их выхода и высокой биологической активности. В последующем доминируют ^{90}Sr и ^{137}Cs ввиду их относительно высокой энергии излучения и большого периода полураспада, а также исключительной способности включаться в биологический круговорот веществ (почва → растения → животные → человек) и надолго задерживаться в организме человека и животных. При кормовом поступлении в организм ^{90}Sr его постоянным неизотопным носителем служит кальций, а для ^{137}Cs — калий.

Калий и кальций в организме животных представляют макроэлементы. При исследовании закономерностей передвижения ^{90}Sr и ^{137}Cs от одного объекта биосферы к другому было замечено, что первый ведет себя сходно с кальцием, второй — с калием. Это обстоятельство имеет большое практическое значение для радиохимической экспертизы. Например, установлено, что при равных условиях в объектах биосферы, загрязненных радионуклидами, максимальная концентрация ^{90}Sr всегда обнаруживается в органах (продуктах), физиологически богатых кальцием (кости, яичная скорлупа), а максимальная концентрация ^{137}Cs — в объектах, богатых калием (например, мышцы).

На основании определенной пропорциональности накопления ^{90}Sr и кальция, ^{137}Cs и калия в биологических объектах в соответствии с соотношением содержания этих элементов во внешней среде или в предшествующем звене количество радиостронция или радиоцезия выражают не в абсолютных величинах, а величиной коэффициента по отношению к кальцию или калию.

Относительное содержание ^{90}Sr к кальцию в почвах, растениях, молоке, в тканях животных при таком расчете выражают в стронциевых единицах (СЕ).

Под стронциевой единицей понимается отношение концентрации ^{90}Sr в нКи, содержащегося в 1 кг исследуемого образца к концентрации в нем кальция (г/кг).

Частное от деления числа СЕ в данной пробе на число СЕ в предшествующем звене биологической системы называют коэффициентом дискриминации (КД) ^{90}Sr по отношению к кальцию:

$$\text{КД} = \frac{\text{СЕ в пробе}}{\text{СЕ в предшественнике}}.$$

По величине СЕ в пробе можно приблизительно вычислить величину СЕ в предшественнике, для этого СЕ пробы делят на КД.

Аналогично рассчитывают содержание ^{137}Cs по отношению к калию в цезиевых единицах (ЦЕ). Однако ЦЕ перестали пользоваться, когда выяснилось, что в процессе перехода по некоторым звеньям биосферы ^{137}Cs не испытывает дискриминации, в обмене далеко не всегда сходен с калием и вообще связан с ним меньше, чем ^{90}Sr с кальцием.

Следует отметить, что многие вопросы закономерностей перехода радионуклидов в звеньях биологических цепей остаются еще слабо изученными.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДЕ, ПОЧВЕ, КОРМАХ

Среди многообразия форм состояния радионуклидов в почве выделяют водорастворимую, обменную, необменную и прочносвязанную необменную.

Под водорастворимой понимают ту часть радионуклидов, которая экстрагируется из почвы дистиллированной водой. Радионуклиды в обменной форме экстрагируются 1*N* раствором ацетата аммония, в обменной форме — 6*N* раствором соляной кислоты. Радионуклиды в необменной прочносвязанной форме могут экстрагироваться только смесью плавиновой 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.

В почве радионуклиды находятся в разном физико-химическом состоянии.

Биологическая подвижность радионуклидов (способность мигрировать по пищевым цепочкам) зависит, с одной стороны, от их физико-химических свойств, а с другой стороны, от свойств самой почвы, среди которых решающее значение играет ее тип, минеральный состав, кислотность, содержание органических веществ, увлажненность, длительность ее использования в агроэкосистемах и т. д.

Наибольшей доступностью для растений обладает стронций, который на 73,7% в глобальных выпадениях находится практически полностью в водно-растворимой форме, ^{137}Cs — в пределах 44,9%, а ^{144}Ce — около 13%. Радионуклиды редкоземельных элементов, а также ^{185}W и ^{95}Zr находятся в выпадениях как в водно-растворимой, так и в нерастворимой формах, причем для ^{95}Zr и ^{144}Ce характерно преобладание нерастворимой формы. Свойства радионуклидов редкоземельных элементов, а также радионуклидов из группы нейтронной активации (^{52}Mn , ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co) таковы, что почти все они в воде образуют малорастворимые соединения (А. Н. Сироткин).

Большое влияние на доступность растениям радионуклидов оказывает наличие в ней обменных катионов — элементов-носителей и кислотность. Чем больше в почве элементов-носителей, тем меньше биологическая подвижность радионуклидов, и наоборот: закисление почв приводит к увеличению доступности радионуклидов для растений.

Практически весь радиоактивный стронций находится в почве в подвижной форме (до 98%), в то время как основная часть цезия сорбируется в почве достаточно прочно и лишь 1% его может переходить в водную вытяжку и менее одной трети — в раствор ацетата аммония.

Количество водно-растворимого стронция больше в почве с низким рН и минимальным содержанием обменного Ca^{+2} .

С течением времени обменно-связанные радионуклиды могут превращаться в слаборастворимые соединения — фосфаты и карбонаты, в результате чего их миграционная способность может снизиться.

^{90}Sr в почве связывается в основном за счет ионного обмена и сильно зависит от присутствия катионов Al^{+3} , Fe^{+3} , Ba^{+2} , Ca^{+2} , Mg^{+2} . При увеличении в почве концентрации анионов фосфорной, серной и угольной кислот сорбция стронция возрастает за счет образования труднорастворимых соединений с этими анионами.

Глинистыми минералами почв может быть сорбировано до 99% стронция-90. Органические вещества также оказывают существенное влияние на поведение этого нуклида, в частности он хорошо связывается с сульфокислотами почв, что также снижает его способность к биологической миграции (Р. М. Алексахин).

Попав в почву, радионуклиды способны мигрировать в горизонтальном и вертикальном направлениях. Причем способность к миграции у разных радионуклидов сильно варьирует.

При глобальном (до Чернобыльском) загрязнении цезием дерново-подзолистых песчаных почв около 40% его находилось в верхнем 4-сантиметровом слое. Остальные 60% довольно равномерно распределялись глубже по профилю. Это свидетельствует о сравнительно интенсивной миграции ^{137}Cs в вертикальном направлении.

На загрязненных чернобыльскими выбросами почвах, в зависимости от их типа, существенно различаются формы нахождения радионуклидов. Например, в дерново-подзолистых почвах в обменной форме находится до 20% цезия от его общего количества. В почвах других типов в обменной форме его находится в 1,5...2 раза меньше. Но на сильно кислых легких почвах содержание доступного растениям цезия достигает 35...40%.

На длительно используемых дерново-подзолистых почвах, при прочих равных условиях, подвижность ^{137}Cs увеличена. Большая подвижность радиоцезия определяется тем,

что это изотоп щелочного элемента, химического аналога важнейшего биогенного элемента калия, являющегося в природных системах носителем изотопов цезия.

В дерново-подзолистых супесчаных почвах Полесья, бедных слюдястыми минералами, до 70% ^{137}Cs сравнительно равномерно распределяется по профилю почвы на глубину 20...30 см, что свидетельствует о его интенсивной миграции даже на целинных участках. В почвах других ландшафтов до 90% ^{137}Cs сорбируется в верхних слоях почвы (0...5 см). Использование заглубленной вспашки на таких почвах сосредоточивает до 79% радиоцезия в верхнем 20...30 см слое (С. К. Фирсакова и др.).

В почвах, обогащенных органическими веществами (почвы естественных низинных болотных экосистем), цезий способен проникать на большую глубину (70...90 см), хотя через 6 лет после аварии на ЧАЭС 89% его все же содержалось в верхнем 5-сантиметровом слое.

Микроорганизмы почвы снижают подвижность радионуклидов в биологическом круговороте. Они могут связывать до 60% ^{137}Cs и этим препятствовать его дальнейшей миграции по пищевой цепочке.

^{90}Sr распределяется по профилю почв естественных экосистем менее закономерно, но более интенсивно, чем цезий, вследствие своей более высокой подвижности.

Через 10 лет после Чернобыльской катастрофы в естественных экосистемах 80...90% радионуклидов находится в слое почв 0...10 см. Изменение радиационно-экологической обстановки на загрязненных территориях происходит в основном за счет естественного радиоактивного распада, вторичного ветрового переноса и вертикальной миграции. При этом загрязнение чистых территорий происходит сельхозпродукцией, техникой, животными, птицами и т. д.

Попавшие в растения радионуклиды распределяются в них по-разному. Одни концентрируются в корнях, другие — в наземной части растений, преимущественно в стеблях, листьях, семенах и т. д. Причем в растениях они находятся в виде подвижной фракции (диализуемой) и связанной структурно-функциональными компонентами. Чем больше в растениях свободной фракции радионуклидов, тем более

они доступны для усвоения организмом моногастричных животных. Для полигастричных, ввиду особенностей их пищеварения, эти взаимоотношения гораздо сложнее.

К примеру, в растениях до 50...80% поступившего радиостронция связано с гемицеллюлозой и крахмалом, 6...40% находится в легкорастворимой форме и менее 10% связано с клетчаткой и другими компонентами. Цинк в кормах, богатых фитатами, представлен в форме кальций — цинк — фитата, и в такой форме очень трудно усваивается поросятами. Радиоизотопы таких микроэлементов, как Cu, Co, Cl, Fe и Mn, могут находиться в кормовых продуктах в форме металлоорганических или хелатных комплексов, стабильность которых существенно сказывается на всасывании элементов. Естественно, что металлы из хелатов, обладающих меньшей стабильностью, всасываются лучше.

Состояние и обмен радионуклидов в органах и тканях животных зависят от многих причин, в том числе и от их физико-химических свойств, среди которых важная роль принадлежит их способности к комплексообразованию и взаимодействию с тканевыми структурами. Такие элементы, как стронций и кальций, не обладают сильно выраженной комплексообразующей способностью (Н. А. Корнеев, А. Н. Сироткин).

В крови они находятся преимущественно в форме очень лабильно связанных с белками структур, при этом ^{45}Ca и ^{90}Sr , несмотря на их химическую близость, связываются белками сыворотки крови в разных количествах. Кальция, связанного в крови с белками, примерно в 2 раза больше, чем стронция. Кроме того, выявлена специфика распределения радионуклидов по отдельным белковым фракциям сыворотки крови.

В крови 0,3% ^{90}Sr связано еще с лимонной кислотой, а основное его количество находится в форме катиона. Напротив, представители редкоземельных элементов (^{91}Y и ^{144}Ce) характеризуются достаточно сильно выраженной способностью к комплексообразованию и связыванию с белками. Так, ^{91}Y примерно на 2% оказывается в крови в комплексе с лимонной кислотой. При этом увеличение концентрации лимонной кислоты (до 0,003 М) приводит к более высокому связыванию радионуклида (до 10%) с органической кислотой. Однако прочной химической связи ^{91}Y и ^{144}Ce с белками сыворотки

крови не наблюдается. ^{210}Po в крови соединяется с эритроцитами (92%) и 4% его связано с лейкоцитами. При этом 96% полония, содержащегося в эритроцитах, связано с гемоглобином.

Такие радионуклиды, как ^{22}Na , ^{42}K , ^{137}Cs , практически не связаны с белками в сыворотке крови. Нуклиды ^{91}Y и ^{144}Ce находятся в основном в глобулиновой фракции (> 99,0%), а ^{45}Ca и ^{90}Sr (33,0 и 19,7%) — в альбуминовой. При этом ^{91}Y связывается преимущественно бета-глобулинами, ^{144}Ce — альфа-глобулинами, а в альбуминах оба элемента практически отсутствуют. Электрофоретические исследования сыворотки крови показали, что ^{140}La связан в основном с альфа-глобулином, ^{46}Sc — с бета-глобулинами плазмы. Белок крови, связывающий железо (трансферин), — главный белок, транспортирующий Pu^{+4} у млекопитающих. В противоположность этому связь Am^{+3} и Cm^{+3} с сывороточными белками является слабой и неспецифической. После внутривенного введения ^{54}Mn и ^{59}Fe на 80 и 90% соответственно оказываются связанными с белками плазмы крови, а ^{106}Ru , ^{144}Ce и ^{239}Pu — практически полностью.

Чем выше комплексообразующая способность нуклидов с белками, тем меньшая доля элементов переходит из организма матери через плацентарный барьер в организм плода. При взаимодействии с химическими элементами белки могут их восстанавливать или окислять, адсорбировать своей поверхностью или образовывать сложные комплексы. Различные белки по-разному связывают один и тот же элемент. Например, соединения меди с альбуминами, трансферинном и бета-глобулинами легко диссоциируют, а с церруплазмином образуют прочные комплексы. Цинк циркулирует в крови в двух формах: слабо связанной с альбуминами и прочно связанной с альфа-глобулинами. Изменение температуры не оказывает существенного влияния на связь ^{47}Ca , ^{85}Sr , ^{133}Ba и ^{226}Ra , а увеличение pH значительно сдвигает равновесное состояние в сторону упрочнения связи. Быстрый выход из крови редкоземельных элементов объясняется, по-видимому, тем, что их простые соли в крови находятся в виде коллоидных частиц или белковых комплексов, которые быстро захватываются ретикулоэндотелиальными клетками.

Железо относится к наиболее важным микроэлементам, обладающим каталитическими функциями. Вследствие этого изучение физико-химического состояния железа в органах и тканях растений и животных привлекло пристальное внимание. Транспорт железа в животном организме осуществляется путем соединения его со специальным белком — трансферинном, являющимся бета-глобулином с молекулярной массой 80000. Каждая молекула трансферина способна связать два иона Fe, определяя общую железосвязывающую способность сыворотки крови.

Изучение комплексообразования радионуклидов с тканевыми белками показало сходство его с белками сыворотки крови. Радионуклиды щелочных металлов не связываются белками печени, почек, мышц, а ^{144}Ce и ^{91}Y почти полностью (> 99%) могут быть связаны с тканевыми белками. Нуклиды ^{45}Ca и особенно ^{90}Sr обнаруживаются, главным образом, в альбуминовой фракции тканевых белков (15...24%), ^{91}Y и ^{144}Ce — в глобулиновой (78...92%). Способность белков сыворотки крови и тканей связывать радионуклиды образует следующий специфический ряд: $^{22}\text{Na} = ^{137}\text{Cs} = ^{40}\text{K} < ^{90}\text{Sr} < ^{45}\text{Ca} < ^{91}\text{Y} = ^{144}\text{Ce}$. Иттрий и церий, в отличие от стронция, связываются, главным образом, с органическим матриксом кости, а не с минеральной фракцией. Иттрий и церий, связываясь с декальцинированным органическим веществом кости, не принимают участия в обмене кальция или это участие весьма незначительно. Введенный в организм ^{144}Ce быстро проникает в костную ткань и свыше 90% его откладывается в коллагеновых волокнах кости, а ^{91}Y , ^{144}Ce и ^{170}Tl связываются в костной ткани в основном с минеральной фракцией. Опыты по изучению поведения в печени ^{106}Ru показали, что уже через 3 ч после введения радионуклида он практически полностью связывается с белком. Через сутки после поступления ^{106}Ru в организм он образует связи с белками всех выделенных фракций. При этом наибольшее количество его обнаруживается в альбуминах ($35,0 \pm 5,8\%$) и глобулине ($29,0 \pm 4,3\%$). В псевдоглобулинах, ферритине и плохо растворимых белках в этот период содержится приблизительно одинаковое количество радионуклида (11...14%). В более поздние сроки в результате неодинаковой скорости выведения ^{106}Ru наблюдается

перераспределение его между белковыми фракциями. Сравнительные исследования взаимодействия плутония (Pu^{+4}), америция (Am^{+3} и кюрия Cm^{+3}) с белками сыворотки различных видов млекопитающих и другими тканевыми структурными компонентами (сиалопротеины кости, хондроитин сульфат, растворимый коллаген, трансферин человека, бычий гамма-глобулин) свидетельствуют о том, что Pu^{+4} связывается с белками значительно прочнее, чем Am^{+3} или Cm^{+3} . В клетках печени, семенников, надпочечников все три элемента связываются с лизосомными структурами. Pu^{+4} способен прочно связываться с белками костной ткани вблизи клеток на эндостальной поверхности, что может быть одним из факторов, ответственных за большую остеосаркомогенную активность Pu^{+4} .

В первые 6...12 ч после затравки животным ^{239}Pu очень быстро и избирательно концентрируется в печени, интенсивно связываясь с ферритином (около 63%). В целом, в белки и нуклеиновые кислоты включается 92% общего количества плутония, концентрирующегося в печени, образуя с ними довольно устойчивые комплексы.

Плутоний обладает наибольшим сродством к альбумину и глобулинам, которое почти в 10 раз выше, чем к коллагену, и связывается он преимущественно с карбоксильными группами белков. Экскретируется ^{239}Pu в значительных количествах с желчью, на 75% находясь в ней в свободном состоянии (А. Н. Сироткин).

Цезий в костной ткани локализуется на поверхности кристаллов, не включаясь в кристаллическую решетку, поэтому процесс варки костной ткани в составе мяса рыбы и животных способствует переходу (до 70...80%) радионуклида в бульон. Следовательно, в случае загрязнения мяса животных и рыб ^{137}Cs можно существенно снизить поступление радионуклида в рацион человека, удаляя бульон.

При оценке физико-химического состояния стронция в молоке коров оказалось, что он, подобно кальцию, на 70...80% связан с казеином и около 20% в виде фильтрующейся формы. Причем стронций связан с казеином молока прочнее, чем кальций. В крови характер связи этих ионов имеет противоположную направленность.

НЕКОРНЕВОЕ ПОСТУПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В КОРМОВЫЕ КУЛЬТУРЫ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ИМИ ПРОДУКЦИИ ЖИВОТНОВОДСТВА

Радиоактивные вещества вследствие глобальных аварийных выбросов или каких-либо других причин, попадая из атмосферы на земную поверхность, могут непосредственно поступать в растения, оседая на их надземные части. Одни радионуклиды прочно сорбируются, другие смываются дождем, третьи проникают в растения и участвуют в обмене веществ в процессе их роста и развития.

Задержка растениями радиоактивных веществ, выпадающих из атмосферы, зависит от физических свойств выпадений (частицы, пары, роса, дождь, туман), дисперсности выпавшего материала и скорости роста растений.

Загрязнение рек, озер и др. водоемов происходит в результате оседания радионуклидов на их поверхности и путем смыва их дождевыми осадками, паводковыми и другими водами.

Естественный травостой удерживает 30...40% выпавшего количества гамма-излучающих нуклидов и около 30% цезия-137. Сеянные многолетние травы удерживают соответственно 20...40 и 7...15%. На пашне сразу после выпадения более 97% радиоактивных веществ сосредоточивается в верхнем 2-сантиметровом слое. В дальнейшем происходит постепенная миграция радионуклидов в глубь почвы.

Способность проникновения радионуклидов через поверхность листьев и стеблей была установлена путем нанесения растворов радионуклидов на растения, при этом интенсивность проникновения и включения радионуклидов в растения обусловлены физико-химическими свойствами элементов. Высокой подвижностью в растениях обладают радионуклиды цезия, йода, тория, низкой — радионуклиды стронция, церия, бария. Через листья в растения проникает от 20 до 60% поверхностно нанесенного раствора ^{137}Cs , а ^{90}Sr — всего лишь сотые доли процента (Р. М. Алексахин и др.).

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

значение фаза развития растений имеет при удержании на их поверхности малоподвижных радионуклидов. Так, выпавший на поверхность интенсивно растущих трав ^{90}Sr под действием ветра и осадков частично удаляется с их листьев, стеблей и перемещается в почву, а часть прочно фиксируется на поверхности растений. В зависимости от погодно-климатических условий время потерь радионуклидов растениями существенно изменяется. Период полупотери слабо закрепленной фракции радионуклидов стронция разными сельскохозяйственными культурами составляет 2,0...6,2 суток, а прочно фиксированной фракции — 8,3...28,4 суток. В среднем период времени, в течение которого содержание ^{90}Sr в пастбищной растительности снижается вдвое, составляет 14 дней. Знание скорости получищения поверхностно загрязненных кормовых растений от радионуклидов (уменьшения загрязненности вдвое) имеет важное прикладное значение для составления прогноза вероятного уровня радиоактивного загрязнения растений и принятия обоснованных мер снижения поступления радионуклидов в кормовые культуры. Значение такого прогноза можно иллюстрировать на примере аварии в 1957 г. в Англии на атомном предприятии. После выброса радиоактивных веществ во внешнюю среду содержание радионуклидов йода в траве, поедаемой лактирующими коровами, оказалось в два раза меньше ожидаемого. В этом случае прогноз был составлен без учета скорости получищения растений от радионуклидов и оказался весьма приближенным.

Знание количества и длительности пребывания радионуклидов на стеблях имеет важное значение для определения рациональных сроков и технологии уборки урожая.

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. Дополнительный вклад смеси ^{90}Sr , ^{106}Rt и ^{144}Ce в процессе уборки естественных трав может достигать 50%

от размеров поступления ^{90}Sr через корневые системы. Следовательно, при уборке сельскохозяйственных культур следует учитывать повторное радиоактивное загрязнение их почвой, и с целью его снижения необходимо использовать такие технологии, которые в меньшей степени загрязняют продукцию.

При внекорневом радионуклидным загрязнении растительности переход их из корма в организм животных и продукцию животноводства, как правило, выше, чем при корневом поступлении. Для оценки перехода радионуклидов из выпадений в кормовые культуры, организм сельскохозяйственных животных, получаемую продукцию применяют коэффициенты пропорциональности.

Коэффициенты пропорциональности рассчитываются как отношение концентрации радионуклида в продукции (растениях или тканях животных) к плотности загрязнения почвы на единицу площади — $(\text{Бк}/\text{кг})$ продукции / $(\text{Бк}/\text{м}^2)$ почвы.

Эти коэффициенты характеризуют взаимосвязь концентрации радионуклидов в кормах или продуктах животного происхождения с уровнем выпадения их из атмосферы.

При непрерывных глобальных выпадениях наиболее высокие концентрации радионуклидов обнаруживаются в продукции растениеводства, меньшие — в продукции животноводства. Концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs в кормах превосходит концентрацию в молоке соответственно в 100 и 30 раз, в мясе — в 50 и 10 раз. Наибольшей подвижностью в цепи «воздух — растение — животные — продукция животноводства» обладают ^{90}Sr , ^{131}I и ^{137}Cs , менее подвижны — ^{106}Rt , ^{144}Ce , U.

РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ЛЕСНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ

При выпадении радиоактивных веществ на территории лесных массивов значительная часть радионуклидов, опускаясь, задерживается кронами деревьев, осаждаясь на листьях, хвое, 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 метров вглубь леса их задерживается в 2...10 раз больше, чем в лесных массивах. Плотность радиоактивного загрязнения в наветренных опушках иногда в 30 раз выше, чем на открытых территориях.

В миграции радионуклидов из крон под полог леса важную роль играет процесс опадания листьев, хвои, коры, ветвей. 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 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 разнос с водой и ветровым переносом, способствуя тем самым стабилизации радиоэкологической обстановки на загрязненных землях. Однако со временем в загрязненном лесу усиливается процесс корневого поступления радионуклидов в лесную растительность. В гидроморфных ландшафтах корневое поступление происходит в 10...20 раз интенсивнее (Е. С. Мурахтанов).

Во время аварии на ЧАЭС наибольшему радиоактивному загрязнению подверглись лесные фитоценозы, особенно хвойные. В них выпало радионуклидов в 3...5 раз больше, чем на пашне и лугах. Леса служили естественными фильтрами, задерживающими радиоактивные аэрозоли. Для радиоактивного загрязнения естественных фитоценозов характерна большая пестрота. Даже в зонах наибольшего загрязнения в непосредственной близости к месту катастрофы обнаружены массивы лесных и луговых угодий, отличающиеся по уровню загрязнения в 10...20 раз на расстоянии друг от друга 0,5...1 км. Исследования радиоэкологической обстановки в лесных комплексах показали, что в год аварии на ЧАЭС до 20% выпавших на территории радионуклидов было адсорбировано на поверхности хвои (листьев), веток, стволов древесных пород. К 1990 г. эта величина составляла менее 1%.

Период получищения поверхностно загрязненных наземных органов древесных растений составил 160...170 дней. В первые 2...3 месяца с момента аварии основная масса радионуклидов (до 95%) находилась в лесной подстилке. В последующие годы шла дифференциация этой концентрации в зависимости от скорости разложения подстилок. Наибольшее содержание радионуклидов (75%) обнаружено в подстилке сосняков, меньше (50%) — березняков, еще меньше (30%) — ольшанников и дубов. За три года с момента аварии миграция радионуклидов отмечалась на глубину 10...15 см.

В настоящее время гамма-активность почв и растений в основном обусловлена ^{137}Cs , β -активность — ^{90}Sr , α -активность — изотопами ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu .

В живом напочвенном покрове лесных насаждений высокой удельной радиоактивностью обладают зеленые мхи — 10...5 Ки/кг, а также лишайники — 10...4 Ки/кг. Шляпочные грибы повсеместно имели значительную радиоактивность — 10^{-4} ... 10^{-5} Ки/кг, что на 1...2 порядка выше, чем у сосудистых высших растений. Большой активностью отличались также земляника (10^{-6} ... 10^{-7} Ки/кг), малина (10^{-5} ... 10^{-6} Ки/кг), черника (10^{-6} Ки/кг) за счет аккумуляции ^{90}Sr и ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu (В. И. Парфенов, Б. И. Якушев и др., 1990). Эти обстоятельства необходимо учитывать ветеринарной радиологической службе, осуществляющей ветеринарно-санитарный контроль.

МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ПО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ ЦЕПОЧКАМ

В случае корневого поглощения радионуклидов растениями интенсивность включения их в процессы миграции по биологическим цепям определяется типом почвы и физико-химической природой элемента. Скорость и размеры корневого усвоения радионуклидов растениями определяются растворимостью радиоактивных веществ, физико-химическими свойствами почв и физиологическими особенностями растений. Так как радионуклиды разных элементов сорбируются почвенно-поглощающим комплексом не одинаково, то и перенос их из почвы в растения происходит различно.

Накопление радионуклидов растениями зависит от типа почв: хуже они всасываются из сероземов и черноземов, а лучше всего из торфоболотных и легких почв (песчаные и подзолистые); красноземы и лугово-карбонатные почвы занимают промежуточное положение.

При внекорневом пути поступления более подвижным является ^{137}Cs . Поступление ^{90}Sr и других радионуклидов происходит при этом в десятки раз медленнее. При корневом поступлении наиболее подвижным является ^{90}Sr . ^{137}Cs сильнее сорбируется почвой и поэтому в относительно меньших количествах переходит из почвы в растения.

По корневому пути из почвы во все последующие годы после выпадения радионуклидов происходит загрязнение грибов, ягод, дикорастущих плодов, лекарственных и кормовых растений.

В луговых почвах радионуклиды адсорбированы в слое дернины 0...5 см, миграция их по профилю почвы происходит очень медленно. На лугах, загрязненных чернобыльскими выбросами, после распада короткоживущих радионуклидов радиоактивность обуславливается в основном ^{137}Cs , ^{90}Sr .

У травянистых видов идет значительное накопление изотопов цезия и стронция. При содержании ^{90}Sr в почве до 30 Ки/км^2 в растениях накапливается его от $2,2 \dots 10^{-7}$ до $4,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ки/кг}$. Это очень высокое загрязнение. Наблюдения показали, что растения естественных кормовых угодий всегда обладают более высокой удельной радиоактивностью, чем сеяные травы и различные сельскохозяйственные культуры. Объясняется это тем, что радионуклиды в почвах естественных кормовых угодий сосредоточены в основном в слое 0...5 см, создавая там высокую концентрацию радиоактивных изотопов в единице объема почвы. При перепашке почвы происходит разбавление концентрации радионуклидов и создаются условия для их меньшей усвояемости растениями. Это подсказывает путь улучшения естественных кормовых угодий в условиях радиационного загрязнения.

За счет корневого поступления в основном происходит накопление радионуклидов и в древесине. Так, через 6 лет после чернобыльских выпадений содержание радионуклидов в древесине возросло в 5...15 раз.

По способности к накоплению растениями радионуклиды образуют ряд: $^{65}\text{Zn} > ^{90}\text{Sr}, ^{137}\text{Cs}, ^{59}\text{Fe} > ^{144}\text{Ce}$, рутений-106, $^{95}\text{Zr} > ^{239}\text{Pu}$, прометий-147, $^{91}\text{Y}, ^{235}\text{U}$.

Большинство искусственных радионуклидов прочно сорбируются почвенным поглощающим комплексом и включаются в биологический круговорот в сравнительно небольших количествах. Исключение составляют ^{65}Zn , ^{89}Sr , ^{90}Sr , отличающиеся наибольшей подвижностью в системе «почва — растение». Например, коэффициент накопления ^{65}Zn при переходе из воды в почву, а затем в траву пастбищ равен 440 (мкКи/г сырого вещества)/(мкКи/мл воды), а цезия, кобальта и церия — лишь 0,19; 0,07 и 0,03 соответственно. 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 Белорусско-Украинского Полесья 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: $^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr} > ^{144}\text{Cr} > \text{рутений-106} > ^{95}\text{Zr}$. 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 водным раствором поступление радионуклидов к растениям из почвы резко уменьшается. Это уменьшение для ^{90}Sr составляет примерно 20 раз, для ^{137}Cs и ^{144}Cr — сотни и даже тысячи раз. Весьма малой миграционной способностью из почвы в растения отличаются ^{106}Ru и ^{95}Zr . Поскольку фиксация радионуклидов почвенно-поглощающим комплексом происходит не одновременно, а растянуто во времени, доступность их растениям снижается постепенно. В первый год попадания в почву ^{90}Sr переход его в растения на 20...30% больше, чем в последующие годы. По сравнению со ^{90}Sr биологическая доступность из почвы растениям ^{137}Cs убывает со временем значительно быстрее. Так, усвоение ^{137}Cs растениями на второй год после поступления в почву снижалось

в 3 раза, на третий — в 5 раз, а через восемь лет — в 10 раз. Наибольший эффект наблюдается на почвах, богатых глинистыми минералами, особенно иллитом и вермикулитом. Переход радионуклидов из почвы в растения во многом определяется их видовыми и сортовыми особенностями (строение корневой системы, характер метаболизма). Исследования И. Т. Моисеева, проведенные в полевых условиях, показали, что видовые различия в накоплении ^{137}Cs зерновыми и зернобобовыми культурами достигают четырнадцатикратной величины. Сортовые различия при этом находятся в пределах 1,2...2 раза.

Наибольшей способностью накапливать ^{137}Cs отличаются травостой естественных пастбищ и сенокосов. Это обусловлено, с одной стороны, аккумуляцией дерниной радионуклидов в наиболее доступной для растений форме, а с другой стороны, особенностями формирования корневой системы естественными лугопастбищными культурами по сравнению с полевыми корневыми культурами. Поскольку накопление радионуклидов в урожае сельскохозяйственных растений определяется концентрацией их в почве и биологической доступностью, коэффициенты пропорциональности для различных культур не одинаковы. При поверхностном загрязнении естественных кормовых культур одним ^{90}Sr , равным 1 мКи/км², 1 кг сухого вещества естественных трав содержит 4,8 стронциевых единиц (с. е.), сеяных злаковых трав — 1,5, свеклы — 1,7, клубней картофеля — 1,56, а 1 кг зерна пшеницы — 0,8 с. е. (Р. М. Алексахин, Н. А. Корнеев, А. Н. Сироткин и др.).

Поглощение радионуклидов растениями из почвы зависит также от ее состава. Почвы тяжелого механического состава отличаются большей поглотительной способностью, чем легкие. Существенное влияние на переход из почвы в растения ^{137}Cs оказывает содержание в ней органического вещества. Поступление этого радионуклида в растения из торфянистых почв превышает таковое из минеральных в несколько раз. Данный факт может иметь определенное значение при оценке загрязнения естественных и культурных сенокосов и пастбищ в целях разработки мероприятий по дезактивации и рационального их использования. В период массированных глобальных радиоактивных выпадений (1963–1964) было

отмечено, что уровень загрязнения растений в северных районах существенно выше, чем в южных. В Северной Америке и в Скандинавии кормовые растения естественных пастбищ накапливали ^{90}Sr и ^{137}Cs в десять раз больше, чем аналогичные растения в южных странах. При этом из всех видов кормов зерновая продукция содержит наименьшее количество радионуклидов по сравнению с кормами из вегетативных органов растений.

Перенос питательных веществ между трофическими уровнями называют пищевой цепью. В природе пищевые цепи не изолированы одна от другой, а тесно переплетены и образуют сложную разветвленную сеть, которую называют пищевой сетью. Механизмы, с помощью которых растения и животные получают необходимые для их роста неорганические вещества из почвы, аналогичны тем механизмам, посредством которых радионуклиды поступают в биологические системы. Таким образом, естественные и искусственные радионуклиды стабильных химических элементов также циркулируют в биосфере по характерным биологическим цепям, проникая из внешней среды в организмы, а затем снова возвращаясь во внешнюю среду.

Закономерности перехода радионуклидов в трофических цепях и сетях сельскохозяйственных животных изучены еще недостаточно. В частности, не обобщены результаты радиоэкологических исследований по изучению механизмов миграции радионуклидов по пищевым цепям, ведущим к сельскохозяйственным животным, и метаболизма их в организме при разных путях поступления.

ПОСТУПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В МОЛОКО ЖИВОТНЫХ

При пастбищном содержании и кормлении коров поступление изотопов в молоко происходит наиболее интенсивно, особенно в условиях внешнего загрязнения растений. При среднем уровне травостоя корова в сутки потребляет корм со 160 м^2 пастбища. В таких условиях максимальная концентрация ^{131}I в молоке наблюдается на 4...5-е сутки после выпадения, а коэффициент перехода равен $0,16 \text{ (Ки/л)/(Ки/м}^2\text{)}$. Прогноз по-

ступления радионуклидов в корма, молоко и мясо можно определить по формуле

$$C_i = K_B F_B,$$

где C_i — содержание i -го радионуклида в кормах или продуктах животноводства, Ки/кг (л); F_B — интенсивность выпадения i -го радионуклида, Ки/м² за месяц; K_B — воздушный коэффициент пропорциональности, Ки/кг (л)/Ки/м² в месяц.

Так как содержание радионуклидов в продукции животноводства находится в прямой зависимости от содержания их в растениях и почвах, то для составления прогноза вероятного поступления радионуклидов в рационы животных необходимо располагать количественными характеристиками, связывающими концентрацию радионуклидов в почвах, кормах и продукции животноводства (табл. 7).

По отношению к дерново-подзолистым и торфяно-песчаным почвам коэффициент перехода ¹³⁷Cs из дерново-торфя-

Таблица 7

Коэффициенты перехода (по данным А. Н. Сироткина и др.) ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs из разных почв в смешанный рацион и молоко лактирующих коров (Бк/кг корма (молока)/(Бк/км²))

Тип почвы	Почва — рацион, ⁹⁰ Sr	Почва — рацион, ¹³⁷ Cs	Почва — молоко, ⁹⁰ Sr	Почва — молоко ¹³⁷ Cs
Темно-серая лесная	2,6	2,5	—	—
Дерново-подзолистая супесчаная, дерново-торфяная, иловато-болотная	2,34	7,95	0,32	5,45
Дерново-подзолистая, черноземная, торфяно-болотная	0,72	1,62	—	—
Дерново-подзолистая, песчаная, торфяно-песчаная	0,50	23,6	0,12	19,1
Дерново-глиеая, дерново-подзолистая, глееая супесчаная, суглинистая	1,1	0,72	—	—
Дерново-подзолистая, суглинистая, супесчаная, торфяно-болотная	—	—	0,18	0,36

ных иловато-болотных почв в 3,5, из суглинистых, торфяно-болотных почв — в 48, а из темно-серых почв — в 64 раза меньше. Накопление ^{90}Sr в кормах и молоке из данных типов почв характеризуется противоположной направленностью.

Под коэффициентом перехода понимают отношение содержания радионуклида в каждом последующем звене пищевой цепочки к предыдущему.

При хроническом поступлении с кормом ^{90}Sr в 1 литр молока его переходит 0,05...0,2% по отношению к поступлению с рационом. При этих условиях в молоко коров переходит 0,25...1% ^{137}Cs . На эти показатели большое влияние оказывают тип кормления коров, состав корма, продуктивность животных и т. д.

Из смешанного рациона усвояемость организмом радиоцезия выше, чем из сеного, вследствие разной степени его доступности.

При одинаковом содержании ^{90}Sr и ^{137}Cs в почве концентрация стронция примерно в 10 раз в траве выше, чем цезия.

Содержание щелочных и щелочноземельных радионуклидов в мышечной и костной ткани выше, чем в получаемом от этих животных молоке. Это особенно характерно для ^{90}Sr и ^{137}Cs .

Для звена почва — молоко по интенсивности перехода радионуклиды располагаются в следующей последовательности:

калий \gg кальций $>$ цезий = стронций.

ПОСТУПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ЯЙЦА КУР-НЕСУШЕК

При поступлении с кормом курам-несушкам ^{131}I через 6 суток наступает состояние экологического равновесия между поступлением и выделением его с яйцом. К этому сроку выделение радионуклида с одним яйцом достигает максимального значения — 8% от суточного поступления, что в 4,7...6,6 раз меньше, чем ^{90}Sr . В этом случае основное количество ^{131}I концентрировалось в желтке, в котором оно было в 20...50 раз больше, чем в белке и желтке, вместе взятых. При поступлении курам-несушкам ^{137}Cs равновесное состояние его между содержанием в рационе и яйце наступает в те

же сроки, что и ^{131}I . В эти сроки содержание ^{137}Cs в яйце достигает максимальных значений и равно 2,3...3,3% от суточного потребления. Распределение радионуклида по компонентам яйца также неравномерно. Концентрация ^{137}Cs в белке превышает концентрацию в желтке в 2...3 раза, а в скорлупе содержится лишь 1...2% от общего количества радионуклида в яйце. Переход радиоактивных продуктов из корма в компоненты яйца и яйцо в целом не зависит от сезона года.

Переход важнейших радиоактивных продуктов нейтронной активации из корма в яйцо кур имеет свои особенности. Хроническое оральное поступление ^{65}Zn и ^{59}Fe птице сопровождается первоначальным ростом концентрации их в яйце. Максимальная концентрация ^{65}Zn в скорлупе, белке и желтке наблюдается на 7, 8 и 15-е сутки, а ^{59}Fe — в течение 8 суток.

Из рациона в яйцо переходит 6,2% цинка-65 и 3,22% железа-59. Более 99% радионуклидов сосредоточено в желтке и менее 1% — в белке и скорлупе.

Контрольные вопросы

1. Какие научно-практические вопросы решает сельскохозяйственная радиоэкология?
2. Под влиянием каких факторов формируются естественные и искусственные источники ионизирующих излучений?
3. Каким образом происходит радионуклидное загрязнение окружающей среды?
4. Каковы характерные черты внешнего загрязнения растительности?
5. Каким образом радионуклиды мигрируют в окружающей среде?
6. Чем определяется способность радионуклидов поступать в растения и накапливаться в них?
7. Что такое сельскохозяйственная пищевая цепочка?
8. Как радионуклиды поступают в организм сельскохозяйственных животных?
9. Каковы основные закономерности поступления радионуклидов в молоко?



ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ТОКСИКОЛОГИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Токсикология радиоактивных элементов (радиотоксикология) составляет специальную отрасль знаний, предметом которой являются:

- изучение путей поступления в организм, закономерностей распределения в нем и включение в молекулярные структуры тканей (инкорпорирование), особенностей накопления (депонирование) радиоактивных изотопов в различных органах и выведение их из организма;
- установление допустимых уровней содержания и поступления радионуклидов в воздухе, воде, кормах, продуктах питания и организме человека;
- исследование биологического действия инкорпорированных радиоактивных изотопов и изыскание эффективных средств для профилактики поражения;
- разработка методов и средств предотвращения резорбции радиоактивных изотопов и ускоряющих их выведение из организма.

Наиболее глубоко исследуется влияние на организм человека радионуклидов, широко используемых в промышленности, научных и медицинских исследованиях, а также образующихся в результате расщепления ядерного горючего.

Радиоактивные изотопы любого химического элемента периодической системы Д. И. Менделеева при попадании в организм участвуют в обмене веществ точно так же, как стабильные изотопы данного элемента. Биологическое действие радиоактивных изотопов определяется параметрами их

радиоактивных излучений. Действие радионуклидов, попадающих внутрь организма, в принципе не отличается от действия внешних источников ионизирующего излучения. Их особенностью является лишь то, что они, включаясь в обмен веществ, могут оставаться в тканях длительное время. Активность радионуклидов нельзя погасить ни химическими, ни физическими средствами.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ТОКСИЧНОСТЬ РАДИОНУКЛИДОВ

Токсичность радионуклидов зависит от следующих факторов: вида и энергии излучения, периода полураспада; физико-химических свойств вещества, в составе которого радионуклид попадает в организм; типа распределения по тканям и органам; скорости выведения из организма.

Вид и энергия излучения. Энергия излучения имеет прямую связь с поражающим действием радиоактивного изотопа: чем она больше, тем сильнее поражение. Вид излучения является одной из главных характеристик, определяющих токсичность радиоизотопа. Степень биологического действия различных видов излучений зависит от их *линейной передачи энергии* (ЛПЭ). Величина ЛПЭ частицей или квантом веществу обуславливает их линейную плотность ионизации (удельную ионизацию). У тяжелых частиц (α -частицы, протоны) плотность ионизации очень высокая, у легких (β -частицы, гамма-лучи) — низкая, т. е. чем выше энергия и короче пробег частицы, тем больше у нее ЛПЭ (табл. 8).

Как правило, излучения, имеющие высокую ЛПЭ, обладают большой биологической эффективностью. Данный феномен свидетельствует о том, что степень действия различных видов излучения зависит не только от общего количества поглощенной энергии, но и от геометрии распределения ее в органах, тканях и клетках.

Для выражения различий биологического действия излучений с неодинаковыми значениями ЛПЭ принят *коэффициент относительной биологической эффективности* (ОБЭ). Значения его взяты относительно рентгеновых лучей и зави-

Таблица 8

**Некоторые константы, характеризующие
биологическое действие ионизирующих излучений**

Излучение	Энергия, Мэв	Пробег в мышечной ткани	Среднее число ионизаций на пути в 1 мкм	Средняя ЛПЭ, кэВ/мкм	Коэффициент ОБЭ
Рентгеновы и гамма-лучи	1	20 см и более	15	0,49	1
β -частицы	1	4,4 мм	8	0,23	1
α -частицы	5	35 мкм	4500	143,0	10
Протоны	1	22 мкм	—	45,0	10
Нейтроны	0,9	—	840	27,4	10

сят от излучаемого объекта и характера облучения. Например, при общем облучении организма для быстрых нейтронов коэффициент ОБЭ равен 10, а при местном облучении половых желез — 35. Период полураспада радионуклида является важной характеристикой его биологической активности. Наибольшую опасность для млекопитающих и птиц представляют изотопы с периодом полураспада от нескольких дней до нескольких десятков лет. Это объясняется тем, что при коротком периоде полураспада, измеряемом секундами-минутами, основная масса радионуклида распадается, не достигнув тканей организма, и, следовательно, не создает опасной концентрации, например ^{210}Po или ^{220}Ra ; период полураспада их составляет $3 \cdot 10^7$ с. Это же можно сказать и об изотопах ^{134}I , $^{136}\dots^{140}$, являющихся продуктами деления тяжелых ядер; период полураспада их равен нескольким секундам-минутам. Радионуклиды с большим периодом полураспада (десятки тысяч лет и более) в естественных условиях также не смогут создать эффективной дозы, которая привела бы к развитию лучевого заболевания. Например, ^{238}U имеет период полураспада $4,5 \cdot 10^9$ лет; к тому же если учесть, что в земной коре его находится 0,0001%, а в организме еще меньше, то получается, что в естественных условиях он не вызовет у животных лучевой болезни. Однако в некоторых случаях токсичность коротко или долгоживущего радионуклида может усиливаться дочерними радионуклидами.

Физико-химические свойства вещества, в составе которого радионуклид попадает в организм. При внутреннем поступлении радионуклидов в организм их биологическое действие во многом будет определяться агрегатным состоянием вещества. Наибольшее действие оказывают те радионуклиды, которые легко образуют газ и водорастворимые соединения. Они интенсивно и в большом количестве всасываются в кровь, быстро распространяются по всему организму или концентрируются в соответствующих органах.

Биологическое действие малорастворимых или нерастворимых радионуклидов определяется степенью дисперсности аэрозоля или порошка, в форме которого вещество поступает в организм. Нерастворимые радиоактивные частицы, попадая в легкие, на слизистые оболочки, в желудочно-кишечный тракт с кормом или водой, могут адсорбироваться эпителиальными клетками или клетками ретикулоэндотелиальной системы или задерживаться в желудке, кишечнике и длительное время облучать ткани, вызывая выраженное местное радиационное поражение. На степень биологического действия радионуклидов при внутреннем поступлении большое влияние оказывает наличие нерадиоактивных изотопов этого элемента или аналога химического элемента в данном веществе. Например, элементы — аналоги кальция и стронция принадлежат ко второй группе элементов. В радиохимии для предотвращения потерь радиоактивного изотопа в химических реакциях специально добавляют весовые количества нерадиоактивных соединений этого элемента или его химического аналога. Эти добавки принято называть носителями; в первом случае они называются изотопными, во втором — неизотопными. При одновременном поступлении в организм радионуклида и его носителя всасывание и отложение их в тканях идет в прямо пропорциональном отношении к поступившему количеству. На основании указанной закономерности предложены методы защиты отдельных органов от лучевого поражения радионуклидами. Например, полноценные по кальцию рационы (кальций — неизотопный носитель стронция) значительно уменьшают инкорпорацию радиоизотопов стронция в костной ткани.

КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ПО ИХ ТОКСИЧНОСТИ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

По степени биологического действия радионуклиды как потенциальные источники внутреннего облучения разделены на пять групп.

Группа А — радионуклиды особо высокой радиотоксичности. К данной группе относятся радиоактивные изотопы: ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{230}Th , ^{232}U , ^{238}Pu и др. Среднегодовая допустимая концентрация (Ки/л) для них в воде установлена в пределах $X \cdot (10^{-8} \dots 10^{-10})$.

Группа Б — радионуклиды с высокой радиотоксичностью, для которых среднегодовая допустимая концентрация в воде равна $X \cdot (10^{-7} \dots 10^{-9})$ Ки/л. Сюда относятся изотопы: ^{106}Ru , ^{131}I , ^{144}Ce , ^{210}Bi , ^{234}Th , ^{235}U , ^{241}Pu и др. К этой же группе относятся ^{90}Sr , для которого указанная концентрация равна $4 \cdot 10^{-10}$.

Группа В — радионуклиды со средней радиотоксичностью. Для данной группы среднегодовая допустимая концентрация в воде установлена $X \cdot (10^{-7} \dots 10^{-8})$ Ки/л. В группу включены изотопы: ^{22}Na , ^{32}P , ^{35}S , ^{36}Cl , ^{45}Ca , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{89}Sr , ^{90}Y , ^{99}Mo , ^{125}Sb , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{196}Au и др.

Группа Г — радионуклиды с наименьшей радиотоксичностью. Среднегодовая допустимая концентрация их в воде равна $X \cdot (10^{-7} \dots 10^{-8})$ Ки/л. В группу входят следующие изотопы: ^7Be , ^{14}C , ^{18}F , ^{51}Cr , ^{55}Fe , ^{64}Cu , ^{129}Te , ^{197}Pt , ^{197}Hg , ^{200}Tl и др.

Группа Д. Эту группу составляет тритий и его химические соединения (окись трития и сверхтяжелая вода). Допустимая концентрация трития в воде установлена $3,2 \cdot 10^{-6}$ Ки/л.

При работе предъявляются надлежащие санитарные требования на основе степени радиотоксичности и соответственно радиоактивному изотопу.

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СТЕПЕНЬ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Биологическая эффективность радиоактивных элементов определяется физическими (доза, период полураспада, вид и энергия излучения) и биологическими (тип распределения, пути и скорость выведения) свойствами радиоактивных

изотопов, видовой и индивидуальной радиочувствительностью животных.

Для радиоактивных изотопов с равномерным типом распределения в организме характерно малое различие в дозах, вызывающих острое, подострое и хроническое течение болезни. При их поступлении у животных отмечается уменьшение массы селезенки и семенников, сильное подавление лимфоидного кроветворения, преимущественное возникновение в отдаленные сроки опухолей мягких тканей.

При поражении изотопами со скелетным типом распределения наблюдаются увеличение селезенки, вследствие эктопического кроветворения; относительно более сильное подавление костномозгового кроветворения; отсутствие резкой атрофии семенников; преимущественное возникновение опухолей костей.

При воздействии изотопов с печеночным и почечным типом распределения максимальные изменения наблюдаются соответственно в печени и желудочно-кишечном тракте, почках и мочевыводящих путях. Существенным фактором, определяющим течение и исход лучевого заболевания, является продолжительность эффективного периода полувыведения. Для радионуклидов с коротким эффективным периодом (^{90}Y , ^{137}Cs , ^{140}Ba и др.) при однократном или непродолжительном их поступлении в организм характерно малое различие между дозами, вызывающими острое, подострое и хроническое течение болезни. При этом отмечается быстрая нормализация картины крови и общего состояния животного. При тех же условиях воздействия радионуклидов с большим эффективным периодом полувыведения (^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{144}Ce , ^{239}Pu и др.) отмечается значительное различие в дозах, обуславливающих острое, подострое и хроническое течение болезни. Восстановительный период болезни при этом очень продолжительный, нормализация функции происходит очень медленно, часто возникают злокачественные опухоли, на многие годы может затягиваться тромбоцитопения, анемия, бесплодие и другие нарушения. У животных, предназначенных для убоя на мясо, эти эффекты могут не успеть проявиться, однако у племенного и молочного скота опасность их возникновения вполне реальна.

Животные в пищевой цепочке человека служат звеном, уменьшающим радиационную опасность, так как они обладают способностью к фильтрации и «захвату в ловушку» радиоактивных нуклидов и, таким образом, несколько снижают поступление последних в организм человека с пищей.

Из изотопов, являющихся продуктами деления тяжелых ядер, наиболее важное значение для сельскохозяйственных животных и человека имеют три радиоактивных изотопа: ^{131}I , ^{90}Sr , ^{137}Cs .

ХАРАКТЕРИСТИКА ПУТЕЙ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ И ИХ СМЕСЕЙ В ОРГАНИЗМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ

Пути поступления радионуклидов в организм. Радиоактивные вещества могут проникать в организм животных через легкие, при вдыхании загрязненного воздуха; через пищеварительный тракт с кормом и водой, содержащими радиоактивные вещества: через неповрежденную кожу, слизистые оболочки и раны. Характер распределения радионуклидов в организме зависит от основных химических свойств элемента, формы вводимого соединения, пути поступления и физиологического состояния организма.

Степень проникновения радиоактивного аэрозоля и задержка его в легких зависят от заряда частиц и их размеров. Газообразные радиоактивные вещества очень быстро всасываются с поверхности легких в кровь и разносятся по всему организму. Частицы диаметром менее 0,5 мкм легко проникают в легкие и также легко покидают их, не задерживаясь. Частицы размером от 0,5 до 1 мкм задерживаются в легких на 90%, пылинки размером более 5 мкм фиксируются до 20%. Более крупные частицы оседают в верхних дыхательных путях, откашливаются и затем заглатываются и поступают в желудок.

Задержавшиеся в легких радиоактивные частицы быстро всасываются в кровь, однако определенная часть их фагоцитируется макрофагами, в результате чего в легочной ткани может создаваться большая радиоактивность на длительное время.

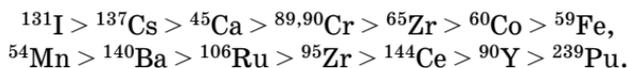
Медленно покидают легкие плохо растворимые соединения. Высокая концентрация таких радионуклидов часто обнаруживается в лимфатических узлах корней легких. Очень быстро всасывается в легких окись трития, растворимые соединения щелочных и щелочноземельных элементов, медленно — Рu, Am, Ce, Cm и другие тяжелые металлы.

Для сельскохозяйственных животных основным путем поступления радионуклидов в организм следует считать пищеварительный тракт, особенно при пастбищном содержании.

Всасывание радионуклидов у животных. Характер всасывания радиоактивных веществ в организм животных определяется многими факторами и зависит от пути поступления, физико-химических свойств радионуклидов, вида, возраста, физиологического состояния животных и многих других факторов. Принципиально всасывание подразделяется на активное и пассивное. При активном всасывании радионуклиды избирательно проникают через клеточную мембрану подобно обычным макро- или микроэлементам. При пассивном — радионуклиды проникают за счет диффузии.

Наиболее важным местом активного всасывания является желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), а при воздушном пути поступления — легкие.

У животных с однокамерным желудком скорость резорбции радионуклидов выше, чем у жвачных, имеющих многокамерный желудок. По скорости всасывания в ЖКТ радионуклиды располагаются в ряд:



Галогены, щелочные и щелочноземельные элементы всасываются в максимальных количествах (от 5 до 100%), а тяжелые и редкоземельные элементы за счет образования в кишечнике слаборастворимых соединений с фосфатами и жирными кислотами всасываются очень слабо (от 0,001 до 2,3%). Трансурановые и редкоземельные элементы в кишечнике образуют труднорастворимые соединения, поэтому степень всасывания их очень низкая (табл. 9).

Таблица 9

**Величина резорбции некоторых радиоактивных веществ
из желудочно-кишечного тракта
(по Д. И. Закутинскому, Ю. Д. Парфенову)**

Элемент	Всасывание, %	Элемент	Всасывание, %
Натрий	100	Полоний	6
Рубидий	100	Барий	5
Цезий	100	Рутений	3
Йод	100	Уран	3...6
Стронций	9...40...60	Иттрий	0,01
Кобальт	30	Цирконий	0,01
Магний	10	Лантан	0,01
Цинк	10	Церий	0,01
Свинец	8	Плутоний	0,01

Всасывание радионуклидов происходит в разных отделах ЖКТ. В верхних и средних отделах кишечника главным образом всасываются ^3H , ^{18}F , ^{22}Na , ^{99}Mo , ^{131}I , ^{45}Ca , ^{59}Fe , $^{89,90}\text{Sr}$, ^{137}Cs , ^{140}Ba . ^{32}P , ^{45}Ca , $^{89,90}\text{Si}$ всасываются в преджелудках и кишечнике. Однако большинство радионуклидов наиболее интенсивно всасываются в двенадцатиперстной, тощей, ободочной и подвздошной кишке, минимально — в желудке.

Всосавшиеся в кровь радиоактивные изотопы участвуют в обмене веществ организма точно так же, как стабильные изотопы данного элемента.

Чем больше масса тела животных, тем медленнее происходит всасывание радионуклидов. Это объясняется тем, что чем меньше масса тела у теплокровных животных, тем интенсивнее у них протекает обмен веществ для компенсации потери тепла вследствие увеличения относительной поверхности тела (Л. А. Булдаков и др.).

У растущих животных всасывание радионуклидов протекает более активно, чем у взрослых. Возраст организма — наиболее существенный фактор, изменяющий скорость всасывания в ЖКТ животных. У новорожденных животных вследствие интенсивного обмена веществ и скорости их роста всасывание радионуклидов в несколько раз выше.

На величину и скорость всасывания существенно влияет количество поступивших веществ. Чем больше их поступает, тем меньший процент всасывается.

Эффективность всасывания радионуклидов зависит также от того, в каком виде он поступает в организм животного. Было установлено, что при спаивании бычкам ^3H в виде тритиевой воды, содержание ^3H в мягких тканях не превышало 2,8%. Если такое же количество трития задавали в составе порошка молока от коров, получавших тритиевую воду, то содержание ^3H в мягких тканях было в 15 раз больше. Кормление новорожденного теленка в течение 3,5 мес. натуральным молоком коровы-матери, получавшей во время последних 40 сут беременности тритиевую воду, сопровождалось увеличением ^3H в сухом остатке печени теленка в 40 раз по сравнению с введением теленку окиси трития с водой и в 25 раз в случае поступления его с сухим молоком. Во всех случаях обнаружено значительное включение ^3H в сухом остатке органов и тканей, однако в водной фазе содержание его оказалось в 3 раза выше. В ткани печени, яичек и тимуса ^3H не включается в ДНК, а сосредоточивается в белковой фракции (А. Н. Сироткин).

При поступлении стронция, бария, радия и других элементов в составе молочного рациона происходит заметное усиление (до 2 раз) их всасывания, что может быть вызвано наличием в молоке лактозы и лизина (Л. А. Булдаков и др.).

В экспериментальных исследованиях радионуклиды могут вводиться различными путями. Резорбция из мест введения радионуклидов, за исключением внутривенного, зависит, так же как и при поступлении через рот, от физико-химических свойств радиоактивного вещества. Различия скорости всасывания определяются иногда валентностью радиоактивных изотопов. Например, более интенсивно всасываются Pu^{+6} , затем Pu^{+3} , далее Pu^{+4} , что Д. И. Закутинский и Ю. Д. Парфенов объясняют различной степенью гидролиза вводимых солей в первичном депо. При прочих равных условиях интенсивность всасывания радионуклидов в кровь распределяется в следующем возрастающем порядке в зависимости от места введения — пероральное, подкожное, внутримышечное, ингаляционное, внутрибрюшинное. Объясняется это физиологическими и морфологическими особенностями соответствующих тканей.

Распределение радионуклидов в организме. Поведение всосавшихся в кровь радионуклидов определяется:

- биогенной значимостью для организма стабильных изотопов данных элементов, тропностью их к определенным тканям и органам; например, кальций выполняет специфическую роль, всегда входит в состав тканей, проявляет большую тропность к костной системе, йод имеет большую тропность к щитовидной железе;
- физико-химическими свойствами радионуклидов — положением элементов в периодической системе Д. И. Менделеева, валентной формой радиоизотопа и растворимостью химического соединения, способностью образовывать коллоидные соединения в крови и тканях и другими факторами.

По типу распределения радиоактивных нуклидов в организме их разделяют на четыре основные группы (Ю. И. Москалев), в особую группу выделяют изотопы йода (табл. 10).

Такое деление условно, ибо тип распределения элемента в некоторых случаях может меняться. В частности, распределение кислорода, азота, водорода, углерода зависит от тех химических соединений, в составе которых они поступают в организм.

Распределение в организме элементов, относящихся к определенной группе периодической системы Менделеева, имеет много общего. Элементы первой основной группы (Li, Na, K, Rb, Cs) полностью всасываются из кишечника, сравнительно

Таблица 10

Типы распределения радиоактивных элементов в организме

Типы распределения	Элементы
Равномерный	Элементы первой основной группы периодической системы: водород, литий, натрий, калий, рубидий, цезий, рутений, хлор, бром и др.
Скелетный (остеотропный)	Щелочноземельные элементы: бериллий, кальций, стронций, барий, радий, цирконий, иттрий, фтор и др.
Печеночный	Лантан, церий, прометий, плутоний, торий, марганец и др.
Почечный	Висмут, сурьма, мышьяк, уран, селен и др.
Тиреотропный	Йод, астат, бром

равномерно распределяются по органам и выделяются преимущественно с мочой. Элементы второй основной группы (Ca, Sr, Ba, Ra) хорошо всасываются из кишечника, избирательно откладываются в скелете, выделяются в несколько больших количествах с калом. Элементы третьей основной и четвертой побочной групп, в том числе легкие лантаноиды, актиноиды и трансурановые элементы, практически не всасываются из кишечника, откладываются в печени и в меньшей мере в скелете, выделяются преимущественно с калом. Элементы пятой и шестой основных групп периодической системы, за исключением Po, сравнительно хорошо всасываются из кишечника и выводятся почти исключительно с мочой в течение первых суток, благодаря чему в органах обнаруживаются в сравнительно небольших количествах.

Типы распределения радионуклидов в организме всех видов млекопитающих в принципе одинаковые, и они мало меняются с возрастом животных. У беременных самок радиоактивные изотопы проходят через плаценту и откладываются в тканях плода. Для молодых животных свойственно более интенсивное всасывание и депонирование радионуклидов в тканях. В связи с этим четче проявляется у некоторых радионуклидов неравномерность распределения по отдельным частям (участкам) органа. Например, у растущего молодняка поступающий в организм стронций-90 вначале в большом количестве откладывается в губчатых, а в последующем — в компактных частях костей. Неравномерность распределения радионуклидов в ткани может наблюдаться при воспалительных процессах. В очагах воспаления обычно отмечается их повышенное отложение, иногда в десятки раз.

Орган, в котором происходит избирательная концентрация радионуклида, вследствие чего он подвергается наибольшему облучению и повреждению, называется критическим. При поступлении нерастворимых соединений радионуклидов через органы дыхания, пищеварения, кожу критическими органами будут соответственно легкие, желудочно-кишечный тракт, кожа. Для некоторых радионуклидов критическими всегда являются одни и те же органы, например, для йода — щитовидная железа, стронция, кальция и радия — кости. Для

всех радионуклидов критическими органами будут кровеносная система и половые железы.

Эти органы выделены как критические, потому что они являются наиболее уязвимыми, даже при малых дозах радиации в них происходят существенные изменения.

Попавшие в организм радиоактивные изотопы, так же как и стабильные изотопы элементов, выводятся в результате обмена из организма с калом, мочой, молоком, яйцом и другими путями. Период, в течение которого из организма выводится половина поступившего количества элемента, называется биологическим периодом полувыведения. Убыль радиоактивных изотопов элемента из организма ускоряется за счет радиоактивного распада. Следовательно, уменьшение радиоактивных изотопов в организме происходит по биологическим закономерностям и по закону радиоактивного распада. Фактическую убыль их в организме принято выражать эффективным периодом полувыведения ($T_{эфф}$).

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНАХ И ТКАНЯХ

Накопление радионуклидов в органах и тканях животных связано с их физико-химическими свойствами, видом животных, их возрастом, физиологическим состоянием, а также с видом самого органа и ткани.

Для оценки накопленных радионуклидов используют количественное понятие «содержание» конкретных радионуклидов или их общую активность в органе, ткани или всем организме, которая выражается в абсолютных единицах (Бк или Ки) или в относительных единицах (% от суточного или общего их поступления в организм).

Для оценки скорости накопления в радиоэкологии используют понятие «кратность накопления», под которым понимают полученную активность радионуклидов в органах и тканях по отношению к их ежесуточному поступлению в организм.

Кратность накопления (F) определяют по формуле

$$F = Cm/g,$$

где C — концентрация радионуклидов в органах и тканях, (Бк/кг); m — масса органа или ткани, (кг); g — количество радионуклида, ежедневно поступающего в организм, Бк.

Наибольшую опасность представляют те радионуклиды, которые имеют высокую кратность накопления. Это, прежде всего, изотопы йода, стронция и цезия.

У разных видов животных кратность накопления каждого из радионуклидов различна. Для отложения стронция в скелете животные располагаются в следующем порядке:

крупный рогатый скот < козы < овцы < свиньи < куры,
а в мышцах и паренхиматозных органах:

kozy < крупный рогатый скот < овцы < куры.

^{137}Cs тоже наиболее интенсивно откладывается у кур и в меньшей степени в органах овец и крупного рогатого скота. С возрастом животных кратность накопления радионуклидов закономерно снижается (Н. А. Корнеев, А. Н. Сироткин).

Всасывание ^{144}Ce , ^{106}Ru и ^{185}V в ЖКТ животных происходит очень слабо. Поэтому отложение их в органах и тканях животных происходит незначительное. Напротив, продукты нейтронной активации (^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn) интенсивно резорбируются в ЖКТ и откладываются в паренхиматозных органах, тканях и скелете, при этом в печени откладывается максимальное количество.

Во время длительного поступления радионуклидов в организм животных скорость их накопления существенно меняется. В начале оно происходит интенсивно, а затем по мере насыщения тканей, постепенно замедляется и наконец наступает такой момент, когда устанавливается равновесие между вновь поступающими радионуклидами и выводимыми. С этого периода дальнейшего увеличения их в организме животных не происходит. Однако если животное станет получать большее количество радионуклидов, то они вновь начнут накапливаться до установления нового равновесия, но уже на более высоком уровне.

Напротив, если животные станут принимать с кормом меньшее количество радионуклидов, то они начнут выводиться из организма. Это явление имеет важнейшее практическое

значение для получения пригодной в пищу продукции на загрязненных территориях.

Время, в течение которого устанавливается равновесие, определяется природой радионуклида, а также сильно зависит от вида, возраста и физиологического состояния животных и напрямую связано со скоростью обмена веществ в организме. В мышечной ткани и паренхиматозных органах состояние равновесия для цезия устанавливается у крупного рогатого скота в интервале между 60-ми и 150-ми сутками, а у овец через 105 суток. Стронций в мягких тканях достигает своего равновесия намного быстрее — на 5...7-е сутки. Однако в костной ткани он продолжает интенсивно откладываться, вследствие своего выраженного к ней тропизма.

ВЫДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ОРГАНИЗМА

Попавшие в организм радионуклиды участвуют в обмене веществ по принципу, аналогичному своим стабильным носителям. В связи с этим они выводятся из организма через те же самые выделительные системы, что и их стабильные носители.

Основное количество радиоактивных веществ выводится через ЖКТ и почки. В меньшей степени они выводятся через кожу. У беременных и лактирующих животных часть радионуклидов выводится с новорожденным плодом и молоком.

Скорость выведения радионуклидов зависит от их природы, а также от вида, возраста, физиологического состояния животных и ряда других факторов.

Наиболее быстро из организма выводятся радионуклиды, депонирующиеся в мягких тканях, где высокая скорость обмена веществ. Существенное влияние на этот процесс оказывает состояние радионуклидов в тканях, то есть находятся они в свободном состоянии или связаны с тканевыми структурами. Свободные радионуклиды быстрее выводятся из организма — это ^{131}I , ^{106}Ru , ^{132}Te , ^{137}Cs . Связанные с тканевым белком и находящиеся в коллоидном состоянии радионуклиды выводятся медленнее — это ^{140}La , ^{142}Pr , ^{144}Ce , ^{147}Pm .

Остеотропные радионуклиды выводятся из организма хуже всего, потому что в костной ткани гораздо медленнее,

чем в мягких тканях, протекает обмен веществ. Кроме того, они способны включаться непосредственно в костную ткань, замещая там кальций (это ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{140}Ba и др.)

В зависимости от характера, источника и длительности поступления в организм животных может изменяться скорость выведения (экскреция) и роль выделительных систем в этом процессе.

Например, при однократном оральном введении ^{131}I в составе водного раствора и в составе корма оказалось, что в первом случае скорость его выведения у коров в 1,2 раза больше. При однократном оральном поступлении коровам стронция-89 с мочой выводится 1,34%, а после внутривенного введения — более 21% от поступившего количества.

Однако основным фактором, определяющим пути выведения радионуклидов из организма, являются их физико-химические свойства. Так, радионуклиды редкоземельных элементов, независимо от пути поступления, выводятся через ЖКТ и незначительно с мочой. Выведение же ^{91}Y , при разовом поступлении, через почки происходит в 3 раза интенсивнее, чем через ЖКТ. При однократном оральном введении ^{89}Sr с мочой его выделяется в пределах 1,34%, а после внутривенного введения — более 21%. Для ^{137}Cs различие путей выведения менее выражено. Так, при разовом внутривенном введении лактирующим коровам 33% его выводится через ЖКТ, при оральном — 40% (Л. И. Селецкая, В. П. Борисов, И. Я. Панченко, И. А. Сарапульцев и др.)

При хроническом поступлении радионуклидов значение путей их экскреции у животных также различно. Во многом они определяются теми же факторами, что и при однократном поступлении. Однако в этом случае большое значение начинает приобретать характер кормления животных, полноценность и качество кормов, наличие кормовых добавок и другие факторы.

При хроническом поступлении большая часть ^{131}I и ^{137}Cs выводится через почки, тогда как ^{60}Co , $^{89,90}\text{Sr}$, ^{106}Ru , ^{140}Ba , ^{109}W экскретируются из организма в основном через ЖКТ.

Введение в рацион животных стабильного изотопа не только изменяет скорость экскреции радионуклида, но и роль выделительных систем в этом процессе. Так, добавление в

корм пороссятам стабильного стронция уменьшает количество выводимого с мочой ^{89}Sr в 2 раза. Напротив, увеличение в рационе животных кальция примерно в 10 раз увеличивало выведение ^{89}Sr с мочой.

Наиболее интенсивно с молоком ^{131}I выводится в зимнее время. В конце беременности коров наблюдается увеличение поглощения йода молочной железой, достигающее своего максимума в период наиболее интенсивной лактации. Затем этот процесс снижается параллельно involуции молочной железы. Экскреция йода у коров связана с продуктивностью. При удое 10,5 л в сутки выведение йода с молоком, мочой и калом составило 6,8; 42,2 и 31,5%, а при удое 5 литров в сутки — 3,6; 46,6 и 14,6% от введенного количества соответственно (М. Д. Гольберд).

У мелких животных интенсивность поглощения йода щитовидной и молочной железами значительно выше, чем у крупных. Если у коров в щитовидной железе откладывается 10...20%, а с молоком выводится 6...8% от поступившего орально ^{131}I , то у коз и овец эти показатели практически одинаковы и колеблются в пределах 30...40%.

Поскольку различные ткани организма по-разному связывают один и тот же радионуклид, то и скорость выведения из этих тканей будет различна. Время, в течение которого исходное количество радионуклида уменьшится вдвое, называется эффективным периодом полувыведения ($T_{\text{эфф}}$). Снижение концентрации радиоизотопов происходит за счет двух основных факторов: физического их распада и истинного выведения. Величина $T_{\text{эфф}}$ может быть вычислена по формуле

$$T_{\text{эфф}} = T_{\text{физ}} \cdot T_{\text{биол}} / (T_{\text{эффиз}} + T_{\text{биол}}),$$

где $T_{\text{эффиз}}$ — период полураспада радионуклида, а $T_{\text{биол}}$ — период его биологического полувыведения.

Для долгоживущих изотопов эффективный период определяется в основном биологическим периодом полувыведения. Для короткоживущих определяющим обычно является физический распад.

Эффективный период полувыведения зависит от вида, возраста, функционального состояния организма, особенностей поступления, распределения радионуклидов и других

факторов. Например, цезий-137 выводится из организма быстрее стронция-90, а йод быстрее, чем цезий. При этом выведение цезия и стронция у кур происходит быстрее, чем у крупного рогатого скота, овец, коз и свиней за счет более интенсивного обмена веществ.

У поросят 20...100-суточного возраста полувыведение стронция из костей происходит за 114...124 сут. У поросят в возрасте 200 суток при однократном введении эффективный период полувыведения увеличивается до 280 суток (Н. И. Буров, И. А. Сарапульцев). Снижение концентрации стронция в скелете у молодых животных в основном обусловлено приростом костной ткани, а у взрослых — выведением его из организма. Выведение ^{137}Cs из организма животных разного возраста происходит в основном за счет его биологического выведения.

Среди органов и тканей, имеющих пищевое значение, скорость выведения из мышц и костей ^{137}Cs и ^{90}Sr всегда наименьшая. Поэтому эти ткани считают «критическими» и определение пригодности продукции в пищу человека проводится по этим тканям.

ПЕРЕХОД РАДИОНУКЛИДОВ ОТ МАТЕРИ К ПОТОМСТВУ

Проникновение радионуклидов в организм потомства происходит двумя путями: первый — через плаценту и второй — с молоком. Скорость перехода через плаценту у разных видов животных определяется особенностями ее строения и связана со сроками беременности. У животных, имеющих эпителиохориальный тип контакта (свиньи, лошади), скорость проникновения $^{22,24}\text{Na}$ 4 почти в 2 раза ниже, чем у животных с десмохориальной плацентой (жвачные). Это объясняется различной степенью контакта, а следовательно, скоростью обмена между кровью матери и плода.

На различных сроках беременности скорость проникновения радионуклидов у одного и того же животного может меняться в несколько раз. Например, у коз в период с 9-й по 20-ю неделю радиоизотопы натрия проникают в организм плода через плаценту в 3...4 раза быстрее, чем в другие сроки.

На проницаемость плаценты влияет также длительность циркуляции радионуклида в крови матери, состав рациона и другие факторы. Так, в условиях хронического поступления радиостронция с кормом в организм матери при первой суяжности в скелете плода откладывается в 5...6 раз меньше радиостронция, чем в период третьей суяжности. У телят в аналогичных условиях происходит увеличение содержания ^{90}Sr вплоть до третьего отела. В дальнейшем наступает состояние динамического равновесия между поступлением стронция матери и его выведением из организма коровы. В этих условиях уже не происходит увеличения накопления стронция в организме плода (Н. А. Корнев, А. Н. Сироткин).

Напротив, после однократного орального введения стронция овцам с каждым последующим окотом снижается его накопление в плодах по отношению к его содержанию в скелете матери от 2% после первого до 0,3% после 5...7 окотов (Н. И. Буров и др.).

Размеры перехода ^{90}Sr в мышцы и паренхиматозные органы плода при хроническом его поступлении с кормом в организм коров увеличиваются с возрастом плода, достигая максимальных концентраций перед отелом.

Физико-химические свойства радионуклидов оказывают также большое влияние на их переход через плаценту в плод. Увеличение способности образовывать комплексы в тканях организма уменьшает их переход в плод. Проницаемость плаценты для элементов 1-й, 2-й и 7-й групп периодической системы Д. И. Менделеева обратно пропорциональна атомному номеру элемента, т. е. чем больше массовое число нуклида, тем менее проницаема для него плацента. Эти значения могут различаться в этом случае в несколько раз.

МЕТАБОЛИЗМ И ТОКСИКОЛОГИЯ НЕКОТОРЫХ РАДИОНУКЛИДОВ

Токсикология молодых продуктов деления. Молодые продукты деления — это в основном смесь короткоживущих радионуклидов. Поэтому спад их активности происходит очень быстро, примерно через каждые семь периодов времени в 10 раз. Это значит, что через 7 ч после образования остается

10%, через следующие 7 отрезков времени ($7 \cdot 7 = 49$ ч) — 1%, через две недели — около 0,1%. По мере радиоактивных превращений меняется и изотопный состав смеси продуктов деления, а следовательно, изменяется всасывание, распределение, накопление в организме и их биологическое действие. При этом поведение конкретного радионуклида в организме животных в принципе равнозначно как при раздельном поступлении, так и в составе смеси. Наибольшее биологическое значение в составе смеси имеют, как указано выше, радиоактивные изотопы йода ($^{131}, ^{132}, ^{133}, ^{135}\text{I}$), а также короткоживущие изотопы $^{89,91}\text{Sr}$, ^{99}Mo , ^{132}Te , ^{140}Ba , ^{143}Ce . Несмотря на то что эффективный период их короткий, они быстро выделяются из организма с мочой, калом, а у лактирующих самок — с молоком. При многократном пероральном поступлении в организм 70...80% общей дозы накапливается в первые четыре дня. Биологическое действие короткоживущих радионуклидов происходит в основном за счет бета-излучения, доза которого значительно превышает дозу от гамма-излучения. Наибольшая степень поражения при поступлении с кормом нерастворимой смеси наблюдается в основном в желудочно-кишечном тракте, а при попадании растворимой смеси — в щитовидной железе, желудочно-кишечном тракте, в системе крови и др. В зависимости от поступившего количества смеси короткоживущих радионуклидов может развиваться острая, подострая и хроническая лучевая болезнь. Признаки лучевого заболевания при этом во многом сходны с симптоматикой лучевой болезни, вызванной внешним гамма-облучением. В острый период наблюдаются отказ от корма, сердечно-сосудистая недостаточность, развитие профузных кровавых поносов, выраженная лейкопения, геморрагический диатез, снижение массы тела, уменьшение или потеря молочной и другой продуктивности. По данным Е. А. Федорова и др., острая лучевая болезнь у коров развивается при поступлении в организм в течение четырех суток растворимой смеси короткоживущих радионуклидов в количестве 15 Ки ($55,5 \cdot 10^{10}$ Бк) и более, подострая форма — в количестве 6 и хроническая лучевая болезнь — в количестве 3,3 Ки ($12,21 \cdot 10^{10}$ Бк). По данным других авторов (Pullen и др.), дозы указанных продуктов деления, вызывающих острое течение болезни у коров и овец,

в 3...5 раз ниже. Следует отметить, что токсикологическое действие смеси короткоживущих радионуклидов у сельскохозяйственных животных еще мало изучено. Ряд вопросов общеприкладного и прикладного значения ждет своего научного разрешения.

Горячие частицы (г. ч.) — мельчайшие частицы остатков ядерного топлива или пыли с наведенной радиацией с высокой радиоактивностью. Величина и форма их сильно варьируют, диаметр составляет 2 мк и менее. Радиоактивность г. ч. может быть весьма высокой — более 10...11 Ки/частица (37 Бк/частица). Доля радиоактивности атмосферного воздуха, приходящегося на г. ч. в период выпадения радиоактивных осадков после ядерного наземного взрыва, составляет до 10% от общего количества находящихся в атмосфере радионуклидов. Особенно опасно инкорпорирование г. ч. в организм человека и животных. При длительной задержке в тканях вокруг частицы (в пределах десятков микрон) создаются поглощенные дозы более 1000 рад, а непосредственно вблизи их — сотни тысяч рад. Такие дозы могут вызывать необратимые изменения, связанные с канцерогенными эффектами. Наиболее высокая концентрация г. ч. — в местах испытательных ядерных взрывов или взрывов при авариях на атомных предприятиях, а также при глобальных выпадениях. Г. ч. атмосферных аэрозолей проникают в организм с вдыхаемым воздухом, водой, пищей и кормом животных. Степень задержки в дыхательных путях зависит от размеров частиц и их растворимости. Частицы диаметром более 5 мк осаждаются преимущественно в верхней части, мелких размеров — в нижней части дыхательных путей. Растворимые частицы остаются в легких на более длительное время. Часть их может мигрировать через паренхиму легких в лимфатические узлы. Часть попавших в органы дыхания частиц с выделяемой слизью из легких и бронхов через гортань может попадать в желудочно-кишечный тракт. Есть данные, что в желудок поступает до 80% ингалированных частиц. Попавшие в организм г. ч. оказывают на окружающие их ткани радиационное воздействие, степень которого зависит от размера частицы, ее радиоактивности, продолжительности периода полураспада радионуклидов, содержащихся в частице,

и радиочувствительности клеток и тканей организма. В настоящее время затруднительно дать определенный ответ, какие биологические последствия может дать инкорпорация г. ч., для этого необходимы широкие экспериментальные исследования.

Метаболизм и токсикология ^{131}I . Известны 24 радиоактивных изотопов йода с массовыми числами в интервалах 117...126 и 128...139. Все они искусственные и являются продуктами ядерных реакций. Впервые радиоактивный йод (^{128}I) получил в 1934 г. Е. Ферми из стабильного ^{127}I при его бомбардировке нейтронами; другой способ получения радиоизотопов йода — облучение теллура нейтронами. Наиболее важным путем образования радиоактивных изотопов йода является реакция деления тяжелых ядер. Выход ^{131}I в цепочке электронного распада продуктов деления следующий: $^{131}\text{Sb} \rightarrow ^{131}\text{Te} \rightarrow ^{131}\text{I} \rightarrow ^{131}\text{Xe}$ (стабильный).

Йод как химически активный элемент реагирует со многими веществами, образуя йодаты, перйодаты и йодиды. Установлено, что физико-химические формы йода и скорость его осаждения зависят от температуры, окислительного и восстановительного характера среды, в которую поступает йод, от типов контактирующих с ним веществ (Сивинцев). Например, в радиоактивных выпадениях в Англии после испытаний ядерного оружия в 1961 г. 75% ^{131}I находилось в форме аэрозолей и 25% — в форме паров. Радиоактивные изотопы йода могут поступать в организм животных через органы пищеварения, дыхания, кожу, конъюнктиву, раны и другим путем. Йод является активным биогенным элементом, при попадании в организм он полностью всасывается в кровь и до 60% откладывается в щитовидной железе. При ядерных взрывах радиоактивные изотопы йода в первые недели составляют до 19% от всех радиоактивных продуктов деления. Среди них наибольшее значение имеет ^{131}I с периодом полураспада 8,05 дня.

При попадании в организм концентрация ^{131}I в тканях животного по отношению к концентрации радионуклида в крови (взято за единицу) распределяется в следующем порядке: кровь, мышцы, селезенка, поджелудочная железа — 1; почки, печень, яичники — 2...3; слюнная железа, моча —

3...5; кал, молоко — 5...15; щитовидная железа — 10 000. У лактирующих коров с 1 л молока выделяется около 1% поступившего в организм за день количества йода-131. В желток куриных яиц при длительном поступлении йода-131 переходит до 16%, в белок — до 1% от суточного количества. Токсическое действие радиоактивного йода проявляется прежде всего в поражении щитовидной железы. В малых индикаторных дозах радиоактивные изотопы йода не вызывают заметных нарушений в тиреоидной ткани. Большие дозы ^{131}I у всех животных приводят к разрушению щитовидной железы и замещению ее паренхимы соединительной тканью. После введения радиойода обнаруживаются значительное снижение содержания ДНК и РНК в щитовидной железе, уменьшение щелочной фосфатазы и неравномерное распределение ДНК, нарушение расположения и структуры комплекса Гольджи, а также изменение активности некоторых ферментов. По данным Bustd et al., овцы, получавшие с кормом 240 мкКи ($8,88 \cdot 10^6$ Бк) ^{131}I в сутки, в течение 450 дней оставались живыми и давали потомство, однако ягнята погибали в течение первой недели после рождения. При полном разрушении щитовидной железы радиойодом взрослые овцы в первое время кажутся относительно нормальными, но затем быстро появляются признаки недостаточности функции железы — потеря аппетита, угнетение, запоры, шелушение кожи и высыхание шерсти. Клинические признаки отравления у свиней и крупного рогатого скота сходны с эффектами, наблюдаемыми у овец (см. рис. 42). При интоксикации ^{131}I возникают существенные изменения в нервной (в центральном и периферическом отделах) и эндокринной системах. Изотопы йода в заметных количествах накапливаются в легких и обуславливают возникновение бронхитов и пневмоний. По мере нарастания патологических изменений в щитовидной железе появляется симптомокомплекс, характерный для микседемы: снижается температура тела, повышается нервная возбудимость, замедляется сердцебиение, увеличивается проницаемость сосудов. Отмечаются жировые перерождения печени, функциональные и морфологические изменения в почках, органах размножения и эндокринных железах. Поражение почек при попадании ^{131}I в организм зависит от

дозы и кратности его поступления. Йод снижает клубочковую фильтрацию и канальцевую реабсорбцию, что ведет к нарушению гемодинамики. В отдаленные сроки тяжелым поражением почек может быть нефросклероз. Нарушение функции паращитовидной железы приводит к изменению кальциевого обмена. Следствием этого могут быть замедление центров окостенения и роста костей в длину, кариес зубов и другие виды костной патологии. Сдвиги электролитного обмена в организме во многом определяются ослаблением инкреторной функции надпочечников. О существенных изменениях гормональной регуляции различных физиологических процессов в организме свидетельствуют также нарушения функции яичников и органов размножения. Это хорошо прослеживается у кур — носителей радиоактивного йода. Вследствие ухудшения функции яичников и органов яйцесозревания у них понижается интенсивность яйцекладки и качество яиц. ^{131}I вызывает изменения в кроветворных органах, что проявляется нарушением картины крови, снижается количество нейтрофилов, лимфоцитов и развивается анемия. В тяжелых случаях поражения могут наблюдаться острые лейкомии, тромбоцитопения, панцитопения. Радиоактивные изотопы йода могут индуцировать опухоли в щитовидной железе, аденогипофизе, половых железах и других органах. Структурные и функциональные изменения в органах при попадании в организм радиоактивного йода в основном обусловлены нарушением эндокринной регуляции, возникающим в результате поражения щитовидной железы.

Токсикология ^{137}Cs . Из радиоактивных изотопов цезия наибольшую биологическую опасность представляет ^{137}Cs — бета- и гамма-излучатель. Период его полураспада 30 лет. Он является продуктом деления тяжелых ядер и по степени радиотоксичности относится к группе В (среднетоксичные радионуклиды). Схему образования и радиоактивного превращения ^{137}Cs можно проследить по следующей цепочке: $^{137}\text{I} \rightarrow ^{137}\text{Xe} \rightarrow ^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137m}\text{Ba} \rightarrow ^{137}\text{Ba}$ (стабильный).

При попадании в организм с кормом ^{137}Cs может всасываться в кровь полностью и равномерно распределяться по тканям и органам. Тип распределения цезия у разных животных практически одинаков. Цезий не зависит от пути по-

Таблица 11

**Кратность накопления и кинетика выделения из организма
¹³⁷Cs при пероральном введении**

Вид животного	Способ введения изотопа	Кратность накопления				Кинетика накопления	
		Мышцы	Печень	Скелет	Организм	T _{эфф} , дни	%
Крысы	Длительно с водой	15,3... 16,0	0,47... 0,67	1,62... 2,35	19	5,7... 27,4	8,86... 11,4
Кролики	—«—	14,5	1,27	0,12	20	23... 25	50
Овцы	—«—	2,35	0,083	0,041	4,53	5,8... 5,9	86,5 13,5
Свиньи	С кормом	15... 16	0,58... 5,2	—	21,5	15... 30	100
Собаки	Длительно в капсулах	22,7	0,65	3,8	30	42	100
Человек	С пищей	90	5,45	8	140	70... 120	100

ступления в организм. Кратность накопления (от суточного поступления, число раз) и интенсивность выведения цезия из организма, по данным Л. А. Булдакова и Ю. И. Москалева, имеют прямую зависимость от массы животного (табл. 11).

У коров и овец в период установившегося равновесия с 1 л молока выделяется цезия соответственно 2,05 и 0,96...1,25% от суточного поступления. В период беременности цезий легко проникает из организма матери в плод. При хроническом поступлении изотопа в организм самки происходит относительное выравнивание концентрации цезия-137 в тканях матери и плода. Передача изотопа через молоко происходит более интенсивно в первый месяц вскармливания детеныша. Лучевое поражение ¹³⁷Cs регистрируется у овец по изменению состава крови при однократном поступлении 2 мКи (7,4·10⁷ Бк) изотопа, лучевая болезнь легкой степени возникает при поступлении 0,5 мКи/кг (1,85·10⁷ Бк/кг) массы, ЛД₅₀/30 составляет более 5 мКи/кг (18,5·10⁷ Бк/кг). Клиническое проявление лучевого синдрома при поражении ¹³⁷Cs во многом сходно с признаками лучевой болезни, развивающейся при общем внешнем гамма-облучении.

Токсикология ^{90}Sr . Из радиоактивных изотопов стронция, образующихся при делении ядер тяжелых элементов, наиболее важное биологическое значение имеет ^{90}Sr . В случаях выпадения свежих (молодых) осколков деления опасность для биологических объектов представляет и ^{89}Sr .

Стронций-90 является долгоживущим изотопом, его период полураспада равен 28 годам. Претерпевая радиоактивный распад, ^{90}Sr превращается в дочерний радиоактивный изотоп иттрий-90 с периодом полураспада 64,3 ч. В случаях попадания в организм животного ^{90}Sr биологическое действие его обуславливается бета-частицами, испускаемыми им самим и его дочерним продуктом ^{90}Y . Средняя энергия бета-частиц ^{90}Sr равна 0,21, иттрия-90 — 0,87 МэВ. Величина средней энергии бета-излучения для $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ равна 0,545 МэВ. Биологическое действие, обусловленное химическими свойствами указанных изотопов и их солей, в данном случае не принимается во внимание, ибо их весовые количества ничтожно малы. Например, ^{90}Sr в дозе 2 мкКи/г ($7,4 \cdot 10^4$ Бк/г) массы вызывает смерть 50% животных в течение 30 дней. В граммах это количество радионуклида будет составлять $1 \cdot 10^{-8}$ (Гусев). Средний пробег бета-частиц ^{90}Sr в тканях животного составляет до 0,5 мм, для ^{90}Y — 4 мм. В костной ткани ввиду ее большой плотности по сравнению с мягкими тканями пробег частиц будет меньше. В связи с этим большая часть энергии бета-частиц ^{90}Sr и ^{90}Y , фиксированных в скелете, будет поглощаться костной тканью и костным мозгом. Особенностью действия ^{90}Sr является то, что он, депонируясь в скелете, остается там длительное время, постоянно облучая ткани, и поэтому в костной ткани и кроветворном костном мозге изменения наступают в значительно большей степени, чем в других органах и тканях организма. Однако развитие патологических процессов во внутренних и других органах происходит не только в результате непосредственного действия излучения, но и через отраженные реакции. Характер патологического процесса и интенсивность его развития при попадании в организм радиоактивного стронция в основном зависят от дозы и времени поступления изотопа. В опытах на собаках показано, что ежедневное поступление с кормом ^{90}Sr в дозе 0,0002 мкКи/кг (7,4 Бк/кг) в течение

1,5...2 лет не вызывает функциональных изменений в организме (Бурыкина).

По данным Л. А. Булдакова и В. А. Назарова, изменение состава крови у овец наступает только после 3...5-месячного ежедневного поступления ^{90}Sr , в дозе $3,9 \cdot 10^{-6}$ Ки ($14,43 \cdot 10^4$ Бк). Большие дозы ^{90}Sr вызывают лучевую болезнь, которая протекает остро и подостро. При длительном поступлении в организм стронция-90 в относительно малых дозах тоже может развиваться лучевая болезнь или же обнаруживаются радиационные поражения в виде торможения роста, укорочения продолжительности жизни животного, понижения продуктивности, бластомогенного действия и других последствий. Компенсаторные механизмы и восстановительные процессы при хроническом поражении ^{90}Sr выражены слабо. Острая лучевая болезнь у собак развивается при однократном парентеральном введении ^{90}Sr в дозе $0,4...0,6$ мКи/кг ($1,48...2,22 \cdot 10^7$ Бк/кг). Для кроликов, крыс и мышей остротоксичной дозой является $0,8...11,2$ мКи/кг ($2,96...41,44 \cdot 10^7$ Бк/кг), для обезьян — $0,2$ мКи/кг ($0,74 \cdot 10^7$ Бк/кг). При уменьшении однократной дозы в 2...3 раза у животных развивается хроническая лучевая болезнь (Краевский, Литвинов, Соловьев).

Клинические и патоморфологические признаки острой лучевой болезни, вызванной ^{90}Sr , во многом сходны с таковыми, вызванными внешним облучением. При этом животные постепенно слабеют, ухудшается аппетит. Рано появляется снижение массы животного, которое в большинстве случаев совпадает с развитием желудочно-кишечных расстройств. Рост животных прекращается. По мере развития болезни нарушается структура кожи и кожных покровов. Шерсть становится взъерошенной, теряет блеск, затем она начинает выпадать, иногда это наблюдается периодически. Кожа теряет эластичность. На слизистых оболочках появляются точечные кровоизлияния, а в ротовой полости иногда развиваются язвы. При подостром течении болезни первые 2...3 недели степень указанных изменений выражена слабее. При воздействии радиоактивным стронцием отмечаются нарушения функционального состояния нервной системы. В острых и подострых случаях вначале развивается возбуждение, которое в дальнейшем сменяется угнетением. У собак некоторые

авторы описывают слуховые и зрительные галлюцинации. В хронических случаях отмечаются трофические нарушения, проявляющиеся в виде облысения, поседения, изменения в костях, слизистых оболочках. Нарушения условно-рефлекторной деятельности нервной системы, которые обнаруживаются сравнительно рано, указывают на ослабление корковой деятельности и нервных центров.

Изменения со стороны сердечно-сосудистой системы при интоксикации ^{90}Sr в острых и подострых случаях мало отличаются от изменений, вызванных внешним облучением. При хронической форме поражения нарушения в первую очередь возникают в сосудах, костях и костном мозге. В более отдаленные сроки развиваются склеротические процессы — гиалиноз, утолщение стенок сосудов и сужение их просвета. Мышечные волокна миокарда набухают и при тяжелых отравлениях подвергаются жировому перерождению. В острых и подострых случаях интоксикации наблюдается повышение кровяного давления, которое к концу болезни значительно понижается.

Изменения в легких не являются характерными и обнаруживаются они главным образом в сосудах. В них развиваются те же процессы, что и в сосудах других внутренних органов. Иногда отмечается полнокровие легких и пневмония.

В желудочно-кишечном тракте при интоксикации ^{90}Sr имеются значительные изменения функционального и морфологического характера. При остром отравлении у животных наблюдается слюнотечение, периодическая рвота, понос, часто кровавый. Иногда отмечаются признаки спастического паралича кишечника. В подострых случаях обнаруживаются примерно те же нарушения, но они менее выражены.

В острых случаях отравления наблюдаются кровоизлияния в слизистой оболочке и подслизистом слое кишечника, уменьшение размеров лимфатических фолликулов и деструктивные изменения в железистых клетках почти всех отделов желудочно-кишечного тракта. При хроническом течении болезни отмечается усиленное слущивание покровного эпителия желудка, пикноз клеток обкладочных желез, расширение крипт в тонком отделе кишечника и уплощение выстилающего их эпителия. В толстом отделе кишечника уменьшается

число бокаловидных клеток. В строме всего желудочно-кишечного тракта увеличено количество плазматических клеток, развиваются изменения в интрамуральных нервных сплетениях. Установлено также замедление и извращение течения воспалительных процессов в желудочно-кишечном тракте. Изменения в кроветворных органах и картине крови при поражении ^{90}Sr занимают ведущее место в течение всего болезненного процесса. По данным Н. К. Петровича, В. А. Киршина и др., при остром и подостром течении болезни изменения в крови отмечаются с первых часов, суток и до 3...5 лет после поступления изотопа. Со второй недели после введения изотопа регистрируется снижение количества эритроцитов, к 4...7-му месяцу оно достигает максимума (40%), цветной показатель при этом возрастает и становится выше единицы. Число ретикулоцитов уменьшается. В последующие сроки у выживших животных количество эритроцитов постепенно увеличивается и через 2...3 года становится несколько выше первоначальной величины. В этот период у животных отмечается макроцитоз с появлением в крови мегалоцитов. Увеличению количества эритроцитов предшествует резкий ретикулоцитарный криз, в период которого число ретикулоцитов увеличивается в 10...15 раз.

Со стороны белой фракции крови в первые сутки после введения радиостронция отмечается слабо выраженный нейтрофилез. Через неделю количество лейкоцитов резко снижается, а через 4...5 недель число их составляет 40...70% к исходному. В последующие сроки у выживших животных количество лейкоцитов возрастает, но не достигает исходных величин. Лейкопения возникает за счет уменьшения на 50...60% числа нейтрофилов. В кроветворном костном мозге число клеток, имеющих ядра, в течение первых суток несколько увеличивается, затем резко снижается — на 10-е сут в 20 раз и на этом уровне удерживается 2...3 мес. После этого начинается период постепенного восстановления и к 24...26 мес. уровень их достигает исходных величин, в последующие сроки число указанных клеток вновь снижается, иногда в 5...6 раз. В миелограмме данных животных зрелые формы эритрогранулоцитарных элементов преобладают над молодыми формами на всем протяжении лучевой болезни.

Действие стронция-90 на кости скелета млекопитающих подробно описал Н. Н. Литвинов. Ввиду неравномерности распределения радиоактивного стронция в костях степень изменения в разных отделах скелета неодинаковая. У растущих животных наиболее выраженные нарушения проявляются в зонах роста костей, а у взрослых животных — в спонгиозном слое и метаэпифизах длинных трубчатых костей. Патологические процессы в скелете при поражении ^{90}Sr медленно прогрессируют. Вначале они проявляются своеобразным угнетением процессов остеогенеза, разрушением остеобластической ткани и сосудов, изменением сформированного костного вещества, развитием клеточно-волоконистой ткани, нарушением процессов регенерации кости с появлением атипичных незрелых костных структур, в результате чего в дальнейшем могут развиваться злокачественные костные опухоли.

При действии инкорпорированного ^{90}Sr на организм животных, так же как и при внешнем облучении, снижаются иммунобиологические и защитные свойства организма: тормозится выработка антител при вакцинации, а также снижается напряженность иммунитета и угнетается фагоцитарная активность клеток крови и тканевых элементов.

При стронциевой интоксикации нарушаются все виды обмена веществ. Отмечаются изменения функций желез внутренней секреции — гипофиза, надпочечников, зубной и щитовидной, половых и др. Очень часто поражаются глаза, возникают дистрофические изменения, возможна катаракта.

С целью противорадиационной защиты, резорбции радионуклидов и ускорения их выведения из организма проверено большое количество химических веществ для сорбирования радионуклидов или перевода их в прочные комплексы. К числу комплексонов, ускоряющих выведение радиоактивных изотопов стронция, цезия, иттрия, церия и других, следует отнести этилендиаминотетрауксусную кислоту (ЭДТА), этилэфирдиаминотетрауксусную кислоту (ЭЭДТД). Для уменьшения резорбции радионуклидов и ускорения выведения их из крови положительные результаты дают сорбенты — сульфат магния, трикалийфосфат, цитрат натрия. Целесообразно создание конкурентных отношений элементов-аналогов или не-

радиоактивных изотопов, например стронций — кальций, цезий — калий, йод радиоактивный — йод нерадиоактивный. Большое значение в комплексе мер защиты от радионуклидов имеют полноценные в минеральном отношении рационы.

Токсикология иттрия. Иттрий — химический элемент 3-й группы периодической системы Д. И. Менделеева. Атомная масса 88,92. В соединениях иттрий трехвалентен. Растворимы в воде хлористый-, азотнокислый- и сернокислый иттрий. Фтористый иттрий (YF_3) и щавелевокислый иттрий в воде и кислотах нерастворимы. Иттрий имеет один стабильный и 20 радиоактивных изотопов, большинство которых короткоживущие. Практический интерес представляет ^{90}Y и ^{91}Y с периодами полураспада 64 ч и 58,8 дня соответственно. ^{91}Y испускает бета-излучение с граничными энергиями двух спектров 1,545 МэВ (99,78%) и 0,34 МэВ (0,22%), а также слабое гама-излучение с энергией 1,21 МэВ. Иттрий-91 тоже практически чистый бета-излучатель с двухкомпонентным спектром $E_{\text{бета}} = 2,27$ МэВ ($E_{\text{ср}} = 0,93$ МэВ) и $E_{\text{бета}} = 0,513$ МэВ. Энергия сопровождающего гама-излучения ^{90}Y равна 1,76 МэВ. Иттрий извлекают из продуктов деления урана, в частности из облученных в реакторе отработанных тепловыделяющих элементов.

Радиоактивные изотопы иттрия имеют среднюю радиотоксичность. На рабочем месте может использоваться препарат активностью до 10 мкКи ($37 \cdot 10^4$ Бк). В обычных условиях иттрий в организме не обнаруживается, но в случае его поступления радиоактивный иттрий наиболее интенсивно откладывается в костях (трабекулы, надкостница, костный мозг, эндост), печени и селезенке, образуя при этом устойчивые высокомолекулярные комплексы с белками. ^{90}Y всегда сопутствует ^{90}Sr , так как является его дочерним продуктом. Вследствие короткого периода полураспада он не успевает перераспределиться в организме, поэтому в живом организме этот радиоизотоп всегда локализован в костной ткани. Скорость его полураспада, как правило, меньше, чем скорость выведения из костей. Поэтому он длительное время служит источником облучения тканей организма. Из ЖКТ всасывается менее 1% иттрия. Выводится из организма с калом

и мочой, причем у старых животных в значительно большем количестве. Для усиления выведения иттрия используют комплексоны: этилендиаминтетрауксусную или нитрилотриуксусную кислоты (ЭДТА и НТА), с которыми иттрий образует устойчивые соединения. Эти соединения легко обезвреживают его в организме. ^{90}Y и ^{91}Y применяются в медицине для лечения рака путем введения непосредственно в раковую опухоль. Как радиоколлоиды, соединения иттрия задерживаются в лимфоузлах и предотвращают развитие метастазов.

Токсикология радия. Радий — радиоактивный химический элемент 11-й группы периодической системы Д. И. Менделеева. Атомная масса 226,05. Основной ^{226}Ra с наибольшим периодом полураспада — 1622 года. ^{226}Ra принадлежит к радиоактивному семейству ^{238}U . При распаде ^{226}Ra образуется изотоп инертного газа ^{222}Rn , который легко поступает в воздух, представляя тем самым большую опасность. ^{222}Rn , в свою очередь, превращается в короткоживущий полоний и другие изотопы. Конечным продуктом распада ^{226}Ra является стабильный свинец. Энергия альфа-излучения ^{226}Ra и его дочерних продуктов — 4,78...7,68 МэВ. Энергия его гамма-квантов 0,18...2,19 МэВ. Другие изотопы радия принадлежат к актиноевому и ториевому семействам. Из них интерес представляет ^{228}Ra с периодом полураспада 6,7 года. Он не является альфа-излучателем, но его дочерний продукт ^{228}Ac дает начало альфа-излучающему ^{228}Th , поэтому после отложения ^{228}Ra в тканях его активность со временем возрастает: спустя 4 мес. она составляет примерно 10% от равновесной величины, а через 2 года — 50%. ^{228}Ra распадается, испуская бета-частицы с максимальной энергией 3,17 МэВ и гамма-кванты. Удельная активность ^{228}Ra больше, чем ^{226}Ra .

Поведение радия в биосистемах имеет много общего с кальцием и стронцием, несмотря на количественные различия радий в виде ионов поступает в растения из почвенного раствора. При увеличении в почве содержания кальция уменьшается поглощение растениями радия.

Из ЖКТ всасывается 20...70% радия. В организме он распределяется в крови и мягких тканях, из которых более половины выводится в первые сутки. Остальное количество откладывается в костях (40%) и других тканях. Выведение его

из организма происходит с калом (95%) и мочой (5%). После внутривенного введения радия до 15% его в первые минуты депонируется в коже. Высокая токсичность радия обусловлена большим периодом полураспада, большой эффективной энергией распада и выраженной остеотропностью. Поражение радием характеризуется анемией, лейкопенией, декальцификацией костной ткани и нарушением ее регенерации, лучевым пневмонитом, поражением кожи. В отдаленные сроки наблюдаются остеосаркомы, пневмосклероз и рак легких, бородавки и рак кожи, возможны опухоли других органов и тканей. Минимальная активность ^{226}Ra , допускаемая на рабочем месте, — 0,1 мкКи ($3,7 \cdot 10^3$ Бк).

Токсикология плутония. Плутоний — радиоактивный химический элемент из группы актиноидов, имеет 15 изотопов. В очень малом количестве существует в природе на поверхности земли, образуясь из урана под действием нейтронов космических лучей и нейтронов при делении урана. При этом образуется долгоживущий изотоп ^{238}Pu с периодом полураспада 24360 лет. Большое количество плутония получают в атомных реакторах при делении урана и используют для изготовления ядерных зарядов.

В почве плутоний прочно фиксируется и поступает в растения в небольших количествах. Поэтому основным источником поступления в организм животных и человека является воздушный, через кожу или пищевой путь при внешнем загрязнении кормов и продуктов питания. Из ЖКТ всасывается менее 1% поступившего плутония и депонируется в основном в костной ткани. При попадании на кожу растворимые соли плутония быстро всасываются, а нерастворимые депонируются в эпидермисе и транспортируются в региональные лимфоузлы. При ингаляции в легкие распределение плутония сильно зависит от размера и растворимости частиц. Растворимые соли нитраты и хлориды быстро всасываются и поступают в кровь. Нерастворимые частицы могут годами находиться в легких. Их выведение происходит путем медленного растворения или перемещения в бронхиальные лимфоузлы. При этом происходит длительное облучение легочной ткани. Чем крупнее частица, тем неравномернее облучение. В зависимости от дозы облучения в легких может

развиться лучевой пневмонит, фиброз и пневмосклерозы, гемангиосаркомы, мезателиомы и карциномы. При любом пути поступления изотопы ^{237}Pu и ^{238}Pu всасываются лучше, чем ^{239}Pu . В ЖКТ изотопы плутония, поступающие в составе корма, всасываются в 25 раз лучше, чем из неорганической соли. После внутривенного введения плутония через 5 мин в крови его остается 50%. Попавший в организм плутоний вызывает подавление миелоидного кроветворения, истощение лимфоидных фолликулов селезенки, атрофию лимфоузлов, снижается продолжительность жизни эритроцитов и т. д. Нарушается иммуногенез, т. к. подавляется образование антителобразующих клеток в лимфоузлах. Происходит образование остеосарком.

Плутоний имеет выраженные гепатотропные свойства. У человека из крови депонируется до 45% плутония в печени с периодом биологического полувыведения 20 лет. Уже через 2...3 мес после поступления плутония возникает цирроз печени, а при высоких дозах — диффузный некроз, возможны гепатомы и аденомы желчных протоков. В семенниках он концентрируется в макрофагах интерстициальных тканей, а в яичниках — в атретических фолликулах мозгового слоя.

Выводится плутоний в основном печенью с желчью.

Плутоний способен преодолевать плацентарный барьер, но в плаценте его концентрируется в 10 раз больше, чем в плоде.

Плутоний-238 (период полураспада 87,7 лет) обладает высокой генетической эффективностью, индуцируя хромосомные aberrации. При инкорпорации ^{238}Pu локализация радиационных опухолей (остеосаркомы) зависит от возраста. У взрослых животных они локализуются в основном в конечностях, а у молодых — в голове или в позвонках.

Токсикология рутения. Рутений — металл из второй триады восьмой группы периодической системы Д. И. Менделеева. Имеет 7 стабильных и 14 радиоактивных изотопов, из которых наиболее опасный ^{106}Ru . Период его полураспада 1 год, максимальная энергия бета-частиц 0,04 МэВ. Дочерний продукт распада родий-106 с периодом полураспада 30 с, максимальной энергией бета-частиц 3,53 МэВ и гамма-лучей — 0,51 МэВ. ^{106}Ru относят ко второй группе опасности (Б).

Радиоактивный рутений попадает в организм в основном с воздухом в виде пыли или с кормом, при его внешнем и внутреннем загрязнении. Максимальный пробег его бета-частиц в ткани 0,02 мм.

Рутений проявляет валентность от 1 до 8, что обеспечивает ему большое разнообразие соединений, способных легко мигрировать в почве. Хорошо усваивается растениями, но концентрируется в основном в корнях (95,7%).

Из ЖКТ животных всасывается до 1,7% рутения. В организме он накапливается в печени (5...10%), в мышцах, костях, тестикулах, селезенке. После внутривенного введения накапливается в основном в почках. Выводится в основном почками (80%), остальное количество с калом. Хорошо выводится из костной ткани и очень долго из печени. У лактирующих животных в молоко поступает до 0,1% рутения.

В организме вызывает лейкемию, опухоли молочных желез, узелковый периартериит сосудов внутренних органов, поражение клубочков почек, деструкцию фолликулов селезенки и лимфоузлов, аденокарциномы кишечника, слизистый рак, язвенный колит. Тяжелые поражения кишечника в основном обусловлены действием высокоэнергетического бета-излучения дочернего родия-106, у которого максимальный пробег в биологической ткани — 1,7 см.

Токсикология циркония. Цирконий — элемент 4-й группы периодической системы Д. И. Менделеева. Естественный цирконий состоит из 5 стабильных изотопов. Искусственно получено 9 его радиоактивных изотопов. Из радиоактивных изотопов наибольшее значение имеет ^{90}Zr , являющийся одним из основных компонентов продуктов ядерного деления урана. Он входит в состав радиоактивных осадков при ядерных взрывах и авариях атомных установок. Период полураспада ^{95}Zr 65 дней. При распаде он испускает бета-частицы с энергией 0,371...0,84 МэВ и гамма-лучи с энергией 0,721 МэВ. ^{95}Zr относят к средней группе токсичности. Допустимые концентрации его в воде открытых водоемов $6,2 \cdot 10^{-8}$ Ки/л ($22,94 \cdot 10^2$ Бк/л).

Цирконий в небольших количествах обнаружен в тканях растений, но физиологическая роль его в них не ясна. Из почвы он слабо усваивается растениями, при этом 82,7%

его откладывается в корнях. В организм животных поступает в основном ингаляционным путем или с кормом при его внешнем загрязнении. При попадании в ЖКТ всасывается менее 1%. В организме 30...40% его откладывается в костной ткани, 5...10% — в печени, меньше — в почках селезенке, лимфоузлах и половых железах. Из организма выводится в основном через ЖКТ, меньше — через почки.

Радиотоксичность обусловлена в основном его бета-составляющей и симптоматически проявляется поражением органов и тканей по месту своей основной локализации.

Токсикология цинка. Цинк — элемент 2-й группы периодической системы Д. И. Менделеева. Имеет 12 стабильных изотопов. Радиоактивные изотопы получены искусственно. Из них наибольшее значение в токсикологии имеет ^{65}Zn с периодом полураспада 245 суток. По радиотоксичности его относят к группе В.

Цинк является необходимым элементом для жизнедеятельности растений и животных, поэтому хорошо всасывается. В ЖКТ он всасывается в верхних отделах и концентрируется в печени, мышцах, поджелудочной железе, гипофизе, половых железах, костях. У молодых животных в ЖКТ всасывается в 4 раза больше цинка, чем у взрослых. Выводится из организма на 90% через ЖКТ, остальное количество с мочой. Из растворимых соединений цинк способен всасываться через кожу (1,2%).

В организме ^{65}Zn вызывает поражение кроветворных органов. При средней дозе происходит гиперплазия ретикулоэндотелиальных элементов селезенки и лимфатических узлов, появление очагов экстрамедуллярного гемопоэза и увеличение клеток белого ростка в костном мозге. При высокой мощности дозы появляется прогрессирующее угнетение эритро- и лимфопоэза, развитие ретикулоцитопении и лимфоцитопении. Малые дозы радионуклида оказывают стимулирующее действие на гемопоэз, особенно на гранулоцитарный росток костного мозга. Определенное количество ^{65}Zn задерживается в костной ткани и выводится очень медленно (около 2 лет).

Токсикология тория. Торий — радиоактивный химический элемент 3-й группы системы Д. И. Менделеева. Природный торий состоит из 6 радиоактивных изотопов. Искус-

ственно получено еще 9 изотопов, все они радиоактивны. Торий распространенный элемент. В земной коре его содержится $8 \cdot 10^{-4}$ весовых %. В речной воде тория содержится в пределах $8,1 \cdot 10^{-4}$ Бк/л ($2,2 \cdot 10^{-15}$ Ки/л). Среди изотопов наибольшее значение в токсикологии имеет ^{232}Th , испускающий альфа-частицы. Промежуточным продуктом его распада является инертный газ радон, способный из минералов переходить в воздух и таким образом легко проникать в легочную ткань. Естественное поступление тория в организм в течение суток составляет 0,05...4 мг. В ЖКТ всасывается 10^{-4} часть поступившего нуклида. Нерастворимые соединения тория могут долго задерживаться в легких, при этом значительное количество его задерживается в пульмональных лимфоузлах.

Распределение в организме тория зависит от пути поступления, преимущественно он распределяется в почках, печени, селезенке и костной ткани. Почти все количество тория, отложенного в скелете, концентрируется в костном мозге, т. е. он имеет тропность к ретикулоэндотелиальной системе. При хроническом поступлении тория 60...93% его концентрируется в костной ткани. Выводится торий из организма в основном через ЖКТ с желчью.

Его патологическое действие проявляется развитием в костях злокачественных новообразований, раком печени, лимфомами, лимфогрануломатозом и т. д.

Токсикология трития. Тритий — широко распространенный в природе радиоактивный изотоп водорода с массовым числом 3,017. Период полураспада 12,34 года. Бета-излучающий радионуклид с максимальной энергией 16,8 Кэв. Максимальный пробег в воздухе 6 мм, в мягкой биологической ткани — около 6 мкм. Тритий постоянно образуется в природе при ядерных превращениях, вызываемых космическим излучением. В промышленных условиях его получают нейтронным облучением лития.

В организм соединения трития очень хорошо всасываются, особенно в форме тритиевой воды, и быстро распределяются по органам и тканям. Выводятся из организма с мочой и потом с периодом полувыведения 10 суток. Но около 1% трития прочно связывается в организме и очень плохо поддается выведению. В тканях тритий избирательно накапливается

в ядерных структурах (включаясь в тимидин) или в протоплазме (включаясь в цитидин).

В организме тритий вызывает острые и отдаленные эффекты. Он угнетает кроветворение, вызывает геморрагический синдром, поражение генетического аппарата, злокачественные новообразования (особенно молочной железы) и т. д. Хроническое облучение тритием снижает массу головного мозга и уменьшает в нем содержание ДНК и белка.

Тритий свободно проникает через плацентарный барьер и поступает в клетки плода, вызывает генетические и соматические нарушения, подобные тем, которые наблюдаются во взрослом организме.

Для хронического поражения тритием характерен полиморфизм ядер эндотелия и мышечных клеток стенки сосудов, со временем возникают очаговые микронекрозы интимы с пролиферацией сохранившегося эндотелия. У животных возрастает частота возникновения лейкемии.

Тритий практически не представляет никакой опасности как внешний источник облучения, и, напротив, он очень опасен при попадании внутрь организма. Его присутствие в образцах можно определить только при использовании жидкостно-сцинтилляционного метода. В организме тритий можно выявить только по исследованию проб мочи. Для снижения дозы облучения и усиления скорости выведения из организма трития необходимо проводить мероприятия по активизации обмена воды.

Токсикология углерода. Углерод — элемент 4-й группы периодической системы Д. И. Менделеева с атомной массой 12,01. В природе состоит из двух стабильных изотопов ^{12}C и ^{13}C . Искусственно получены его радиоактивные изотопы. Углерод — один из самых распространенных элементов на Земле, является основой всего живого.

Из известных шести радиоактивных изотопов наибольшее значение имеет долгоживущий ^{14}C , период полураспада которого 5730 лет. ^{14}C получается естественным путем в атмосфере под действием нейтронов космического излучения или искусственно при длительном облучении нейтронами в ядерных реакторах соединений, содержащих азот.

^{14}C распадается с испусканием бета-частиц с максимальной энергией 0,155 МэВ. По радиотоксичности относят к

группе Г. В отличие от других радионуклидов, важнейшим путем выведения радиоуглерода являются легкие, из которых он выводится в виде радиоактивного углекислого газа.

^{14}C очень хорошо усваивается всеми живыми организмами и быстро встраивается в тканевые структуры.

Проявляющиеся биологические эффекты от облучения углеродом всегда выше ожидаемых, рассчитанных из экспозиционной дозы. Это объясняется тем, что углерод в организме включается в состав практически всех важнейших биомолекул и производит за счет своего бета-излучения их прямое повреждение. Патологическое проявление действия ^{14}C на организм подобно действию трития.

ПЕРЕХОД РАДИОНУКЛИДОВ В ПРОДУКЦИЮ ЖИВОТНОВОДСТВА ПОСЛЕ РАЗОВОГО ПОСТУПЛЕНИЯ В ОРГАНИЗМ

Переход радионуклидов из рациона в мясо животных после разового поступления в организм определяется многими факторами, среди которых ведущую роль занимают такие, как радионуклидный состав и плотность загрязнения сельскохозяйственных угодий, тип почв, система ведения производства, физико-химические свойства радионуклидов, вид животных, их возраст и т. д.

Радионуклиды могут поступать однократно (или коротковременно) и хронически. При ликвидации крупномасштабных аварий на ядерных установках эти варианты происходят наиболее часто.

После разового поступления лактирующим коровам с кормом смеси продуктов деления урана 10-часового возраста уже через 12 часов в органах животных обнаруживается высокая концентрация радионуклидов. Органы и ткани животных по степени накопления радионуклидов образуют следующий ряд:

щитовидная железа > печень > кровь > мышцы > скелет.

При этом основной вклад в радиоактивное загрязнение щитовидной железы, мышц и крови вносят изотопы йода, в то время как загрязнение печени и скелета обусловлено соответственно ^{99}Mo и $^{140}\text{Ba} + ^{140}\text{La}$. В первые дни отмечается наиболее высокое содержание радионуклидов в мягких органах и

тканях животных. В последующем, в результате физического распада короткоживущих радионуклидов и их перераспределения в организме вследствие обмена веществ, концентрация радионуклидов в мягких тканях быстро снижается. За первые 10 суток радиоактивность мягких тканей снижается примерно в 100 раз. У молодых животных депонирование радионуклидов всегда выше, чем у взрослых и старых (Б. Н. Анненков, Е. В. Юдинцева).

Стронций обладает выраженными остеотропными свойствами, однако в первые сутки после его поступления в организм довольно большое количество (до 35,5%) сосредоточено в мягких тканях. В последующем, в результате перераспределения стронция, он почти весь концентрируется в костях животных. В скелете стронция в десятки раз больше, чем в мягких тканях. При этом в печени, почках и легких содержание стронция в 2...5 раз больше, чем в мышцах.

Из мягких тканей до 96...98% первоначально поступившего стронция выводится с периодом полувыведения $T_{эфф}$ равным 1,4...2,4 дня. Оставшееся количество стронция выводится из мягких тканей с $T_{эфф}$ от 21 до 27 дней.

Интенсивность обмена ^{90}Sr между кровью и скелетом значительно ниже. До 80% его выводится из костной ткани с $T_{эфф}$, равным 20...40 дням, а остальное количество стронция выводится с $T_{эфф}$ более 500 дней (Б. Н. Анненков, Е. В. Юдинцева).

Радиоизотопы йода концентрируются в щитовидной железе. При однократном поступлении до 30% радиойода накапливается в щитовидной железе и примерно столько же в других органах и тканях. Через сутки после этого в щитовидной железе остается около 10% радионуклида и 60...70% — в мягких органах и тканях. В последующем происходит перераспределение радиойода в организме. На 14-е сутки до 18% введенного радионуклида концентрируется в щитовидной железе и около 14% — во всех остальных органах и тканях.

Радиоцезий после разового поступления распределяется более-менее равномерно с высокой скоростью обмена в организме животных (табл. 12).

После разового орального введения радиоцезия у животных любого возраста происходит его постепенное выведение. Выведение ^{137}Cs из организма телят происходит по двухэксп-

Таблица 12

**Концентрация ^{137}Cs в органах и тканях животных
через сутки после однократного поступления,
в % от введенного количества на 1 кг ткани
(Б. Н. Анненков, Е. В. Юдинцева)**

Вид животных	Мышцы	Скелет	Печень	Почки
Крупный рогатый скот	0,06	0,03	0,87	1,40
Овцы	0,9	0,4	2,6	4,1
Свиньи	1,6	0,1	0,8	1,3

пониженной зависимости. Большая часть цезия (70...98%) выводится из мягких органов и тканей с периодом полувыведения, равным 1,1...21,6 суток, а остальное количество с большим периодом (55...300 суток). С возрастом животных скорость выведения радионуклидов снижается.

У лактирующих животных выведение радионуклидов производится также и с молоком. Наиболее интенсивное их выведение с молоком наблюдается в течение первых 2 суток. Через 12 часов после введения цезия в 1 литре молока обнаруживается 0,12% его от поступившего количества. В дальнейшем концентрация его быстро увеличивается и через 24...48 часов достигает максимальной величины. В этот период в 1 литре молока содержится 0,42% радиоцезия от введенного количества. За 8 суток с молоком выводится 18% цезия-137 от однократно поступившего количества (Н. А. Корнеев, А. Н. Сироткин).

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В МЯСЕ ЖИВОТНЫХ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ПОСТУПЛЕНИИ

Хроническое (длительное) поступление радионуклидов в организм является наиболее распространенным вариантом, а с момента радиоактивного загрязнения Земли, в результате проведения ядерных испытаний и крупных ядерных катастроф, этому воздействию в разной степени стали подвержены практически все живые существа Земли. При хроническом поступлении наиболее значимы долгоживущие радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr , которые в большом количестве накопились в биосфере Земли.

При хроническом поступлении радионуклидов в организме одновременно происходят следующие процессы: всасывание из ЖКТ и поступление их в кровь, переход вновь поступивших радионуклидов в органы и ткани и накопление их, выведение из организма ранее поступивших и вновь поступивших радионуклидов.

В начале поступления радионуклиды интенсивно откладываются в органах и тканях. Выведение в этот период их происходит гораздо медленнее. Затем по мере накопления их в организме начинают усиливаться процессы выведения и наконец наступает такой момент, когда количество поступающего радионуклида будет равно количеству выводимого в единицу времени. Это состояние называется равновесием. В этот период, несмотря на дальнейшее кормление животных радиоактивным кормом той же самой активности, нарастания содержания их в организме не происходит.

Состояние равновесия быстрее устанавливается в мышцах и паренхиматозных органах и позднее — в скелете.

Стронций довольно быстро в мышечной ткани жвачных достигает состояния равновесия (на 5...7-е сутки), у свиней и кур равновесие устанавливается на 30-е и 90-е сутки соответственно, а цинк-65 у кур достигает равновесия через 120 суток после начала поступления. В скелете состояние равновесия для ^{90}Sr у взрослых коров наступает через 3...4 мес. после начала поступления радионуклида, а у молодых интенсивно растущих организмов оно наступает примерно через год.

Отложение ^{90}Sr в организме животных зависит от уровня кальциевого питания. Насыщение кальцием рациона позволяет снизить накопление ^{90}Sr в скелете в 2...4 раза. Однако этот эффект наблюдается только на фоне дефицита кальция. У мелких животных концентрация стронция в скелете и мягких тканях всегда выше, чем у крупных.

При переводе животных на чистые корма наблюдается его выведение из организма. У крупного рогатого скота через 10 дней после перевода на чистые корма содержание ^{90}Sr в мышцах и паренхиматозных органах уменьшается в 1,5...3 раза, а в скелете — на 30%. В дальнейшем скорость выведения ^{90}Sr из скелета существенно замедляется.

^{90}Sr в мягких органах распределяется сравнительно равномерно, кроме сала, где его концентрация в 4...6 раз ниже. В костной ткани жвачных, напротив, обмен ^{90}Sr достигает равновесия через 150 суток после начала введения и достигает при этом концентрации, составляющей 73...76% от суточного поступления. У кур 8...9-месячного возраста переход ^{90}Sr в костную ткань за 30 суток постоянного введения составил 5%, а в мышечную — 0,02% (Н. А. Корнеев, А. Н. Сироткин).

Несмотря на то что сорбция в ЖКТ радиоизотопов марганца, железа, кобальта, рутения, цезия, плутония незначительна, в условиях хронического поступления они могут накапливаться в мясе и субпродуктах в значительном количестве.

Радиоцезий способен на 100% всасываться у многих видов животных из ЖКТ. Однако у жвачных животных он всасывается только на 50...80%. Это связано с высоким содержанием в корме жвачных большого количества грубых кормов и невысоким его перевариванием.

Возраст — наиболее существенный фактор, изменяющий всасывание радионуклидов, в том числе и цезия. У телят до 3-месячного возраста он всасывается почти 100%, а у животных старше года всасывается его только 58%. Причиной этому служит изменение проницаемости мембран клеток ЖКТ, уменьшение потребности в минеральных солях для организма старшего возраста, а также изменение состава рациона. Это явление отмечено на разных видах животных и для разных радионуклидов.

Распределение радиоцезия в организме происходит одинаково у всех видов животных и не зависит от путей его поступления, а зависит от кратности и длительности его поступления. Однако размеры накопления ^{137}Cs в организме различных животных и человека неодинаковы. Максимальная кратность накопления (т. е. отношение содержания радионуклида в организме к суточному его поступлению с рационом, принятому за единицу) наблюдается у человека (до 175), минимальная (3...5) — у коз и овец, промежуточное положение занимают свиньи и собаки (20...30). Видовые различия в накоплении радиоцезия связаны, очевидно, с особенностями питания, и в частности с количеством потребляемого калия (см. табл. 13).

Таблица 13

**Концентрация ^{137}Cs в 1 кг тканей и органов
в период равновесия при хроническом поступлении,
в % от суточного поступления
(Б. Н. Анненков, Е. В. Юдинцева)**

Виды животных	Мышцы	Печень	Почки	Яичники	Кости	Кратность накопления
Кролики	75	32	37	27	22	3
Овцы	8	6	10	8	1	4,5
Козы	20	19	36	13	2	3
Свиньи	26	10	10	—	2	20
Куры	450	150	250	120	50	5

При ежесуточном поступлении радиоцезия у крупного рогатого скота состояние динамического равновесия между вновь поступаемым и выводимым радионуклидом наступает на 30...58-е сутки.

В органах и тканях практически весь цезий находится в свободном состоянии (99%), что обуславливает его высокую скорость обмена и выведения из организма. Различают четыре обменные формы радиоцезия: внеклеточную ионную, внутриклеточную ионную, промежуточную органически связанную и конечную органически связанную. Скорость накопления и выведения каждой фракции определяет поведение радиоцезия в тканях.

С возрастом содержание радиоцезия в органах и тканях животных закономерно снижается. В мышцах телят двухмесячного возраста она составляет 55,5%, а у десятимесячных животных — 10% от поступающего с рационом. Минимальная величина перехода радиоцезия из рациона в мышечную ткань у взрослых животных, и она колеблется в пределах 0,47...4,18% у коров и 0,73...9,3% у быков от суточного поступления цезия в 1 кг мышц.

Темпы накопления радиоцезия в мышечной ткани напрямую зависят от удельной активности радионуклидов в кормах. Чем выше степень загрязнения радиоцезием кормов, тем выше скорость накопления его в мышечной ткани. Так, при содержании бычков на рационе с суммарной активностью 3,7...11,1 кБк/сутки ($[1...30] \cdot 10^{-8}$ Ки/сут) дву-

кратное накопление в мышечной ткани радиоцезия достигается на 86-е сутки. А при содержании на рационе с активностью 131,7...360,3 кБк/сутки ($[355,6...972,8] \cdot 10^{-8}$ Ки/сут) оно достигается на 11-е сутки (Р. Г. Ильязов).

Эффективный период полувыведения радиоцезия из организма крупного рогатого скота находится в пределах 20...40 суток.

У лактирующих коров после разового поступления цезия спустя 48 часов в молоке наблюдается его максимальная концентрация.

При хроническом поступлении радиоцезия равновесная концентрация в молоке устанавливается в течение 20 суток, в 1 литр молока при этом переходит около 1% радиоцезия от поступившего с суточным рационом (А. Н. Сироткин).

У коз и овец с молоком выделяется радионуклидов больше, чем у коров. Так, стронций-90 в суточном удое выделяется у коз в количестве 0,61...1,2%, а у овец — 0,95...6,34%, у свиней с молоком его выделяется от 1 до 6%. Цезий с молоком коз выделяется в количестве 6%, а с молоком овец — 4,1% от поступившего количества. Концентрация радионуклидов в молоке зависит от длительности их поступления в организм, периода лактации, возраста животных, содержания в рационе стабильных стронция, кальция, калия и других факторов.

У всех видов животных с молоком больше выделяются следующие изотопы: тритий, калий-40, изотопы йода и цезия. Стронция в молоко поступает примерно в 10 раз меньше. Редкоземельные и трансурановые элементы в молоко переходят в очень малых количествах.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПЕРЕХОД РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ РАЦИОНА ЖИВОТНЫХ В ПРОДУКЦИЮ ЖИВОТНОВОДСТВА

На переход радионуклидов в продукцию животноводства — молоко, мясо, яйца оказывает существенное влияние содержание в рационе стабильных химических аналогов радионуклидов. Недостаток щелочноземельных элементов увеличивает переход ^{90}Sr из рациона в продукцию животноводства,

а обогащение рациона этими элементами, напротив, снижает переход стронция в мясо, молоко, яйцо. Введением углекислого Са в рацион животных можно в 2...3 раза снизить отложение стронция в организме животных. У новорожденных телят от матери, получавшей дополнительно с рационом в течение беременности по 46 г Са, накопление ^{90}Sr в скелете было в 2,1...2,4 раза меньше, чем у телят, полученных от коров, в рацион которых вводили по 18...23 г Са. В постнатальный период защитный эффект кальция по накоплению стронция в организме животных увеличивается.

В опытах на крупном рогатом скоте эмбрионального периода и в начальный постэмбриональный период также установлено снижение накопления ^{90}Sr в организме при кормлении коров-матерей или новорожденных телят кормом с повышенным содержанием кальция. Однако если с кальцием в организм животных поступает повышенное количество стабильного стронция, то он оказывает негативное воздействие на состояние растущих животных. У таких телят были выявлены разнообразные и глубокие клинические нарушения: неэластичный шерстный покров, неправильная постановка конечностей, опухание карпальных суставов, хромота. В паренхиматозных органах были выявлены некоторые дистрофические изменения. В печени и почках наблюдалось уменьшение высоты эпителия, увеличение размеров фолликулов и уплотнение коллоида. Содержание стабильного стронция в скелете таких телят было повышено в 8...10 раз. Поэтому высокие дозы фосфорно-кальциевых подкормок для выращивания телят и снижения поступления в их организм стронция-90 следует применять осторожно и с учетом неизбежно присутствующего в них стабильного стронция.

Кроме того, уменьшение накопления радиоактивного стронция в организме растущих животных путем обогащения рациона кальцием наблюдается только в том случае, если рацион содержит нормальное или несколько сниженное количество кальция.

Введение взрослым коровам в рацион 12,5 и 128 г кальция в виде минеральной соли трикальцийфосфата (1-й и 2-й группы) и 120 г кальция в виде люцернового сена (3-я группа) на фоне постоянного поступления в индикаторных коли-

чествах с рационом в течение 120...134 дней радиоактивного стронция показало, что отложение стронция-90 в скелете коров 3-й группы в 8,3 раза меньше, чем у коров 1-й группы (12,5 г Са) и в 4,9 раза меньше, чем у коров 2-й группы. Увеличение массы кальция в рационе животных 2-й группы в 10,4 раза по сравнению с 1-й группой снижает отложение радионуклида в скелете не более чем в 1,6 раза. Таким образом, повышение концентрации кальция в рационе коров на фоне его дефицита существенно снижает накопление стронция-90 в костной ткани. При этом защитная роль кальция, содержащегося в сене, более эффективна, чем кальция минеральной подкормки. Положительный эффект кальция корма относительно накопления в организме ^{90}Sr наблюдается лишь у животных позднего постэмбрионального периода жизни. Увеличение массы кальция корма в рационе телят молочного периода выращивания практически не эффективно, а в поздний молочный период он лишь на 25% снижает накопление ^{90}Sr в скелете. Неоднозначность действия кальция на накопление ^{90}Sr у крупного рогатого скота разного возраста объясняется особенностями пищеварения. В молочный период микробиологические процессы в преджелудках ограничены, микрофлора рубца не имеет большого значения, и у телят преобладает кишечный тип пищеварения. При переходе телят с молочного кормления на растительные корма кишечное пищеварение заменяется желудочно-кишечным. У телят-молочников преджелудки не приспособлены для расщепления клетчатки растительных кормов, и поэтому содержащиеся в растительном корме вещества не могут активно воздействовать на метаболизм ^{90}Sr (Н. А. Корнеев, А. Н. Сироткин).

Переход ^{90}Sr в молоко коров также существенно зависит от содержания в рационе Са. Использование рациона, дефицитного по Са, увеличивает содержание стронция в молоке, и, наоборот, увеличение Са способствует снижению перехода ^{90}Sr в молоко этих коров. Особенно сильно этот эффект проявляется при использовании в качестве кальциевого источника кормов, богатых этим элементом (бобовые культуры).

Наиболее эффективным фактором для снижения поступления йода-131 в молоко животных является быстрый перевод животных на незагрязненные пастбища или их стойловое

содержание и кормление чистыми кормами. Своевременный перевод животных на чистые корма позволяет снизить дозу воздействия на щитовидную железу людей, потребляющих молоко от этих коров — на 70...80%.

Введение в рацион лактирующих животных стабильного йода в качестве калийной соли в дозе 2 г/сут уменьшает переход ^{131}I в молоко в 2 раза, а в щитовидную железу — на 90%.

На переход радиоцезия из рациона в продукцию животноводства большое влияние оказывают факторы, ограничивающие всасывание его из ЖКТ. Это могут быть цеолиты, глина или другие сорбенты. Однако наиболее сильное влияние оказывает использование ферроцианидсодержащих препаратов в концентрации по действующему веществу 3...6 г/голову в сутки. Использование этих сорбентов позволяет снизить содержание ^{137}Cs в мясе и молоке в 2...10 раз. При максимальной эффективности препарата удалось снизить содержание цезия в организме почти в 200 раз (А. Н. Сироткин).

Контрольные вопросы

1. Что обуславливает токсичность радионуклидов для человека?
2. Каковы основные пути поступления радионуклидов в организм человека?
3. Как происходит накопление радионуклидов в отдельных органах и тканях и в организме в целом?
4. Как выводят из организма радионуклиды?
5. Каковы особенности накопления и выведения радионуклидов при разовом и хроническом их поступлении с кормом?
6. Что представляют собой горячие частицы и какова их опасность для организма?
7. В чем заключаются особенности накопления и выведения радиоизотопов йода, стронция и цезия?
8. От чего зависит скорость накопления и выведения радионуклидов из организма животных?

ГЛАВА ПЯТАЯ

ВЕДЕНИЕ ЖИВОТНОВОДСТВА В УСЛОВИЯХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

26 апреля 1986 г. на Чернобыльской АЭС произошли два последовательных взрыва на реакторе 4-го энергоблока, что привело к разрушению графитовой кладки реактора, технологических каналов и разгерметизации реакторного пространства, разрушению оболочек тепловыделяющих сборок и разгерметизации большей части тепловыделяющих элементов. В результате мощного взрыва газоаэрозольное облако проникло сквозь инверсионный слой атмосферы на высоту более 1,5 км и быстро распространилось в северном направлении (за 36 часов облако преодолело расстояние 1200 км и достигло границ Швеции). Далее произошли выбросы в восточном, западном и юго-западном направлениях, что определялось направлением ветра.

Радионуклидный состав выброса был очень сложным и со временем постоянно менялся за счет распада короткоживущих радионуклидов (см. табл. 14).

Кроме этих радионуклидов, в активной зоне реактора предположительно находилось углерода-14 — $0,1 \cdot 10^{15}$ Бк (2700 Ки) с $T_{1/2}$ 5730 лет, трития — $1,4 \cdot 10^{15}$ Бк (38 кКи) с $T_{1/2}$ 12,3 года, которые также попали в атмосферу и включились в биосферный обмен как основные элементы жизни на Земле. А также мягкого бета-излучателя йода-129 ($T_{1/2}$ $15,7 \cdot 10^6$) в количестве $8 \cdot 10^{10}$ Бк (2,2 Ки), но из-за сложности определения данных по этим радионуклидам недостаточно.

Изотопный состав выбросов установлен достаточно точно, а вот количественная оценка выбросов в разных публикациях

Таблица 14

Состав выбросов активной зоны аварийного реактора

Элемент	Период полураспада	Количество, Бк	Доля выброса из реактора, %
Криптон-85	10,8 года	$3,3 \cdot 10^{16}$	100
Ксенон-135	5,27 дня	$1,7 \cdot 10^{18}$	100
Йод-131	8,04 дня	$1,3 \cdot 10^{18}$	20
Теллур-132	3,25 дня	$3,2 \cdot 10^{17}$	15
Цезий-134	2,05 года	$1,9 \cdot 10^{17}$	10
Цезий-137	30,1 года	$2,9 \cdot 10^{17}$	13
Молибден-99	2,8 дня	$4,8 \cdot 10^{18}$	2,3
Цирконий-95	65,5 дня	$4,4 \cdot 10^{18}$	3,2
Рутений-106	1,0 год	$2,0 \cdot 10^{18}$	2,9
Рутений-103	39,5 дня	$4,1 \cdot 10^{18}$	2,9
Барий-140	12,8 дня	$2,9 \cdot 10^{18}$	5,6
Церий-141	32,5 дня	$4,4 \cdot 10^{18}$	2,3
Церий-144	234 дня	$3,2 \cdot 10^{18}$	2,8
Стронций-89	53 дня	$2,0 \cdot 10^{18}$	4,0
Стронций-90	27,8 года	$2,0 \cdot 10^{17}$	4,0
Нептуний-239	2,35 дня	$1,4 \cdot 10^{17}$	3,0
Плутоний-238	87,7 года	$1,0 \cdot 10^{15}$	3,0
Плутоний-239	24,4 тыс. лет	$1,2 \cdot 10^{15}$	3,0
Плутоний-240	6,6 тыс. лет	$1,2 \cdot 10^{15}$	3,0
Плутоний-241	14,4 года	$1,7 \cdot 10^{17}$	3,0
Кюрий-242	164 дня	$2,6 \cdot 10^{16}$	3,0

отличается весьма существенно, ибо проведена была исключительно расчетным методом по предположениям о наличии в активной зоне реактора наработанных продуктов ядерного топлива.

По скромным подсчетам, в результате Чернобыльской аварии в атмосферу было выброшено радиоактивных веществ в 90 с лишним раз больше, чем при взрыве атомной бомбы над Хиросимой. Следовательно, Чернобыльская трагедия по своим последствиям характеризуется как крупнейшая катастрофа, произошедшая по вине хозяйственной деятельности человека.

Радиоактивный состав выпадений определялся изотопным составом облака. Основу загрязнения обширных территорий составили конденсационные и адсорбционные радиоактивные частицы, образовавшиеся в результате конденсации летучих нуклидов, их адсорбции на мельчайших частицах воды, сажи, диспергированного графита и материалов конструкций. Наиболее опасны горячие частицы, образовавшиеся в результате разрушения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), отличающиеся более высокой удельной активностью. Среди этой группы частиц выделяют особо опасные, которые обогащены плутонием и другими альфа-активными радионуклидами. По данным А. А. Тер-Саакова, кроме этих частиц в чернобыльском выбросе наблюдались также рутениевые горячие частицы (до 90% рутения), цериевые (до 80% церия) и цезиевые (до 60% цезия).

Перенос радиоаэрозолей на большие расстояния сопровождался выпадениями радиоактивных осадков, которые сильно зависели от метеоусловий и особенностей самой местности. С увеличением расстояния от станции в пробах заметно увеличивалось содержание легколетучих изотопов цезия и снижалось содержание крупных аэрозольных частиц. Все это привело к крайне неравномерному распределению радиоактивных выпадений, называемому пятнистостью. Пятнистая структура загрязнений обусловила значительные трудности организации и проведения дезактивационных работ в населенных пунктах и потребовала проведения радиационного обследования каждого подворья, а на сельскохозяйственных угодьях — каждого поля.

ПРОГНОЗ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В КОРМА И ПРОДУКЦИЮ РАСТЕНИЕВОДСТВА

Радиоактивное загрязнение огромных территорий СНГ поставило перед работниками агропромышленного комплекса совершенно новые, ранее несвойственные для этой отрасли задачи, связанные с необходимостью проведения комплекса мероприятий по снижению содержания радионуклидов в получаемой продукции до безопасных уровней. Среди этих

мероприятий одно из важнейших мест занимает прогноз содержания радионуклидов в получаемой продукции, поскольку он заблаговременно позволяет разработать и провести защитные мероприятия или своевременно перепрофилировать производство на те направления, которые обеспечат получение продукции с наименьшим содержанием радионуклидов.

В зависимости от поставленных задач прогнозы разделяют на краткосрочные и длительные, предварительные и заключительные. На начальном этапе после радиоактивного загрязнения территорий делаются предварительные, краткосрочные прогнозы. Они, как правило, весьма ориентировочные, поскольку в этот период отсутствуют точные данные о радиационной обстановке, биологической доступности радионуклидов и т. д. Однако, несмотря на эти недостатки, предварительные и краткосрочные прогнозы всегда необходимы и очень важны, поскольку позволяют своевременно принять меры безопасности для населения и сельскохозяйственных животных, а также определить и спланировать стратегию ведения производства.

После уточнения радиационной обстановки и особенностей радионуклидных выпадений делают более точный долгосрочный прогноз, на основе которого определяется возможность дальнейшего производства на пострадавших территориях и разрабатывается технология ведения хозяйства с учетом реальных особенностей. Со временем, за счет распада короткоживущих радионуклидов, миграции долгоживущих радионуклидов и изменения их биологической доступности, могут проводиться уточнения или изменения принятых решений.

Прогноз загрязнения растениеводческой продукции позволяет заблаговременно планировать набор культур для возделывания на загрязненных радионуклидами угодьях, их размещение по полям севооборотов и отдельным участкам с учетом плотности загрязнения почв и возможности использования получаемой продукции (продовольственные цели, фураж, промышленная переработка и др.).

Для прогнозирования поступления радионуклидов в корма и продукты животноводства необходимо прежде всего установить, какими радионуклидами загрязнены воздух и территории сельскохозяйственных угодий и какова плотность

и равномерность этих загрязнений. Другим важнейшим показателем является биологическая доступность и способность каждого из радионуклидов мигрировать по пищевым цепочкам, характеризующаяся коэффициентами их переходов в корма и организм животных.

Исследованиями установлено, что спустя 10 лет после аварии 30...90% радионуклидов сосредоточено в активной зоне расположения основной массы корней сельскохозяйственных культур. На необрабатываемых после Чернобыльской катастрофы землях практически все радионуклиды находятся в верхней части (до 10...15 см) гумусовых горизонтов, а на пахотных почвах радионуклиды распределены сравнительно равномерно по всей глубине обрабатываемого слоя. Расчеты показывают, что в ближайшей перспективе самоочищение корнеобитаемого слоя загрязненных почв за счет вертикальной миграции радионуклидов будет незначительным.

Вместе с тем наблюдаются процессы локального вторичного загрязнения почв сельскохозяйственных угодий за счет горизонтальной миграции радионуклидов вследствие ветровой и водной эрозии. Содержание ^{137}Cs в пахотном горизонте различных элементов рельефа склоновых земель в результате водной эрозии на посевах однолетних культур за девять лет перераспределилось до 1,5...3,0 раз. Увеличение плотности загрязнения почв ^{137}Cs в зоне аккумуляции (нижние части склонов и понижения) по сравнению с зоной смыва составило в среднем от 13% при ежегодном смыве почвы менее 5 т/га до 75% при смыве 12...20 т/га. На беспахотных посевах многолетних трав твердого стока не наблюдалось, и достоверных различий в плотности загрязнения почв по элементам склонов не установлено. В результате ветровой эрозии осушенных торфяно-болотных и песчаных почв, используемых под посев однолетних культур, локальные различия в плотности загрязнения пахотного горизонта радиоцезием достигали 1,5...2,0 раз. Это подчеркивает необходимость защиты почв от водной и ветровой эрозии, что обеспечивает также снижение потерь гумусового слоя и уменьшает вероятность загрязнения продукции на локальных участках угодий.

Доступность растениям ^{137}Cs в почве со временем снижается вследствие его перехода в необменно-поглощенное

состояние, а подвижность ^{90}Sr остается высокой и имеет тенденцию к повышению. Основное количество ^{137}Cs (70...84%) находится в прочносвязанной форме. Для ^{90}Sr , наоборот, характерно преобладание легкодоступных для растений водорастворимой и обменной форм, которые в сумме составляют 53...87% от валового содержания. Поступление ^{90}Sr из почв в растения практически в 10 раз выше, чем ^{137}Cs при одинаковой плотности загрязнения земель.

Исследования, проведенные в послеаварийный период, показали, что поведение радионуклидов в системе почва-растение со временем изменяется. Установлено постоянное снижение подвижности ^{137}Cs вследствие перехода его в необменно-поглощенное состояние и увеличение подвижности ^{90}Sr , что обусловило соответствующие изменения биологической доступности радионуклидов. За пять лет по сравнению с 1991 г. доступность ^{137}Cs растениям снизилась в среднем в 1,5 раза и по сравнению с 1987 г. до 4 раз, тогда как ^{90}Sr , наоборот, повысилась на 5...25%. В связи с этим для более точных прогнозов накопления радионуклидов в растениях необходимо периодически уточнять коэффициенты перехода радионуклидов.

Содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции зависит как от плотности загрязнения, так и от типа почв, их гранулометрического состава и агрохимических свойств, а также биологических особенностей возделываемых культур. Показатели почвенного плодородия оказывают существенное влияние на накопление радионуклидов всеми сельскохозяйственными культурами, особенно многолетними травами. При повышении содержания физической глины в почве от 5 до 30%, содержания гумуса — от 1 до 3,5% переход радионуклидов в растения снижается в 1,5...2 раза, а по мере повышения содержания в почве подвижных форм калия и фосфора от низкого (менее 100 мг K_2O на кг почвы) до оптимального (200...300 мг/кг) и изменения реакции почв от кислого интервала (рН 4,5...5,0) к нейтральному (рН 6,5...7,0) — в 2...3 раза. Минимальный переход ^{137}Cs и ^{90}Sr в растения наблюдается на почвах с оптимальными параметрами агрохимических свойств.

Еще большее влияние на накопление радионуклидов в сельскохозяйственной продукции оказывает режим увлаж-

нения почв. Установлено, что переход радиоцезия в многолетние травы повышается в 10...27 раз на дерново-глеевых и дерново-подзолисто-глеевых почвах по сравнению с автоморфными и временно избыточно увлажняемыми разновидностями этих почв. Исследованиями БелНИИ мелиорации и луговодства установлено, что минимальное накопление ^{137}Cs в многолетних травах обеспечивается при поддержании уровня грунтовых вод на глубине 90...120 см от поверхности осушенных торфяных и торфяно-глеевых почв. Установленные в исследованиях закономерности подтверждены практикой. На переувлажненных песчаных и торфяных почвах, например в Норовлянском и Лальчицком районах Гомельской области, Столинском и Лунинецком районах Брестской области, высокая степень загрязнения травяных кормов и молока наблюдается даже при относительно низких плотностях загрязнения ^{137}Cs (2...5 Ки/км² или 74...185 кБк/м²) и ^{90}Sr (0,3...1,0 Ки/км² или 11,1...37 кБк/м²). В то же время на окультуренных участках дерново-подзолистых суглинистых почв продукция с допустимым содержанием радионуклидов была получена при плотности загрязнения ^{137}Cs до 20...30 Ки/км² (740...1110 кБк/м²).

Очевидно, что плотность загрязнения почв сельскохозяйственных угодий радионуклидами не может однозначно отражать уровень загрязнения выращиваемой сельскохозяйственной продукции и в настоящее время для разработки эффективных защитных мероприятий необходим учет основных свойств почв каждого поля. Особенности минерального питания, разная продолжительность вегетационного периода и другие биологические особенности различных видов растений влияют на накопление радионуклидов. Содержание ^{137}Cs в расчете на сухое вещество отдельных культур может различаться до 180 раз, а накопление ^{90}Sr — до 30 раз при одинаковой плотности загрязнения почв. Существенное влияние на переход из почвы в растения ^{137}Cs оказывает содержание в ней органического вещества. Поступление этого радионуклида в растения из торфянистых почв превышает его поглощение из минеральных в несколько раз. Этот факт всегда необходимо учитывать при составлении прогноза. Сортовые различия в накоплении радионуклидов значительно меньше

(до 1,5...3,0 раза), но их также необходимо учитывать при подборе культур (см. «Практикум по радиобиологии», приложение 6).

Для прогноза накопления радионуклидов в продукции растениеводства используются значения коэффициентов перехода из почвы в урожай в расчете на 1 Ки/км² (37 кБк/м²), которые дифференцированы в зависимости от типа и гранулометрического состава почв, содержания обменного калия и реакции почвенной среды (см. «Практикум по радиобиологии», приложение 6), а также результаты агрохимического и радиологического обследования почв, представленные в виде агрохимических паспортов полей и совмещенных картограмм загрязнения почв ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в границах хозяйств с принятыми градациями.

Пример расчета прогнозируемого уровня загрязнения продукции растениеводства. В настоящее время в практике применяются две единицы радиоактивности: *беккерель* (Бк) и *кюри* (Ки), 1 Ки = 3,7·10¹⁰ Бк или 1 нКи (1·10⁻⁹Ки) = 37 Бк.

Для прогноза уровня загрязнения конкретной культуры радионуклидами цезия или стронция необходимо коэффициенты перехода, рассчитанные для плотности загрязнения почв 37 кБк/м² (1 Ки/км²), умножить на величину плотности загрязнения почвы, выраженную в аналогичных единицах. Полученный результат будет соответствовать уровню загрязнения растениеводческой продукции, выращенной на конкретном поле без проведения дополнительных защитных мероприятий, направленных на снижение перехода радионуклидов из почвы в растения.

Например, необходимо определить уровень радиоактивной загрязненности сена многолетних злаковых трав ¹³⁷Cs на дерново-подзолистых супесчаных почвах. Плотность загрязнения почвы по ¹³⁷Cs равна 10 Ки/км² при содержании обменного калия 150 мг/кг почвы. По таблице (см. «Практикум по радиобиологии», приложение 6) находим значение коэффициента пропорциональности (удельная радиоактивность 1 кг продукции при плотности загрязнения почв 1 Ки/км² или 37 кБк/м²), который равен 0,80 нКи/кг, умножаем на 10 Ки/км² и на коэффициент 37 (для перевода нКи в Бк). Таким образом, прогнозируемое загрязнение сена

^{137}Cs составит $0,8 \cdot 10 \cdot 37 = 296$ Бк/кг. Сопоставляя полученную величину с нормативной, определяем возможность использования сена. В данном случае сено может без ограничения скармливаться дойному стаду для получения цельного молока. Аналогичным образом делаются расчеты для прогноза содержания ^{90}Sr в сельскохозяйственных культурах. При этом учитывается уровень кислотности почвы.

Для разных типов почв коэффициент, характеризующий отношение содержания, например, Sr-90 в урожае к содержанию его в почве для большинства почв колеблется в узких пределах и составляет: для соломы овса — 0,5...0,62 и зерна — 0,5...9 (Н. А. Корнеев, Н. Сироткин). Прогнозировать содержание Sr-90 в зерне и соломе можно путем умножения фактического количества Sr-90 в проростках или растениях в период кущения на величину коэффициента. Заслуживает особого внимания метод определения накопления Sr-90 в растениях с помощью комплексного показателя (КП) В. М. Клечковского. Для определения КП содержание Sr-90 в единицах мКи/км² (Бк/м²) делят на количество обменного кальция, мг-экв/100 г почвы, после чего количество стронциевых единиц (с. е.) в растениях делят на это значение:

$$\text{КП} = \frac{(\text{с. е. в растениях})(\text{Ca мг-экв}/100 \text{ г почвы})}{(^{90}\text{Sr мКи}/\text{км}^2 \text{ или Бк}/\text{м}^2)}.$$

Одна стронциевая единица — отношение концентрации стронция-90 в пикокюри (10^{-12} Ки) или на 1 кг продукта и концентрации в нем кальция (г/кг).

При поверхностном загрязнении естественных кормовых угодий стронцием-90, равным 1 мКи/км² (37 Бк/м²), 2 кг сухого вещества естественных трав содержит 4,8 с. е., сеяных злаковых трав — 1,5 с. е., свеклы — 1,7 с. е., клубней картофеля — 1,56 с. е., а в 1 кг зерна пшеницы — 0,8 с. е.

Методика расчета накопления ^{90}Sr в растениях применяется в следующем порядке. Например, необходимо дать прогноз концентрации ^{90}Sr в сене клевера и зерне овса и ячменя, если известно, что содержание ^{90}Sr в почве равно 40 мКи/км² (1480 Бк/м²), а обменного Ca 10 мг-экв/100 г почвы. Искомая величина находится путем умножения КП на отношение ^{90}Sr и Ca и в данном случае составит 60 с. е. для сена клевера

и 36 с. е. для зерна, овса и ячменя. Следует учесть, что если содержание обменного Са в почве достаточно высоко (свыше 25 мг-экв/100 г почвы), то использование этого способа может привести к ошибочным результатам в оценке накопления ^{90}Sr в растениях. Этот метод прогноза является вполне удовлетворительным на пахотных землях с количеством обменного Са от 4 до 25 мг-экв/100 г почвы. На естественных лугах прогнозирование перехода ^{90}Sr в растения этим методом может дать ошибочные результаты. Этот способ также не следует применять на карбонатных почвах.

Однако, всякий раз составляя прогноз загрязненности продукции растениеводства, следует помнить, что на почвах одного и того же типа, содержащих одинаковое количество обменного калия и кальция, содержание радионуклидов в сельскохозяйственных культурах может различаться в 1,5...5 раз. Причиной этого являются различия в погодных условиях и используемой агротехники.

Для получения более точных результатов используют метод проростков. Для этого берут образцы почв с глубины пахотного слоя конкретного поля, тщательно их перемешивают и затем на таком усредненном образце высевают пророщенные семена. В 20-дневном возрасте надземную массу рас-

Таблица 15

Коэффициенты пересчета содержания радионуклидов в 20-дневных растениях для прогноза загрязненности урожая (по данным Б. Н. Анненкова, Е. В. Юдинцевой)

Культура	Зерно, клубни	Солома, ботва	Культура	Зерно, клубни	Солома, ботва
Цезий-137			Стронций-90		
Овес	0,20	0,45	Овес	0,050	0,70
Ячмень	0,20	0,50	Ячмень	0,035	0,50
Пшеница яровая	0,22	0,46	Озимая пшеница	0,060	0,60
Гречиха	0,21	0,39	Яровая пшеница	0,045	0,70
Вика	0,53	0,72	Горох	0,040	1,25
Картофель	0,56	0,70	Картофель	0,035	0,70

тений срезают на уровне почвы, промывают в проточной воде, высушивают и в воздушно-сухом материале определяют содержание радионуклидов. Ожидаемую загрязненность урожая определяют по коэффициентам пересчета, позволяющим по результатам загрязненности 20-дневных растений рассчитать содержание радионуклидов в конечной продукции (табл. 15). Метод проростков не требует предварительного анализа на содержание в почве обменных форм радионуклидов, а также проведения агрохимических исследований (Б. Н. Анненков, Е. В. Юдинцева).

ПРОГНОЗ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРОДУКЦИЮ ЖИВОТНОВОДСТВА

Для прогноза накопления радионуклидов в продукции животноводства определяющим фактором является степень загрязненности кормов. Другим важнейшим показателем является биологическая доступность и способность каждого из радионуклидов мигрировать по пищевым цепочкам, характеризующаяся коэффициентами их переходов в корма и организм животных. С другой стороны, накопление радионуклидов в организме животных и получаемой от них продукции зависит и от многих других факторов, среди которых большое значение имеет вид, возраст, физиологическое состояние животных, их продуктивность, а также тип рациона.

Прогноз содержания радионуклидов в продуктах животноводства ($A_{\text{прод}}$) рассчитывают по формуле

$$A_{\text{прод}} = A_{\text{рац}} \cdot K_{\text{п}} / 100 \text{ (Бк/кг)},$$

где $A_{\text{рац}}$ — активность радионуклидов суточного рациона, Бк; $K_{\text{п}}$ — коэффициент перехода радионуклида из рациона в 1 л (кг) продукции, %.

При этом используются коэффициенты перехода радионуклидов из корма в мясо, молоко, кости и др. продукцию животноводства с учетом возраста и направления продуктивности.

Аналогичным способом можно сделать прогноз поступления радионуклидов из рациона в молоко лактирующих овец, коз и коров.

Таблица 16

Коэффициенты перехода радионуклидов из суточного рациона в продукцию животноводства (в % на 1 кг продукта)

Вид продукции	Радионуклиды	
	цезий-137	стронций-90
Молоко коровье (в среднем за год)	0,62	0,14
в т. ч. в стойловый период	0,48	0,14
в пастбищный период	0,74	0,14
Говядина	4	0,04
Свинина	25	0,10
Баранина	15	0,10
Мясо кур	450	0,20
Яйцо	3,5	3,20

Таблица 17

Коэффициенты накопления цезия-137 в организме животных в зависимости от возраста и массы тела животных, % суточного поступления в расчете на 1 кг живой массы (по данным А. А. Курганова, Г. С. Щуровой, А. Д. Пастернак, М. В. Понамарева, 1996)

Возраст, мес.	Живая масса, кг	Коэффициент накопления	Возраст, мес.	Живая масса, кг	Коэффициент накопления
Крупный рогатый скот			Свиньи		
2...3	100	26,0	2	15	60,0
6...9	200	6,5	4	40	25,0
12...15	300	3,5	5	50	20,0
15...16	400	3,0	6	70	15,0
Взрослые	500	2,5	7	90	12,0
Взрослые	600	2,0	8	110	10,0

Цезий-137 более интенсивно переходит из кормов в молоко и мясо по сравнению со стронцием-90, что хорошо иллюстрируется данными табл. 16.

Примечание. Материалы взяты из руководства по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 1997–2000 гг.

Действительно, размеры перехода радионуклидов из корма в продукцию животноводства зависят от формы и состояния их в растениях, длительности поступления в организм, возраста животных, их физиологического состояния, способа содержания, типа питания и других факторов.

Большое значение играет возраст животного, потребляющего радиоактивный корм. Молодые животные гораздо активнее накапливают радионуклиды, чем взрослые и старые, что, безусловно, связано с особенностями и интенсивностью обмена веществ в молодом растущем организме. Эти различия при хроническом поступлении радионуклидов с кормом у разных возрастных групп животных колеблются от 2,3 до 12,1 раза (табл. 17).

У высокопродуктивных животных коэффициент перехода радионуклидов из кормов в организм, как правило, ниже, чем у низкопродуктивных. Существенное влияние на величину коэффициента перехода оказывает сбалансированность рационов кормления животных по основным и, особенно, минеральным элементам питания.

Установлена определенная связь между содержанием клетчатки в загрязненном рационе коров при стойловом содержании и переходом ^{137}Cs в молоко. Так, с увеличением содержания клетчатки в рационе с 1,3...1,8 до 3,1 кг/сутки отмечается уменьшение коэффициента перехода ^{137}Cs (% $K_{п} = B_{к}/л: B_{к}/рац.$) от 0,9 до 0,6. Как показали эксперименты, коэффициенты перехода цезия-137 в молоко из рациона с различным уровнем загрязнения кормов при стойловом содержании и выпасе коров на культурном пастбище мало различались (от 0,48 до 0,74). Однако в условиях содержания коров на малопродуктивном естественном пастбище с изреженным травостоем отмечалось многократное повышение перехода ^{137}Cs в молоко. Это объясняется как низким качеством травяного корма на естественном пастбище, так и заглатыванием животными почвенных частиц верхнего слоя дернины с высокой концентрацией в ней радиоцезия. В среднем, по данным исследований Белорусского НИИ радиологии, для стойлового периода принят коэффициент перехода ^{137}Cs из рациона в молоко 0,48, а для пастбищного — 0,74%. Для получения молока и мяса, соответствующих нормативным

требованиям, корма для молочного скота и молодняка на заключительной стадии откорма должны выращиваться на улучшенных сенокосах и пастбищах или пашне. Для обеспечения производства молока и мяса с допустимым содержанием радионуклидов устанавливаются *пределы допустимого содержания* (ПДС) ^{137}Cs и ^{90}Sr в рационах крупного рогатого скота разного возраста и уровня продуктивности, *предельно допустимых уровней* (ПДУ) радиоактивного загрязнения различных кормов и ПДУ загрязнения почв, на которых возможно производство кормовых культур в пределах допустимых уровней содержания радионуклидов.

ПДС радионуклидов в рационе определяется из соотношения

$$\text{ПДС} = \text{ДУР} \cdot 100 / K_{\text{п}},$$

где ПДС — предел допустимого содержания радионуклидов в рационе крупного рогатого скота, Бк; ДУР — допустимый уровень содержания радионуклидов в пищевом продукте (молоко, мясо) Бк/л (кг); $K_{\text{п}}$ — коэффициент перехода радионуклидов из рациона животных в 1 л (кг) пищевого продукта (молоко, мясо), % суточного поступления.

Переход ^{90}Sr из серых лесных почв в рацион жвачных и всеядных животных практически не зависит от их возраста, но тесно связан с видом угодья и типом питания животных. Если для взрослых жвачных животных коэффициент перехода ^{90}Sr из почвы в концентратный рацион составляет в среднем 0,8, то в сеной рацион — 1,5...2,5. Содержание ^{90}Sr в мышцах у животных, кормившихся концентратным рационом, в среднем в 4 раза меньше, чем у животных, получавших сеной рацион. Значения коэффициентов перехода из почвы в смешанный рацион и мясо занимают промежуточное положение, при этом количественные характеристики коэффициентов практически не зависят от возраста животных, но связаны с их видовыми особенностями. По уровню накопления ^{90}Sr в организме мясопродуктивные животные располагаются в ряд:

овцы > крупный рогатый скот > свиньи > куры.

Вследствие большой скорости миграции изотопов йода в пищевых цепях сельскохозяйственных животных и интен-

сивного поступления его в организм человека с молоком, важно сделать своевременный прогноз загрязненности получаемой продукции и особенно молока. В связи с этим были установлены коэффициенты перехода изотопов йода из пастбищной растительности в молоко. При плотности загрязнения пастбища, равной $1,1 \text{ мкКи/м}^2$ ($40,7 \text{ кБк/м}^2$), содержание йода-131 в молоке составляет $0,1 \text{ мкКи/л}$ ($3,7 \text{ кБк/л}$). Исходя из этого соотношения можно прогнозировать загрязненность молока при иных плотностях загрязнения сельскохозяйственных угодий йодом-131. Однако следует считать подобный прогноз ориентировочным, поскольку загрязненность молока зависит также от сезона года, типа питания лактирующих животных и других факторов.

Основным источником поступления радионуклидов в пищевые цепи является почва, следовательно, для составления прогноза, особенно долгосрочного, необходимо установить взаимосвязь между содержанием радионуклидов в почве и в получаемой на этой территории продукции растениеводства и животноводства. Использование коэффициентов перехода радионуклидов из почв, занятых разными угодьями, в молоко и мясо сельскохозяйственных животных позволяет составить прогноз накопления радионуклидов в растениях, кормах продуктивных животных, а также в получаемом от них молоке и мясе по следующей формуле:

$$A_{\text{пр}} = K C_{\text{п}},$$

где $A_{\text{пр}}$ — концентрация радионуклида в продукте, Бк/кг ; K — коэффициент перехода радионуклида из почвы в продукт ($\text{Ки/кг}/(\text{Ки/м}^2)$) или ($\text{Бк/кг}/(\text{Бк/м}^2)$); $C_{\text{п}}$ — содержание радионуклида в почве, Бк/м^2 .

Поступление радионуклидов в растения, а затем в организм сельскохозяйственных животных и продукцию животноводства прямо пропорционально концентрации радионуклидов во внешней среде, но изменяется от многих факторов, среди которых важное значение имеет физико-химическое состояние радионуклидов.

Поэтому данный вид прогноза следует считать ориентировочным. Более надежный прогноз накопления радионуклидов в продукции животноводства можно дать, скармливая

животным образцы кормов, полученных по методу проростков в лабораторных условиях. Проведение таких работ особенно актуально после новых выпадений радионуклидов, когда еще не известно, в какой форме они находятся, и не установлены особенности и закономерности их поведения в системе «почва — растения — организм животных».

В условиях длительного выпадения радионуклидов происходит смешанное загрязнение кормов (внешнее воздушное и внутренне корневое). В этом случае для прогнозирования загрязненности продукции можно использовать следующую формулу:

$$C_i = K_{\text{п}}F_{\text{п}} + K_{\text{в}}F_{\text{в}},$$

где C_i — содержание стронция-90 или цезия-137 в рационе, молоке, мясе, $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{в}}$ — содержание радионуклидов в почве и интенсивность их выпадений соответственно, $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{в}}$ — соответственно почвенный и воздушный коэффициенты перехода, $(K_{\text{п}}/\text{кг})/(K_{\text{п}}/\text{м}^2)$ и $(K_{\text{в}}/\text{кг})/(K_{\text{в}}/\text{м}^2)$ в месяц или в размерности $(\text{Бк}/\text{кг})/(\text{Бк}/\text{м}^2)$ и $(\text{Бк}/\text{кг})/(\text{Бк}/\text{м}^2)$ в месяц.

Следует отметить, что параметры, входящие в рассматриваемые модели, в зависимости от экологических и физиологических факторов существенно изменяются, поэтому любой прогноз поступления радионуклидов почвенным, аэральным или одновременно двумя этими путями в биологические цепи следует оценивать лишь как ориентировочный.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОРМОВЫХ УГОДИЙ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ

Использование загрязненных кормовых угодий следует рассматривать в тесной связи с радиационной обстановкой на сенокосах и пастбищах. Использование кормовых угодий может существенно различаться при выпадении короткоживущих, долгоживущих радионуклидов или их смеси. При выпадениях короткоживущих радионуклидов наибольшую опасность представляют радионуклиды йода, и прежде всего йод-131. Поступление его в рацион животных, молоко, мясо, яйцо зависит от сезона, пастбищного периода и состояния лугов. В период активной вегетации растений и пастбищного

содержания животных радиоактивные выпадения представляют повышенную опасность по сравнению с периодом стойлового содержания животных.

При однократном поступлении короткоживущих радионуклидов на луга следует прекратить выпас животных и перевести их на стойловое содержание. Кормление следует проводить ранее запасенными кормами или кормами, заготовленными на незагрязненной территории.

Траву кормовых угодий, загрязненную короткоживущими радионуклидами, можно использовать для производства сена и силоса, которые следует подвергнуть перед скармливанием выдержке в течение 1,5...2 мес. После распада короткоживущих радионуклидов указанные корма можно использовать для кормления животных.

Скашивание и уборка трав через 10 сут. после однократного аэрального загрязнения лугов и пастбищ позволяют удалить с растениями до 50% ^{90}Sr и ^{137}Cs , выпавших на эти угодья. Поскольку травы естественных лугов накапливают в 5...30 раз больше радионуклидов, чем культурные растения, использование первых, выращенных на почвах с повышенным содержанием радионуклидов, желательно сократить до минимума или исключить полностью их использование в рационе животных. Обработка естественных лугов и посевов многолетних или других кормовых культур позволяет в отдельных кормовых продуктах уменьшить содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в 10...100 раз. Рациональная кормовая база должна строиться на преимущественном производстве кормов, получаемых с пахотных земель, и сведении к минимуму использования естественных сенокосов и пастбищ.

Убранные после выпадения радиоактивных веществ травы, содержат, как правило, более высокие количества радионуклидов, чем отрастающая на кормовых угодьях отава, так как аэральное загрязнение растений во много раз превышает корневое. При выпадении радионуклидов на сельскохозяйственные угодья в период пастбищного содержания животных овцеводство и скотоводство окажутся в более неблагоприятных условиях, чем свиноводство и птицеводство, так как свиней и птиц содержат в помещениях и кормят концентратами.

После прекращения выпадения радиоактивных осадков основное внимание должно быть уделено мероприятиям по снижению повторного аэрогенного загрязнения растений и корневого поступления радионуклидов в вегетативную часть растений. Это достигается путем рациональной организации производства кормов и специального составления рационов, с учетом видовых, возрастных, физиологических и производственных особенностей животных.

В условиях высокой степени радиоактивного загрязнения территории использование кормов с естественных, неулучшенных кормовых угодий должно быть сведено к минимуму. Основное их количество должно производиться на пашне или на окультуренных лугах. Коренное улучшение сенокосов и пастбищ с глубокой вспашкой, с полным оборотом пласта, внесением полных доз минеральных удобрений и посевом злаковых трав приводит к снижению содержания цезия-137 в кормах, получаемых с этих угодий, в 10 и более раз.

Накопление радионуклидов в сельскохозяйственных культурах существенно различается для различных почвенно-климатических зон и почв различного механического состава. Для одного и того же типа почв в зависимости от механического состава накопление радионуклидов изменяется от 1,5 до 7 раз. Максимальные значения коэффициентов накопления определены для торфяно-болотных почв и дерново-подзолистых почв легкого механического состава — песчаных и супесчаных (такие почвы преобладают в Брянской и Калужской областях). Минимальные коэффициенты накопления определены для более тяжелых по механическому составу почв. Для таких почв накопление радионуклидов в растениях происходит в 1,1...3 раза медленнее по сравнению с легкими почвами. На серых лесных почвах, а также на оподзоленных и выщелоченных черноземах (Тульская и Орловская области) накопление цезия-137 растениями в 4...5 раз ниже по сравнению с легкими по механическому составу почвами. Однако следует помнить, что на эти показатели большое влияние оказывает еще и режим увлажнения почв, в результате чего содержание радионуклидов в получаемых кормах может различаться еще больше. Например, коэффициент перехода на суходольном лугу с темно-серой лесной суглинистой

почвой равен 0,64, а на лугу переходного торфяника с перегнойно-торфяной почвой он более чем в 100 раз выше и равен в среднем 68,2. Следовательно, при формировании кормовой базы необходимо учесть особенности почв.

Мероприятия по снижению поступления радионуклидов в кормовые культуры. Кормопроизводство в загрязненных районах прежде всего должно обеспечить получение кормов с минимальным содержанием радионуклидов. Это важнейший и зачастую решающий фактор в снижении накопления радионуклидов в продукции растениеводства.

В настоящее время сельскохозяйственной агроэкологией разработана система довольно эффективных мероприятий, позволяющих существенно снизить накопление радионуклидов в кормах и другой продукции, получаемой на загрязненных территориях. Большой вклад в это внесли сотрудники Всероссийского научно-исследовательского института сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, возглавляемого академиком РАСХН Р. М. Алексахиним, а также Академии аграрных наук Республики Беларусь под руководством академика ААН РБ И. М. Богдевича. Основой данного раздела стали работы этих коллективов ученых.

Комплексная система мер включает в себя проведение организационных мероприятий и мероприятий, направленных на снижение корневого поступления в растения радионуклидов.

Организационные мероприятия носят долговременный характер и включают в себя проведение обследования загрязненных сельскохозяйственных угодий и личных подсобных хозяйств, инвентаризацию угодий по плотности загрязнения и прогнозирование накопления радионуклидов в кормах; формируется структура радиационного контроля продукции.

На основании полученных данных производится корректировка структуры посевных площадей, изменение существующих севооборотов и ведение кормовых севооборотов с учетом типов почв, их агрохимических характеристик, режима увлажнения и радиоактивного загрязнения, планируются мероприятия по улучшению кормовых угодий и проводится экономическая оценка.

Мероприятия по снижению концентрации радионуклидов в растениях при корневом их поступлении разделяют на две группы: традиционные в растениеводстве приемы, направленные на повышение плодородия почвы, урожайности и качества продукции; специальные приемы, направленные на снижение накопления радионуклидов в продукции растениеводства.

Традиционные агротехнические приемы включают: вспашку загрязненной почвы с оборотом пласта или отвальным плугом; подбор культур и сортов растений с наименьшим накоплением радионуклидов; применение приемов прополки, снижающих вторичное загрязнение; перевод естественных кормовых угодий в кормовой севооборот; поверхностное улучшение кормовых угодий; коренное улучшение природных сенокосов и пастбищ; известкование кислых почв, внесение двойных доз калийных и фосфорных удобрений, внесение органических удобрений (40 т/га и более) и микроудобрений.

Специальные защитные мероприятия включают в себя применение высоких доз калийных удобрений; внесение глинистых минералов и местных глин для увеличения емкости поглощения почвой радиоцезия и снижения его биологической подвижности.

Специальные технологические приемы включают применение приемов уборки урожая, снижающих вторичное загрязнение (уборка зерновых прямым комбайнированием, использование высокопроизводительных машин и т. д.); промывку, сортировку и первичную очистку плодоовощной продукции и корнеплодов; переработку продукции с целью снижения содержания радионуклидов.

Агротехнические мероприятия. Обработка почв. Система обработки почв в зоне радиоактивного загрязнения направлена на снижение накопления радионуклидов в урожае, уменьшение эрозионных процессов и снижение времени воздействия излучения на работающих в поле.

Мелиоративная глубокая вспашка, которая в наибольшей степени снижает поступление радионуклидов в растения (до 5...10 раз), возможна на почвах с мощным гумусовым (торфяным) слоем и в условиях Беларуси и российского Нечерноземья имеет ограниченное применение. Выполняют

ее плантажными, болотными или специальными одноярусными плугами с предплужниками. На минеральных почвах верхний слой 8...10 см укладывается прослойкой по дну борозды глубиной 27...40 см, а чистый от радионуклидов слой перемещается поверх его без оборота или с оборотом. По плугу многолетних трав для проведения такой вспашки необходима предварительная разделка дернины, лучше всего фрезерование на глубину слоя загрязнения.

Схема такой вспашки может быть использована на вновь осваиваемых землях и на глубоко залежных торфяниках с выполненной на них после аварии неглубокой обработкой, т. е. когда радионуклиды распределены в слое 0...25 см. Но при этом должна быть увеличена до 50...60 см общая глубина вспашки. Специальная глубокая вспашка — мероприятие разовое и последующие обработки проводятся таким образом, чтобы их глубина была меньше глубины расположения заделанного загрязненного слоя.

На легких песчаных и супесчаных почвах с уровнем загрязнения менее 15 Ки/км² (555 кБк/м²) по ¹³⁷Cs и менее 1 Ки/км² (37 кБк/м²) по ⁹⁰Sr целесообразна система минимальной обработки. Вспашка необходима только на задернованных почвах, а также под пропашные культуры (картофель, корнеплоды) при внесении высоких доз органических удобрений.

При высокой плотности загрязнения радионуклидами (15...40 Ки/км² или 555...1480 кБк/м²; по ¹³⁷Cs и 1...3 Ки/км² или 37...111 кБк/м² по ⁹⁰Sr) рекомендуется комбинированная система обработки почвы. Она включает чередование минимальных обработок с ярусной отвальной вспашкой 1...2 раза в севообороте при одновременной заделке в подпахотные слои больших доз органических удобрений и сидератов. Глубина ярусной вспашки не превышает мощности пахотного горизонта. Одновременно выполняется предпосевная обработка.

Посев зерновых, зернобобовых и крестоцветных культур должен быть особо качественным, на строго заданную глубину с равномерным распределением по площади питания. При этом локальное внесение минеральных удобрений является предпочтительным. Повышение эффективности и уменьшение

потерь удобрений обеспечиваются при закладке их на глубину 5...9 см с боковой ориентацией относительно рядков семян в пределах 3...4 см.

Коренное улучшение является наиболее эффективным способом снижения поступления радионуклидов из почвы в луговые травы малопродуктивных естественных кормовых угодий. Первичную обработку дернины осуществляют тяжелыми дисками в два-три следа. Слабозадерненные луга пахут обычными плугами на глубину 18...20 см, а сильнозадерненные и луга на торфяно-болотных почвах — кустарниково-болотным плугом на глубину 30...35 см, а при мощном торфяном слое — до 40...45 см.

Коренное и поверхностное улучшение луговых угодий — эффективная мера, позволяющая не менее чем вдвое уменьшить поступление радионуклидов в травы.

Подбор кормовых культур. Многолетние травы сенокосов и пастбищ отличаются наибольшей способностью аккумулировать ^{137}Cs и ^{90}Sr . Осоково-злаковые и, особенно, осоковые травы на постоянно переувлажненных почвах накапливают ^{137}Cs в 5...100 раз больше, чем злаковые травы из ежи сборной и мятлика лугового. Различия в накоплении ^{90}Sr также существенны, по степени уменьшения поступления радионуклида они располагаются в следующем порядке: разнотравье, осоки, ежа сборная, мятлик. Среди злаковых многолетних трав по накоплению ^{137}Cs установлен следующий убывающий ряд: костер безостый, тимофеевка, ежа сборная, овсяница, мятлик луговой, райграс пастбищный. Накопление ^{137}Cs на единицу сухого вещества однолетних полевых культур уменьшается в следующем порядке: зерно люпина, зеленая масса пелюшки, редьки масличной и рапса, зерно гороха и вики, семена рапса, зеленая масса гороха, вики, ботва свеклы, солома ячменя, овса, озимой ржи, озимой пшеницы, зерно кукурузы, овса, озимой ржи, озимой пшеницы.

Убывающий ряд культур по накоплению ^{90}Sr существенно отличается от такового по ^{137}Cs : клевер, горох, рапс, люпин, однолетние бобово-злаковые смеси, разнотравье суходольных сенокосов и пастбищ, многолетние злаковые травы, солома ячменя, солома овса, зеленая масса кукурузы и ози-

мой ржи, свекла кормовая, зерно ячменя, овса, озимой ржи, картофель.

Отмечены различия в накоплении радионуклидов, связанные с сортовыми особенностями культур. Сорты интенсивного типа, потребляющие значительные количества питательных веществ, отличаются повышенным накоплением радионуклидов (сорта ячменя: Березинский, Роланд, Селянин, Верас, картофель Орбита). Минимальное загрязнение клубней картофеля ^{90}Sr наблюдается при возделывании ранних и среднеспелых сортов картофеля Аксамит, Альтаир, Санта и Синтез. По отношению к ^{137}Cs эти различия незначительны.

Таким образом, путем подбора кормовых культур и использования их сортовых особенностей можно без внесения каких-либо дополнительных затрат существенно снизить содержание радионуклидов в рационе животных.

Известкование кислых почв. Внесение извести является эффективным приемом снижения поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в растения и одновременного существенного увеличения урожайности.

Установлено, что внесение извести в дозе, соответствующей полной гидролитической кислотности, снижает содержание радионуклидов в продукции растениеводства в 1,5...3 раза (иногда до 10 раз) в зависимости от типа почв и исходной степени кислотности. Минимальное накопление радионуклидов наблюдается при оптимальных показателях реакции почвенной среды (рН в К1), которые для дерново-подзолистых почв в зависимости от гранулометрического состава составляют: глинистые и суглинистые — 6,0...6,7; супесчаные — 5,8...6,2; песчаные — 5,6...5,8.

На торфяно-болотных и минеральных почвах сенокосов и пастбищ оптимальные параметры составляют соответственно 5,0...5,3 и 5,8...6,2. Исходя из этих данных видно, что количество вносимой извести зависит от исходной кислотности и типа почв. В случае, когда разовая ее доза превышает 8 т/га, известь вносится в два приема: 0,5 дозы под вспашку и 0,5 дозы под культивацию. Доза менее 8 т/га вносится единовременно под глубокую культивацию. На сенокосах и пастбищах известь вносится под предпосевную культивацию, при их перезалужении или коренном улучшении.

При плотности загрязнения ^{137}Cs свыше 370 Бк/м^2 известкование почв проводят один раз в три года, а при меньших плотностях загрязнения — один раз в пять лет.

Применение удобрений. Внесение удобрений позволяет, с одной стороны, снизить накопление радионуклидов в продукции, а с другой стороны, обеспечивает повышение урожайности сельскохозяйственных культур. Для этих целей используют все виды удобрений. Применение органических удобрений в обычных дозах уменьшает переход радионуклидов из почвы в растения на 15...30%.

Применение калийных удобрений в высоких дозах обеспечивает антагонизм катионов калия по отношению к радиоцезию, что снижает его накопление в растениях, особенно на бедных калием дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах (K_2O вносят в расчете более 240 кг/га). Однако это мероприятие проводят в первые годы после радионуклидного загрязнения почв. В последующие годы калийные удобрения вносят в обычном количестве. По мере повышения плотности загрязнения почв радионуклидами потребность в дополнительных дозах калия увеличивается. Одновременно калийные удобрения снижают накопление и ^{90}Sr в растениях. Особенно эффективны повышенные дозы калийных удобрений под многолетние травы, корнеплоды и картофель. В опытах на супесчаных почвах с плотностью загрязнения стронцием-90 $0,3...0,5 \text{ км/км}^2$ повышение дозы калия со 120 до 180 кг/га сопровождалось снижением накопления стронция-90 в клубнях различных сортов картофеля до 33...57% при одновременном повышении урожая $20...50 \text{ ц/га}$.

Калийные удобрения вносят в дозах, которые обеспечивают прибавку урожая, в зависимости от типа почв и содержания в них обменного калия. На почвах с избыточным содержанием обменного калия (более $300 \text{ мг/кг K}_2\text{O}$ на минеральных и 1200 мг/кг на торфяно-болотных почвах) калийные удобрения не применяют.

Фосфорные удобрения снижают поступление в растительную продукцию стронция-90 и цезия-137, особенно на почвах с низким содержанием подвижных фосфатов. На почвах с высоким содержанием подвижных фосфатов (более 250 мг

P_2O_5 на 1 кг почвы на минеральных и 1000 мг/кг на торфяно-болотных почвах) фосфорные удобрения не вносят.

Важная роль отводится регулированию азотного питания растений. При недостатке доступного азота в почве снижается урожай и концентрация радионуклидов в продукции несколько повышается. С другой стороны, повышенные дозы азотных удобрений усиливают накопление радионуклидов в растениях. Расчет доз азотных удобрений необходимо вести исходя из потребности растений на планируемый урожай.

На посевах злаковых многолетних трав эффективно применение бактериальных препаратов на основе ассоциативных штаммов азотфиксирующих бактерий в дозе 1 кг/га, выпускаемых БелНИИПА, что позволяет получать прибавку урожая, равноценную внесению на гектаре посева 30...60 кг азота минеральных удобрений и снизить загрязнение урожая цезием-137 на 20...30%. Применение бактериальных удобрений возможно как при предпосевной обработке семян, так и для обработки почвы в начальные фазы вегетации растений.

Микроудобрения также вносят вклад в снижение поступления радионуклидов в сельскохозяйственные культуры, хотя механизм их действия изучен недостаточно. При внесении микроудобрений меди и цинка (4,5 кг/га) в почву под залужение или при ежегодных некорневых подкормках снижается поступление радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в сено тимофеевки луговой в пределах 20...40%. Однако внесение микроэлементов в почву целесообразно в форме хлористого калия с добавками меди и цинка только на почвах первой группы обеспеченности: меди — менее 1,5, цинка — 3,0 мг/кг на минеральных и соответственно менее 5,0 и 9,0 мг/кг на торфяно-болотных.

Особенности использования осушенных земель и эксплуатации мелиоративных систем. Гидротехническая мелиорация является радикальным способом снижения поступления радионуклидов в растениеводческую продукцию на переувлажненных землях. За счет осушения земель можно снизить загрязненность продукции в 5...10 раз.

Осушенные земли отличаются от автоморфных тем, что на них поступление радионуклидов в растительную продукцию сильно зависит от положения уровня грунтовых вод (УГВ). Минимальное загрязнение растительной продукции на таких

почвах достигается при уровне грунтовых вод на глубине 90...120 см от средней отметки поверхности поля. Подъем УГВ на глубину 40...50 см от поверхности почвы приводит к увеличению поступления радионуклидов в растения в 5...20 раз, а его снижение до 150...200 см — в 1,5...2,0 раза. УГВ должен быть таким, чтобы водопотребление основных видов растений на 30% обеспечивалось из подпахотного слоя почвы.

На орошаемых загрязненных землях нельзя допускать превышения влажности пахотного слоя и образования поверхностного стока. Орошение необходимо производить малыми нормами: 100...150 м³ на 1 га. Даже кратковременное переувлажнение земель увеличивает поступление радионуклидов в растения, поэтому на пойменных землях целесообразно проводить засыпку рытвин, вымоин и понижений.

Коренное улучшение сенокосов и пастбищ. Наиболее надежным способом снижения перехода радионуклидов в траву сенокосов и пастбищ является их коренное улучшение с проведением комплекса агрохимических мероприятий (известкование кислых почв, внесение органических удобрений и повышенных доз калийных и фосфорных удобрений). Внесение минеральных фосфорно-калийных удобрений снижает накопление радиоцезия в траве в 1,5...5 раз, а внесение азота, наоборот, увеличивает его.

Перепахка естественных лугов, загрязненных долгоживущими радионуклидами, с последующим искусственным залужением снижает радиоактивное загрязнение кормов и продукции животноводства в 2...5 раз.

Подбор видового и сортового состава трав снижает содержание ¹³⁷Cs в 1,5...3 раза. При качественном проведении всех технологических мероприятий по залужению и созданию сеянных травостоев на естественных кормовых угодьях (внесение извести 6 т/га, вспашка, внесение калийных и фосфорных удобрений, дискование, посев злаковых трав) накопление ³⁷Cs в травостое снижается в 2...10 раз.

Перевод естественных лугов в культурные сенокосы и пастбища с выполнением всего комплекса мер по их улучшению позволяет снизить накопление цезия-137 в получаемой растительной продукции в 11...17 раз (Н. А. Корнеев, А. Н. Сироткин).

НОРМИРОВАНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНИЗМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ

Проблема нормирования поступления радионуклидов в воду, почву, корма и продукцию животноводства — одна из наиболее важных в современной радиоэкологии. Первая попытка рассчитать предельно допустимое содержание радионуклидов стронция и йода в траве для лактирующих коров была предпринята Чемберленом, Мартином и Расселлом в 1955 г. Позднее решению указанной задачи были посвящены исследования Гарнера, Л. А. Булдакова, Ю. И. Москалева, Б. Н. Анненкова, А. И. Скрябина, Н. А. Корнеева и Н. И. Бурова. Для решения вопросов нормирования используют данные по миграции радионуклидов по биологическим цепям и обмену их в организме животных разного вида и возраста.

При расчете средней допустимой концентрации (СДК) радионуклидов и предельно допустимого содержания (ПДС) водорастворимых форм радионуклидов в кормах и рационах животных исходят из предела годового поступления (ПГП) и производной от него величины — предела допустимого поступления (ПДП) их в рацион человека, определенного «Нормами радиационной безопасности» (НРБ). После Чернобыльской катастрофы продукция, получаемая на загрязненной территории, существенно превышала допустимые концентрации, определяемые НРБ-76/87. В связи с этим были приняты «Временно допустимые уровни содержания ^{137}Cs и ^{134}Cs , а также ^{90}Sr в пищевых продуктах» (ВДУ), которые были существенно завышены. В последующем, по мере снижения содержания радионуклидов за счет их физического распада, перехода в связанное с частицами почвы состояние, проведения контрмер по уменьшению радионуклидной загрязненности сельскохозяйственной продукции и других причин, ВДУ пересматривались в сторону снижения допустимых уровней содержания радионуклидов в продуктах питания. В связи с этим и предельно допустимое содержание радионуклидов в рационе животных существенно отличалось в разные годы после Чернобыльской катастрофы. Для расчета допустимого содержания радионуклидов в рационе животных необходимо

пользоваться всегда действующими нормативными документами, стремясь однако добиваться производства продукции с минимально возможным их содержанием.

В России в 1996 г. утверждены новые «Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов», которые вступили в силу с апреля 1998 г. (СанПин 2.3.2. 560-96). Этот документ, впервые в послеаварийный период, вводит в России жесткие требования к радиационной безопасности продуктов питания (табл. 18). В связи с этим все рекомендации по нормированию рациона животных, разработанные в соответствии со старыми ВДУ, должны быть пересмотрены. Однако расчет допустимого содержания радионуклидов в кормах вполне может проводиться по разработанным ранее формулам, представленным в работах Н. А. Корнеева и А. Н. Сироткина.

Таблица 18

Предельно допустимые нормы содержания радионуклидов в продуктах (СанПин-96)

Группы продуктов	Допустимое содержание радионуклидов, не более Бк/кг		Примечание
	стронций-90	цезий-137	
Мясо, в том числе полуфабрикаты	50	160	Мясо без костей Оленина Мясо диких животных без кости Кости всех видов
	80	250	
	100	320	
	200	160	
Птица (все виды)	80	180	В том числе дичь
Яйца и продукты их переработки	50	80	Бк/кг
Молоко и сливки сырые, кисломолочные продукты, творог	25	50	Бк/л, Бк/кг
Молоко сухое и концентрированное	200	360	Бк/кг
Сыры	100	50	
Рыба живая, охлажденная	100	130	
Рыба сушеная, вяленая	200	260	
Сахар	100	140	

Продолжение табл. 18

Группы продуктов	Допустимое содержание радионуклидов, не более Бк/кг		Примечание
	стронций-90	цезий-137	
Мед	80	100	
Масло коровье	60	100	
Жир:			
говяжий, свиной, бараний	80	60	
других животных	50	100	
Масло растительное (все виды)	80	60	
Семена масличных культур	90	70	
Флодоовощная продукция:			
Свежие и свежемороженые овощи:			
картофель	60	320	
овощи, бахчевые	50	130	
фрукты, ягоды,	50	40	
виноград, грибы	50	500	
Сухие овощи:			
картофель	240	1200	
овощи, бахчевые	240	600	
фрукты, ягоды,	240	200	
виноград, грибы	250	2500	
Орехи	100	200	
Чай	100	400	
Другие продукты:			
Изоляты, концентраты и гидролизаты растительных белков, мука и пищевой прот из бобовых, масличных и др. культур	100	80	
Отруби пищевые из:			
зерновых культур	140	80	Бк/кг, зерновые
бобовых культур	100	60	Бк/кг, зернобобовые

Расчет СДК и ПДС радионуклидов в кормах и рационах животных проводят при условиях производства и потребления фуража животными, мяса и молока отдельными лицами из населения категории Б с одним продуктом и с двумя и более компонентами рациона. При этом необходимо учесть суточное потребление молока и мяса населением (0,5 и 0,2 кг). При нормировании ^{90}Sr необходимо учесть, что он концентрируется в костной ткани и может при выварке переходить в бульон. В среднем, при поступлении с мясом ^{90}Sr потребление продукта принимают равным 0,08 кг мышц и 0,03 кг костной ткани. Доля вклада с молоком ^{90}Sr и ^{137}Cs составляет 25,47 и 21%, а с мясом (мышцы) — 5% ^{90}Sr и 23% ^{137}Cs . В этом случае СДК радионуклида в любом продукте определяют из формулы

$$\text{СДК} = \text{ПДП} \cdot C \cdot M,$$

где СДК — средняя годовая допустимая концентрация исследуемого радионуклида в пищевом продукте, Бк/кг; ПДП — предел допустимого поступления этого радионуклида в рацион человека, Бк/рацион; C — доля радионуклида, вносимая с продуктом в рацион человека; M — масса нормируемого продукта в рационе, кг.

Зная СДК радионуклидов в указанных продуктах и переход радионуклидов из рациона животных в эти продукты, определяют ПДС радионуклидов в рационе лактирующих коров. Расчеты производят по формуле

$$\text{ПДС} = \text{СДК} \cdot 100/K,$$

где ПДС — предел допустимого содержания нормируемого радионуклида в рационе коровы, Бк; СДК — средняя допустимая концентрация этого радионуклида в молоке, Бк/л; K — величина перехода данного радионуклида из рациона коровы в 1 л молока, % суточного поступления.

При хроническом поступлении ^{90}Sr , ^{131}J и ^{137}Cs коровам и частичном вкладе радионуклидов с молоком в рацион человека поступление их с кормом и водой животным в среднем не должно превышать 17, 15 и 37 кБк/сут. В случае разового поступления радионуклидов лактирующим коровам среднее ПДС ^{90}Sr может быть увеличено на 10%, а ^{137}Cs — в 3,5 раза.

Таблица 19

Влияние содержания Са в рационе коров на секрецию ^{90}Sr с молоком в % от суточного хронического поступления (Н. А. Корнеев, А. Н. Сироткин)

Количество Са, г	Суточный удой, л	Выделение ^{90}Sr в 1 л молока	Выделение ^{90}Sr с удоем
45 (нормальное)	3,0	$0,17 \pm 0,04$	$0,51 \pm 0,01$
10 (дефицитное)	3,5	$1,15 \pm 0,25$	$6,15 \pm 1,5$
50 (нормальное)	4,0	$0,15 \pm 0,01$	$0,55 \pm 0,02$

При поступлении ^{90}Sr , ^{131}J и ^{137}Cs в рацион человека лишь с одним молоком их ПДС в рационе коров, получавших радионуклиды хронически, не должно превышать соответственно 67, 33 и 174 Бк, а однократно — 70, 33 и 610 кБк. ПДС ^{90}Sr и ^{137}Cs в рационе лактирующих коров зависит от длительности поступления их в организм, а для ^{90}Sr еще и от уровня кальциевого питания (табл. 19).

Расчет ПДС радионуклидов в рационе мясопродуктивного скота производится по уравнению

$$\text{ПДС} = \frac{\text{ПДП} \cdot K \cdot 100}{M \cdot C \cdot P},$$

где ПДС — предел допустимого содержания исследуемого радионуклида в рационе животного, Бк; ПДП — предел допустимого поступления этого радионуклида с рационом человеку, Бк; K — доля данного радионуклида, вносимая в рацион человека с продуктом; M — масса исследуемого продукта в рационе, кг; C — концентрация радионуклида в продукте, % суточного поступления на 1 кг; P — выварка радионуклида из кости, %.

Всегда следует помнить, что переход радионуклидов из рациона в организм животных сильно зависит от их вида и возраста, поэтому в рационе молодых животных ПДС ^{137}Cs должно быть в 10 раз ниже, чем у взрослых.

В рационе мясопродуктивных животных, получавших ^{90}Sr и ^{137}Cs хронически, ПДС радионуклидов является более жестким, чем при разовом или кратковременном поступлении этих радионуклидов в организм.

Зная СДК стронция-90 в кормах при условии непрерывного поступления его из почвы в растения корневым путем,

можно оценить предел допустимого уровня (ПДУ) содержания этого радионуклида в почве угодий, предназначенных для выращивания кормовых культур.

Для выражения зависимости между содержанием ^{90}Sr в отдельных кормах, рационе животных и уровнем загрязнения почвы используют коэффициент перехода этого радионуклида из почвы в растения. Определяют ПДУ ^{90}Sr в почве по отношению

$$Q = A/K_{\text{п}},$$

где Q — плотность загрязнения почв стронцием, Бк/км²; A — концентрация стронция-90 в растениях (рационах), выраженная в стронциевых единицах; $K_{\text{п}}$ — коэффициент перехода стронция-90 из почвы в растения (рацион).

В почве ПДУ стронция-90 определяется биологическими особенностями растений, обуславливающими разный вклад радионуклида с конкретным кормовым продуктом в рацион, возрастом животных, содержащихся в таких угодьях, и направлением их продуктивности.

Для производства кормов, включаемых в аналогичные рационы мясному скоту, допустимый уровень загрязнения серых лесных почв стронцием-90 колеблется от 290 до 2180 ГБк/км², а ^{137}Cs — от 2520 до 1760 ГБк/км². Однако расчет доз внешнего облучения отдельных лиц — из населения, работающих с животными на лугах, поверхностно загрязненных ^{137}Cs , показал превышение дозы, установленной НРБ-96, в 12...84 раза. В связи с этим пределы допустимого уровня цезия-137 в почве должны быть уменьшены в 12...84 раза и составлять 190...220 ГБк/км². В случае равномерного распределения ^{137}Cs в пахотном слое (0...20 см) почвы искусственного луга, когда часть энергии гамма-излучения поглощается слоем почвы (коэффициент ослабления излучения равен 3), допустимое содержание в ней радионуклида может быть увеличено в 3 раза (555...666 МБк/км²).

В зависимости от возраста животных, направления их продуктивности, типа питания и вида угодья, на котором выращиваются корма, ПДС радионуклидов в рационе существенно изменяется. Одновременно изменяются и требования, предъявляемые к плотности загрязнения почвы, что имеет важное практическое значение, так как дает возможность

определить структуру кормовых севооборотов и размещение культур в них, что позволяет наиболее рационально использовать кормовые угодья, подвергшиеся радиоактивному загрязнению.

Представленные расчеты СДК, ПДС и ПДУ в кормах, рационах и почве произведены при условии поступления во внешнюю среду одного радионуклида. В случае попадания в почву, корма и организм сельскохозяйственных животных двух и более радионуклидов необходимо пользоваться рекомендацией НРБ-96. Согласно этой рекомендации поступление радионуклидов в организм человека должно быть уменьшено, если каждый из трех или более критических органов получает свыше половины соответствующего предела дозы (ПД). Указанное положение следует учитывать и при нормировании содержания радионуклидов в кормах и рационах сельскохозяйственных животных.

Разрабатываемые нормы содержания радионуклидов в почве и кормах не могут быть едиными. Эти нормы должны устанавливаться для конкретных условий с учетом особенностей радиационных ситуаций, природно-климатических зон, ведения кормопроизводства и животноводства, видовых, возрастных, физиологических особенностей животных и других факторов.

РЕЖИМ ПИТАНИЯ И СОДЕРЖАНИЯ ЖИВОТНЫХ ПРИ РАДИОАКТИВНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ СРЕДЫ

Особенности ведения животноводства в период выпадения радиоактивных осадков. В период выпадения радиоактивных осадков в первую очередь необходимо провести мероприятия, направленные на снижение дозовых нагрузок на человека, а затем — на сохранение поголовья сельскохозяйственных животных и их продуктивности. Для этого людей укрывают в убежищах, подвалах, подпольях или в жилых закрытых помещениях. Длительность непрерывного пребывания людей в укрытиях должна быть не менее 4...6 суток, при этом особенно опасны первые двое суток, когда еще не распались короткоживущие радионуклиды.

Животных переводят на стойловое, безвыгульное содержание в помещения с наименьшим радиоактивным загрязнением. Продолжительность такого содержания определяется конкретной радиационной обстановкой. Животных кормят кормами из имеющихся запасов, а также привезенными с чистой территории. Из рациона исключают корма, загрязненные выше допустимого уровня. При ограниченном запасе чистых кормов можно уменьшить рацион до предела, позволяющего сохранить поголовье в течение критического периода. Если не удастся организовать регулярную дойку лактирующих животных, то следует сократить раздачу сочных кормов, а подсосный молодняк целесообразно подсадить к маткам. В зимних условиях рекомендуется использовать концентратный тип кормления и до минимума сократить использование сеного рациона из естественных трав.

К подстилке для всех видов животных предъявляются те же требования по уровню радиоактивного загрязнения, что и к кормам.

В первые 4...6 недель после выпадения радиоактивных осадков особую опасность представляют радиоизотопы йода, и прежде всего ^{131}I . Эти радионуклиды являются основным источником загрязнения кормов и молока животных.

В первый период после аварии на ЧАЭС до 50% радиоактивности приходилось на радиоизотопы йода. Период «йодной опасности» продолжался в пределах 2 мес. после аварии. В отдаленные сроки биологическую опасность стали представлять долгоживущие изотопы, главным образом ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Учитывая резко выраженную органотропность радиоактивных изотопов йода к накоплению в щитовидной железе, для защиты ее рекомендуется в первые недели давать всем животным препараты, блокирующие щитовидную железу, в частности йодистые, а также вводить в рацион кормовые культуры из семейства крестоцветных (капусту, брюкву, рапс), содержащих тиоцианат. Лактирующим коровам ежедневно дают препарат KI в дозе 10 г на голову, а козам — по 1 г KI. Введение в рацион животных препарата KI позволяет снизить выделение радиоактивного йода с молоком и его содержание в щитовидной железе животных. Это означает, что обогащение рациона животных стабильным йодом является не только

приемом ограничения поступления радионуклида в молоко, но и мерой профилактики от радиационного поражения.

Кроме того, нужно включать в рацион дойных и беременных животных наиболее «чистые» по радиоактивности корма, состоящие из сеяных злаковых трав, корнеклубнеплодов, зерна, защищенных от непосредственного загрязнения радиоактивными осадками. Зерно кукурузы, гороха, бобов, люпина можно подвергнуть очистке от радиоактивного загрязнения путем удаления пленок или створок. Установлено, что при скармливании таких кормовых культур выделение с молоком радиоактивных изотопов йода снижается в 2 раза.

При недостатке чистых кормов мясному скоту скармливают радиоактивный корм или выпасают на пастбище с наименьшей загрязненностью. Но на заключительных стадиях откорма, за 1...4 мес. до убоя животных переводят на чистые корма. Разработанные методики прижизненного определения содержания радионуклидов в мышечной ткани животных в условиях хозяйства позволяют достаточно точно определить продолжительность очистки и пригодность получаемого мяса в пищу.

При скармливании животным загрязненных кормов большое количество радионуклидов выделяется с навозом, поэтому следует проводить своевременную и тщательную уборку помещений.

При ведении животноводства на пострадавшей территории важнейшее внимание должно быть уделено обеспечению безопасности работников. В местах, разрешенных для ведения животноводства, радиационный фон не представляет прямой опасности для здоровья человека, однако необходимо защитить органы дыхания, пищеварения и кожные покровы работающих от радиоактивной пыли. Для этого используют индивидуальные средства противопылевой защиты (ватно-марлевые повязки, респираторы, халаты, куртки, комбинезоны, головные уборы), которые в конце работы тщательно стирают и сушат.

При использовании техники работу организывают таким образом, чтобы избежать взаимного запыления. Кабины машин должны быть герметизированы. Все свежие фрукты и овощи перед употреблением в пищу тщательно промывают

водой и желателно после этого удалить верхний слой. Прием пищи проводят в специально отведенных местах, перед этим снимая спецодежду и тщательно соблюдая правила личной гигиены.

Наиболее сложно организовать ведение животноводства при выпадении радиоактивных осадков в самом начале пастбищного периода, поскольку ранее заготовленные чистые корма уже на исходе. Эта ситуация как раз и произошла при чернобыльской трагедии.

После прекращения радиоактивных выпадений в хозяйстве следует оценить загрязнение сельскохозяйственных угодий и составить план землепользования с учетом плотности радиоактивного загрязнения полей и пастбищных угодий.

После распада изотопов йода основную опасность продолжают представлять цезий-137 и стронций-90. В первый год после выпадений корма загрязнены этими радионуклидами в основном за счет внешнего (первичного и вторичного) загрязнения. Использование таких кормов производят по схеме, описанной ранее, стараясь свести к минимуму вторичное их загрязнение.

Особенности ведения животноводства в период преимущественно корневого поступления радионуклидов в корма. В период корневого поступления долгоживущих радиоактивных изотопов в растения рацион животных нормируют по ^{137}Cs или по ^{90}Sr .

Снижение поступления радионуклидов в организм животных может быть достигнуто путем рациональной организации кормовой базы.

Поскольку различные растения по-разному накапливают радионуклиды из почвы, изменяя состав рациона, можно добиться существенного снижения поступления радионуклидов в организм животных и получаемую продукцию (в 2...5 раз). При выпасе коров на скудном травостое происходит интенсивное заглатывание почвы, а следовательно, и инкорпорированных в ней радионуклидов. Вклад поступающих таким образом радионуклидов с почвой бывает соизмерим с их количеством в составе корма. Поэтому выпас коров можно проводить при высоте трав более 10 см. Перевод на стойловое или

стойлово-выгульное содержание коров позволяет исключить этот мощный дополнительный фактор загрязнения.

Выпас коров на удобренных пастбищах с высокой урожайностью трав позволят снизить на 50% содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в молоке по сравнению с его количеством при выпасе на неудобренных лугах.

В работах Н. А. Корнеева и А. Н. Сироткина было показано, что у 3...6-месячных телят, выпасаемых в течение 7...8 суток на искусственном лугу, концентрация ^{90}Sr в скелете оказалась в 3 раза ниже, чем в группе животных, выпасаемых на естественных пастбищах. Кормление лактирующих коров силосно-концентратным рационом снижает поступление ^{90}Sr в молоко в 5 раз, а ^{137}Cs — в 2 раза, в мышцы соответственно в 5 и 2 раза, чем потребление сеного рациона из кормов естественного луга. Скармливание коровам смешанного рациона из кормов искусственных кормовых угодий также снижает поступление радионуклидов в молоко и мышцы в 2...3 раза. В скелете ягнят, родившихся от овец, содержащихся на смешанном и концентратном рационах, накопление стронция и цезия было соответственно в 4,2 и 4,5 раза меньше, чем у ягнят, рожденных от овец, питавшихся сеным рационом.

Обычно данные о содержании радионуклидов в кормах приводят в расчете на естественную или сухую массу растений. Однако важно, чтобы концентрация радионуклидов в кормовых культурах оценивалась в расчете на кормовую или энергетическую единицу перевариваемой энергии и протеина.

Так, если в расчете на 100 г перевариваемого белка концентрация ^{90}Sr в отдельных кормовых продуктах различается примерно в 50 раз, то в расчете на одну кормовую единицу она уже может различаться в 100 раз. Увеличение в рационе концентратов и корнеклубнеплодов позволяет значительно снизить поступление радионуклидов в продукцию животноводства. При неоднородности загрязнения почв бобовые кормовые культуры целесообразно размещать на площадях с минимальной плотностью радионуклидов и повышенным естественным плодородием, поскольку они активнее накапливают ^{90}Sr .

Доля кормов, выращенных на почвах с высокой плотностью загрязнения ^{90}Sr , должна быть такая, чтобы она не

давала значительного вклада Са в рацион, а основную часть Са в рацион должны вносить корма с земель, характеризующихся низкой концентрацией ^{90}Sr . Рациональное размещение кормовых культур и составление рационов создают предпосылки для существенного снижения поступления ^{90}Sr в организм животных и продукты животноводства.

В качестве иллюстрации эффективности этих мероприятий можно привести результаты, полученные Н. А. Корневым, Н. И. Буровым, А. Н. Сиронкиным и др. Лактирующим коровам в рацион вводили люцерновое сено и муку из зерна овса, полученные на экспериментальных участках с плотностью загрязнения ^{90}Sr , равной 74 и 37 ГБк на 1 км². Одной группе коров в рационе ежедневно давали 8 кг люцернового сена, полученного на площади с загрязнением ^{90}Sr 75 ГБк/км², и 4 кг овсяной муки с участка, где плотность загрязнения составляла $37 \cdot 10^3$ ГБк/км². Для второй группы животных рацион составляли из тех же количеств люцернового сена и овсяной муки, но с участков, где содержание ^{90}Sr было соответственно $37 \cdot 10^3$ и 74 ГБк/км². Использование в рационе коров люцерны, выращенной на участке с низким содержанием ^{90}Sr , и зерна овса, полученного с участка с высокой плотностью загрязнения ^{90}Sr , способствовало уменьшению поступления этого радионуклида в рацион и молоко примерно в 18 и 16 раз соответственно по сравнению с вариантом, когда люцерна, включавшаяся в рацион животных, была получена на участке с высоким уровнем загрязнения, а овес — с участка, где содержание ^{90}Sr было относительно низким.

Применение приемов, ограничивающих поступление радиоактивных нуклидов из внешней среды в продукцию животноводства, изыскание путей и средств снижения проникновения их в молоко лактирующих животных приобретают особо важное практическое значение. Эта значимость обусловлена тем, что молоко и молочные продукты обеспечивают 70...100% поступления кальция, а с ним и стронция-90 в организм человека в разные периоды его жизни. Поиск решения данной задачи в радиозоологии может быть связан с увеличением содержания кальция в рационе лактирующих животных. Выбор этого профилактического средства обусловлен его доступностью и широким использованием в практике

кормления сельскохозяйственных животных. При нормальном уровне кальция в рационе эффект его против проникновения ^{90}Sr в молоко резко снижается. За нормальную физиологическую потребность в кальции у коров можно принять содержание его в рационе, равное 40...80 г. При содержании в рационе кальция ниже 40 г переход ^{90}Sr из корма в молоко увеличивается, а при 80...230 г — снижается в 8...11 раз. Поскольку дефицит кальция в рационе коров приводит к росту загрязнения молока ^{90}Sr , кормление таких животных необходимо производить по полноценным или обогащенным кальцием или минеральной подкормкой рационам. Это достигается введением в рацион менее загрязненных или незагрязненных кормов, содержащих высокие концентрации кальция (бобовые культуры), и минеральных подкормок. Выделение ^{90}Sr с молоком зависит не только от уровня кальциевого питания животных, но и от их продуктивности. Например, чем выше суточный удой коровы, тем меньше ^{90}Sr в молоке (это различие может достигать 15...20-кратного значения). Следовательно, в условиях хронического поступления ^{90}Sr в организм лактирующих коров для производства молока необходимо отбирать высокопродуктивных животных.

При размещении кормовых культур на загрязненных территориях важно учитывать агрохимические свойства почвы. Из легких по механическому составу и недостаточно обеспеченных Ca почв ^{90}Sr и ^{137}Cs поступают в растения в значительно больших количествах, чем из почв тяжелого механического состава и обеспеченных Ca. Очевидно, на территории, загрязненной указанными радионуклидами, в первом случае желательно размещать кормовые культуры, которые вносят небольшой вклад ^{90}Sr в рацион животных, а во втором — культуры, с которыми связано основное поступление ^{90}Sr в рацион животных. Так можно существенно снизить поступление радионуклидов из кормов в продукцию животноводства.

Уменьшение перехода радионуклидов из кормов в продукцию животноводства может достигаться изменением содержания и кормления животных. При повышенной плотности радиоактивного загрязнения кормовых угодий перевод продуктивных животных на стойловое содержание или ограничение времени выпаса их на загрязненных пастбищах

позволяют в несколько раз снизить поступление ^{90}Sr и ^{137}Cs в молоко и мясо. Фрезерование загрязненной почвы и посев трав обеспечивают снижение поступления ^{90}Sr из почвы в растения в 2 раза, вспашка плугами на глубину 25 см — в 3...4 раза.

При концентратном типе питания ^{90}Sr откладывается в костной ткани в 2 раза меньше, чем при смешанном рационе, и в 5 раз меньше, чем при сennom.

При питании животных сennым рационом с искусственных лугов коэффициенты перехода стронция из почвы в мясо существенно меньше, чем с естественных лугов. Причиной этого является меньшая загрязненность кормов, получаемых с пахотных земель. При прочих равных условиях с пахотных и вновь залуженных полей удается получить корма с удельной активностью в 2...18 раз ниже, чем с естественных лугов. Наибольшей способностью накапливать радиоцезий отличаются многолетние злаковые травы, наименьшей — кукуруза на силос и кормовая свекла.

Замена сена лугового, полученного на естественных не-улучшенных угодьях, сеном многолетних сеянных трав снижает содержание радиоцезия в рационе коров в 5 раз, а в молоке в 3 раза.

Наилучший тип использования естественных пастбищ — загонная пастьба совместно с подкормкой животных кормами с культурных угодий. Этот прием снижает содержание радиоцезия в молоке в 2 раза по сравнению с вольной пастьбой без подкормки. Заготовка сена на естественном лугу снижает переход цезия в молоко в 3 раза. Однако при плотности загрязнения свыше $370 \text{ Бк}/\text{м}^2$ невозможно получить пригодное в пищу молоко при использовании естественных пастбищ. В этом случае необходимо провести коренное улучшение кормовых угодий, организовав получение кормов на пахотных участках. Эта мера позволяет получить молоко, пригодное в пищу, на угодьях с плотностью загрязнения до $1295 \text{ Бк}/\text{м}^2$.

Концентрация радионуклидов в молоке находится в прямой зависимости от их содержания в суточном рационе и в обратной зависимости от продуктивности животных. Чем выше суточный удой, тем меньше концентрация радионуклидов в молоке.

Существенное повышение радионуклидов в молоке происходит в ранневесенний период, в начале выгона скота на пастбище. В этот период травостой слабый, загрязнен почвой и остатками прошлогодней травы, при поедании которой животные заглатывают много радиоактивной почвы. Аналогичная картина наблюдается при выпасе животных на скудном пастбище с выбитым травостоем и при выпасе крупных гуртов (по 200...250 животных). При крупных гуртах даже на хорошем травостое, животные копытами интенсивно загрязняют травостой частицами почвы, что особенно проявляется в периоды засухи и обильного увлажнения пастбищ. По этой причине в гурту не должно быть больше 120 голов коров. Выпас начинать лучше после отрастания травы на 12 см, а летом животных содержать в выгулах, при этом кормление проводят в кормушках скошенной травой. Проведение таких мероприятий позволяет снизить содержание радиоцезия в молоке более чем в 10 раз.

На загрязненных территориях с целью снижения накопления в растениях цезия-137 в почву вносят повышенное количество калийных удобрений. По этой причине корма с таких угодий сильно обогащены калием. С другой стороны, попадая в организм животных, калий выступает как антагонист натрия и активно выводит из организма животных этот жизненно важный элемент (аналогично тому, как при избытке кальция организм теряет фосфор). Поэтому во избежание нарушений водно-солевого обмена животные должны получать повышенное количество натриевой соли, лучше всего организовать к ней свободный доступ коров.

Организация достаточного водопоя скота имеет также важное значение, поскольку при нехватке в организме воды замедляется скорость выведения радионуклидов.

Разведение мясного скота на загрязненной территории намного проще. Связано это с возможностью двухэтапного кормления животных. На первом этапе животным скармливают загрязненные корма без особых ограничений. На втором, заключительном этапе их переводят на специально запасаемые чистые корма, т. е. на специально контролируемый по содержанию в нем радионуклидов рацион. Таким образом, происходит прижизненная очистка организма животных от

радионуклидов. При переводе животных на подобные рационы за 20...30 дней выводится половина радиоцезия, а через 2...3 месяца его концентрация в мышечной ткани снижается до 10 раз. Однако окончательно сроки очистки организма от радиоцезия зависят от исходной загрязненности им организма, от степени чистоты кормов, возраста и физиологических особенностей организма. На практике они определяются методом прижизненного контроля загрязненности организма животных радиоцезием.

Таким образом, путем подбора вида и сортов кормовых растений, рационального их размещения на различных типах почв, коренного улучшения лугов, способа содержания и кормления животных можно добиться снижения радионуклидов в получаемой продукции до безопасного уровня.

Получить баранину с содержанием ^{137}Cs в допустимых пределах (160 Бк/кг) намного сложнее, чем говядину, поскольку при сходном питании накопление радиоцезия в мышечной ткани овец происходит намного интенсивнее, чем у коров. Кроме того, при выпасе овцы вместе с травой поедают большое количество почвы. Получить чистую баранину можно при использовании кормов, пригодных для получения чистого молока от коров.

Производство шерсти на загрязненной территории также представляет большую проблему, поскольку при выпасе овец шерсть, покрытая жиропотом, сильно загрязняется радиоактивной пылью. Однако если полученную шерсть помыть по общепринятой технологии в мыльно-содовом растворе в соотношении 1:100 (шерсть:раствор), то ее можно будет получать с низким содержанием цезия-137.

При производстве свинины в качестве основных кормов необходимо использовать концентраты и картофель. При содержании в суточном рационе радиоцезия менее 640 Бк можно вести откорм свиней без ограничений.

При выращивании *птицы* (180 Бк/кг) на мясо следует обращать большое внимание на загрязненность кормов, поскольку в мясо птицы переходит наибольшее количество радионуклидов. В этом случае содержание цезия в суточном рационе птицы не должно превышать 40 Бк. Такое же ограничение по радиоактивности кормов и для кур-несушек.

Пчеловодство можно вести без ограничений на всей территории радиоактивного загрязнения, где разрешена трудовая деятельность.

Для получения *пушнины* с содержанием радионуклидов в пределах нормативов количество цезия-137 в суточном рационе не должно превышать: для норки — 185 Бк, для лисицы — 3700 Бк, для песца — 4070 Бк и для соболя — 222 Бк. В кормлении зверей возможно использовать корма и с более высоким содержанием радионуклидов. Однако в этом случае в последние 1...3 месяца животных следует переводить на чистые корма.

При кормлении рыб чистыми кормами прудовое рыбоводство ведется без ограничений. В случае недостатка кормов и перехода рыбы на естественное питание рекомендуется вносить 50 кг/га водной поверхности прудов суперфосфата и столько же аммиачной селитры дробными порциями (4...7 раз в сезон). Непременным условием при этих мероприятиях является внесение в пруд калийных удобрений (сульфинит) по 50...70 кг/га (300...400 кг/га за сезон) и негашеной извести 70...80 кг/га (300 кг/га за сезон). Наличие в водной среде калия и кальция снижает накопление радиоактивных веществ гидробионтами и рыбой. Эффективным способом снижения содержания радионуклидов в воде и грунтах рыбоводных прудов является разведение высшей водной растительности в воде каналов и прудов, которая выполняет роль биофильтра. Растительность должна занимать 15...20% общей площади пруда.

В выростных прудах необходимо проводить глубокую вспашку илов на 40...50 см, вносить по спущенному ложу пруда 300...400 кг/га калийной соли и до 1 т/га негашеной извести (по данным Академии аграрных наук Беларуси, 1997).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЩЕСТВ, УСКОРЯЮЩИХ ВЫВЕДЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ОРГАНИЗМА ЖИВОТНЫХ

Эффективным способом снижения загрязнения радиоцезием продуктов животноводства является использование в рационах кормовых добавок, избирательно связывающих радионуклиды в желудочно-кишечном тракте животных.

К таким добавкам относятся различные вещества, способные связывать радионуклиды в желудочно-кишечном тракте и таким образом препятствовать их всасыванию. Эти вещества принято называть сорбентами.

Сорбенты подразделяют по происхождению (природные и искусственные сорбенты) и по спектру действия (селективные, способные избирательно связывать определенные радионуклиды, и широкого спектра действия, связывающие сразу несколько радионуклидов).

К природным сорбентам относят обыкновенную глину, цеолиты, бентонит, хумолит, вермикулит и другие.

К искусственным относят ферроцианидные препараты. Промежуточную группу представляют сорбенты, выделенные и сконцентрированные из природных источников. Это прежде всего производные альгиновой кислоты, получаемые из морских водорослей, а также пектины, получаемые из растительных продуктов, богатых этими веществами (яблоки, некоторые виды водорослей и др.), хитозан, получаемый из панцирей краба, и др.

Следует отметить, что из-за особенностей пищеварения у жвачных сорбенты органической природы у этого вида животных, как правило, не эффективны вследствие их разрушения микрофлорой рубца.

Цеолиты представляют собой трехмерные кристаллы алюмосиликатов. В природе наиболее распространены шесть видов цеолитов: клиноптилолит, морденит, филлопсит, шабазид, гайландид, эригист. Цеолиты используют в животноводстве и птицеводстве в качестве кормовых добавок с целью улучшения усвояемости питательных веществ и увеличения среднесуточных приростов живой массы. Цеолиты способны связывать вредные и токсические вещества из корма и образующиеся в процессе пищеварения. Оказалось, что цеолиты способны прочно связывать в желудочно-кишечном тракте радиоцезий, а также ионы свинца и некоторых других тяжелых металлов, препятствуя их всасыванию. Это свойство цеолитов было широко использовано в первый период после Чернобыльской катастрофы, однако в последующем из-за большой дороговизны перевозок эти сорбенты прекратили использовать в практике. Суточная доза цеолитов составля-

ет 100...300 г и задают их ежедневно в мелкодисперсной форме в смеси с комбикормом. По данным Н. П. Лысенко, эта доза цеолитов (клиноптилолит) способна достоверно снижать содержание радиоцезия в молоке и мышечной ткани коров на 30%. Увеличение дозы препарата приводило к снижению положительного эффекта, а при дозах более 500 г/сут. наблюдается замедление скорости выведения радиоцезия. Более эффективно цеолиты снижали содержание ионов свинца в молоке.

Модернит в экспериментах на козах в дозе 5...10 г/сут более чем в 2 раза способствовал увеличению скорости выведения радиоцезия с мочой. На овцах этот эффект оказался слабее (С. Фортберг и др.)

Бентонит (глинистый минерал) активно использовали в Германии и Австрии после выпадения там чернобыльских радиоактивных осадков. При дозе 200...500 г/голову в сутки происходило 50%-ное снижение содержания радиоцезия в молоке и мышечной ткани коров. Однако при длительном применении бентонит оказывает отрицательное влияние на баланс кальция, магния и фосфора в организме животных. У коз длительное применение бентонита вызывало увеличение в печени и почках концентрации железа и снижение уровня цинка и меди в организме (Т. Шварц и др.).

Хорошо зарекомендовал себя хумолит, представляющий собой смесь природных сорбентов: клиноптилолита, модернита, глинистого материала и гуматов (производится в Венгрии). В дозе 100 г/сут. снижает в 1,6...2,8 раз содержание радиоцезия в молоке коров уже на 11-е сутки. Применение этого препарата на бычках в дозе 500 г/голову позволило снизить концентрацию радиоцезия в мышечной ткани в 2...2,8 раза. В дозе 500 г/голову хумолит снижал содержание радиоцезия в молоке коров при стойловом их содержании в 2...4 раза. При пастбищном содержании коров применение хумолита в дозах 300...500 г/голову не оказало заметного влияния на концентрацию радиоцезия в молоке (Р. Г. Ильязов).

Наилучшим эффектом по снижению радиоцезия в продукции животноводства обладают селективные сорбенты на основе ферроцианидсодержащих препаратов (ФСЦ). В России разработано сейчас шесть форм таких препаратов: ферроцин (гексацианоферрат железа-калия) в виде тонкодисперсного

порошка, ферроцин в виде болюсов и ферроцин в виде брикетов соли-лизунца, ферроцин-2 в виде порошка, бифеж (ферроцианид железа-калия, специальным образом нанесенный на целлюлозную основу — древесный опил) и сорбент ХЖ-90 (смесь ферроцианида железа-калия и бентонитовой глины).

Применение бифежа в дозе 30...60 г/корову в сутки в производственных условиях загрязненных хозяйств снижает переход цезия-137 в молоко в 5...10 раз, ферроцина и ферроцина-2 (в виде порошка) в дозе 3 г/корову в 4...6 раз, ферроциновые болюсы (однократно 3 штуки на животное) снижают в 1,5...2,5 раза с продолжительностью действия в течение 2...3 месяцев, ферроцианидсодержащие брикеты соли-лизунца в 1,1...1,5 раза, ХЖ-90 в дозе 10...30 г/корову — в 1,2...3,8 раза (А. Д. Пастернак, А. В. Васильев, В. А. Бударков и др.).

Бифеж смешивается с концентратами или с зеленой массой, сенажом и силосом. Порошковые формы ферроцина и ферроцин-2 смешивают с концентратами в процессе их приготовления с помощью специальных дозаторов и задают только в таком виде.

Ферроциновые болюсы вводят животному в рюбель с помощью специального болюсодавателя, позволяющего ввести одновременно три болюса. Методика введения аналогична введению магнитного зонда.

На заключительных стадиях откорма крупного рогатого скота применение ФСП в составе болюсов, соли-лизунца и комбикорма позволяет снизить концентрацию цезия-137 в мясе от 2 до 5 раз в зависимости от уровня радиоактивного загрязнения рационов. Применение этих препаратов эффективно в условиях пастбищного и стойлового содержания (А. Д. Пастернак, Р. Г. Ильязов, В. А. Бударков и др.).

Вследствие избирательности действия ФСП не активны по отношению к другим радионуклидам.

Направленное изменение обмена веществ позволяет усилить скорость выведения радиоцезия из организма животных. С этой целью можно использовать комплекс биологически активных веществ, разрабатываемых Н. П. Лысенко в Московской ветеринарной академии им. К. И. Скрябина. Этот препарат одновременно способствует увеличению про-

дуктивности животных. Наибольшую активность он проявляет при совместном применении с каким-либо сорбентом.

Для снижения содержания ^{90}Sr в молоке следует контролировать рационы по содержанию минеральных веществ, в особенности кальция и калия, а при необходимости вводить соответствующие добавки. С этой целью можно использовать доломитовую муку, кормовой мел, фосфогипс и другие минеральные подкормки.

Для моногастричных животных, с целью снижения накопления ^{90}Sr , можно использовать альгинат натрия и пектиновые вещества.

Эти препараты особенно перспективны в виде пищевых добавок для снижения накопления ^{90}Sr в организме человека.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ВЕТЕРИНАРНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В ЗОНАХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Цель, задачи и тактика проведения ветеринарных мероприятий в различные периоды после радионуклидного загрязнения среды существенно отличаются.

В период выпадения радиоактивных осадков главной задачей ветеринарной радиологической службы является контроль радиационной ситуации, прогноз состояния здоровья животных в ближайшее время и в перспективе, а также прогноз загрязненности получаемой продукции. Если плотность радиоактивных выпадений высокая и существует реальная опасность массовых и глубоких поражений животных, то их необходимо перевести на стойловое безвыгульное содержание, а молодняк — на подсос и в последующем организовать эвакуацию скота. Данная ситуация наблюдалась в 30-км зоне вокруг Чернобыльской АЭС. В этот период с целью защиты щитовидной железы от поражения ее радиойодом обязательно животным дают препарат KI и организуют водопой.

Через 4...6 суток после завершения выпадения радиоактивных осадков и распада короткоживущих изотопов реальная опасность поражения работников в сотни раз снижается. В этот период основной задачей является определение примерного радионуклидного состава выпадений, плотности

радионуклидного залегания, степени загрязненности кормов и кормовых угодий. Для всего поголовья животных необходимо провести диспансеризацию с целью сортировки животных.

На опыте Чернобыльской катастрофы были разработаны простые, объективные тесты оценки состояния и жизнеспособности животных (О. А. Булычев, В. А. Бударков, Н. И. Архипов, А. В. Васильев, И. Я. Василенко, Р. Г. Ильязов и др.). Согласно этой методике необходимо при сортировке выявлять животных с нарушением органов дыхания, с ректальной температурой ниже 37°C , с содержанием лейкоцитов в венозной крови ниже 5,0 тыс. в 1 мм^3 , толщиной кожной складки в области шеи более 12 мм, длиной волос на холке более 80 мм и курчавостью.

У таких животных выборочно исследуют титры аутоантител к тканям щитовидной железы (по Н. Н. Клемпарской) и определяют радиоиммунологическим методом уровень тиреоидных гормонов в сыворотке или плазме крови. Производят контрольный убой животных (5% от общего числа), у которых определяют массу щитовидной железы и оценивают состояние окологочечной и перикардальной жировой ткани.

Состояние органов дыхания оценивают с помощью функциональной нагрузки — прогона животных в течение 1...3 минут. После этого выявляют животных с хриплым, везикулярным и затрудненным дыханием, с кашлем.

Кожную складку определяют в области шеи с помощью кутиметра или штангенциркуля.

При повышении титров аутоантител к тканям щитовидной железы более 2,5 баллов, снижении концентрации тироксина менее $1\text{ мкг}/100\text{ мл}$ и массы щитовидной железы ниже 4,0 г, наличии слизистого перерождения окологочечной или перикардальной жировой ткани животных выбраковывают.

Остальных животных либо эвакуируют, либо содержат на месте с соблюдением всего комплекса мер, направленных на снижение последующей дозовой нагрузки и радионуклидного загрязнения организма. При первой же возможности этих животных заменяют на новое, не попавшее под йодное воздействие поголовье, предварительно проведя комплекс мер прижизненной очистки организма с целью получения пригодной в пищу продукции.

После распада короткоживущих радионуклидов и стабилизации радиационной обстановки основной задачей ветеринарной службы является проведение мероприятий, направленных на снижение заболеваемости крупного рогатого скота от вирусных и бактериальных инфекций, на профилактику нарушений иммунной системы, а также болезней обмена веществ и незаразной этиологии. В этот период все ветеринарно-санитарные мероприятия проводят по инструкциям, правилам и наставлениям Ветеринарного законодательства, а также другим инструкциям, утвержденным Главным управлением ветеринарии минсельхоза республик.

Диагностические исследования и вакцинацию животных проводят по обычной схеме согласно наставлений по применению вакцин и диагностикумов. При проведении вакцинации целесообразно одновременно использовать иммуномодуляторы в рекомендуемых дозах (Т-активин, В-активин, тималин, тимогон, достим и другие). Иммуномодуляторы способствуют увеличению титра антител, вырабатываемых организмом, напряженности и длительности иммунитета (А. Д. Белов, Н. П. Лысенко, В. И. Саулин, П. А. Левша и др.).

В хозяйствах, расположенных в зоне с высокой плотностью загрязнений — 555...1480 кБк/м² (15...40 Ки/км²), 2...3 раза в год (через 3, 6, 9 месяцев после прививки) проводят выборочный серологический контроль поствакцинального иммунитета против особо опасных болезней.

В пострадавших хозяйствах проводят обследование всех животных на туберкулез и бруцеллез. Положительно реагирующих на туберкулез и бруцеллез животных сразу же выбраковывают и отправляют на мясокомбинат для санитарного уоя. Два раза в год проводят серологическое обследование крупного рогатого скота старше 6 месяцев на лейкоз. Инфицированные вирусом лейкоза коровы без проявлений гематологических реакций используются не более 2 лет, затем выбраковываются независимо от результатов гематологических исследований.

Особое внимание уделяется сохранности молодняка. Для этого прежде всего необходимо добиваться рождения жизнеспособного приплода за счет правильного сбалансированного кормления и содержания матерей. Для формирования

полноценного колострального иммунитета у телят необходимо добиваться высокого титра антител в молозиве матери, предварительно обработав их вакцинами к основным возбудителям, циркулирующим в хозяйстве, а также строго следить за своевременной и правильной выпойкой молозива телятам.

Телятам целесообразно в первый день после рождения вводить молозивные иммуноглобулины в дозе 1...2 мл/кг живой массы.

При лечении телят наряду с применением антибактериальных препаратов в обычных дозах целесообразно использовать иммуномодуляторы, а также сыворотку реконвалесцентов в дозе 0,5...1 мл/кг живой массы 2...3 раза с интервалом 7...10 дней внутримышечно. При лечении болезней вирусной этиологии эффективен миксоферон в сочетании с антимикробными средствами и поливалентной гипериммунной сывороткой против инфекционного ринотрахеита, парагриппа-3, вирусной диареи и аденовирусной инфекции в дозах 0,5...1 мл/кг живой массы внутримышечно 3...5-кратно (А. Д. Белов, Н. П. Лысенко, В. И. Саулин и др.).

В хозяйствах с большой плотностью загрязнения, как правило, наблюдаются болезни телят смешанной этиологии. Поэтому необходимо проводить комплексные лечебно-профилактические мероприятия, которые включают:

- обработку матерей поливалентными вирусно-бактериальными вакцинами совместно с иммуномодуляторами (хорошо зарекомендовали себя вакцины, разработанные в Московской ветеринарной академии);
- активацию факторов неспецифического иммунитета телят путем использования иммуномодуляторов, молозивных иммуноглобулинов, миксоферона и т. д.;
- при лечении телят — применение сыворотки реконвалесцентов, гипериммунной сыворотки против конкретных возбудителей и антимикробных средств в оттитрованных дозах к выявленным возбудителям (А. Д. Белов, Н. П. Лысенко, Г. Е. Громенко и др.).

При высоких плотностях загрязнения с целью получения пригодной в пищу продукции используют комплекс описанных ранее агрохимических мероприятий, приводящих к изменению качества получаемых кормов. В рационах вынуж-

дены уменьшать сено и увеличивать концентраты. Все это служит одним из факторов нарушения обмена веществ в организме животных и функции печени. Для нормализации обменных процессов, костномозгового кроветворения и функции печени рекомендуется применять антиоксиданты: дилудин в дозе 4 мг/кг живой массы с кормом, внутримышечно витамин Е в дозе 500 мг на голову, натрия селенит коровам — дважды на 240...245-е сутки стельности и повторно через 30...40 дней в дозе 0,05...0,07 мг/кг живой массы в виде 4% -ного водного раствора. Хорошие результаты дает использование смеси витаминов А и Е в повышенных дозах. Так, если норма потребления витамина А на чистой территории составляет 6 мг/сутки, то на загрязненных радионуклидами территориях норма его потребления увеличивается до 25 мг/сутки. Недостаток потребления витаминов снижает устойчивость организма. В настоящее время в России производится и используется витаминный концентрат «Ветерон-2», содержащий 1,5...2% бета-каротина, витамины Е и С (1:0,025:3). При невозможности полного обеспечения животных в течение года витаминами в первую очередь их следует использовать в зимний период и на последних месяцах стельности (А. Д. Белов, Н. П. Лысенко, О. П. Четверякова, Н. А. Фомичева).

Для профилактики патологии щитовидной железы у телят стельным коровам за 25...30 дней до отела необходимо вводить внутримышечно однократно по 10 мл ДИФ-3 или диструммин. При показаниях новорожденным телятам вводят внутримышечно однократно ДИФ-3 в дозе 3...5 мл или диструммин в дозе 5...7 мл. Крупному рогатому скоту йод скармливают с концентрированными кормами из расчета 1 мг на 1 кг сухого вещества корма.

В качестве источника йода целесообразнее применять препарат йодистый калий (таблетки массой 0,1 г). Коровам в период сухостоя рекомендуется по 2 таблетки в сутки на животное. Лактирующим коровам препарат назначают в зависимости от продуктивности: в пересчете на каждую тонну молока им дополнительно дают по одной таблетке. Телятам до 6-месячного возраста требуется по 0,5...1 таблетке, а с 6 мес. до 1 года — по 1...2 таблетки препарата.

ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОРМОВЫХ УГОДИЙ, КОРМОВ, ЖИВОТНЫХ И ПРОДУКЦИИ ЖИВОТНОВОДСТВА, ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ

При масштабных радиационных загрязнениях окружающей среды радиоактивное загрязнение сельскохозяйственных угодий, кормов, животных и продукции животноводства относится к числу ведущих факторов, от которых зависит степень радиационной опасности, масштабы мероприятий и затраты по ликвидации последствий. Это связано с тем, что население получает основные дозовые нагрузки при потреблении молока и других продуктов питания, производимых на загрязненной территории. Правильное использование кормовых угодий и кормов позволяет существенно снизить загрязненность продукции животноводства, что служит важным фактором снижения дозовой нагрузки на человека.

При радиационных авариях происходит загрязнение территории свежими продуктами ядерного деления, среди которых наибольшую опасность представляют изотопы йода, и прежде всего ^{131}I , который больше всего загрязняет корма, животных и получаемую от них продукцию. В этот период прекращается пастбища молочного скота. При использовании ранее заготовленных кормов убирается их верхний загрязненный слой и утилизируется. Принимаются меры против повторного загрязнения кормов. Через 2 месяца после выпадений содержание йода снижается в 250 раз вследствие его физического распада, после чего этот радионуклид прекращает представлять опасность.

Второй период определяется как период преимущественно некорневого загрязнения растений. Его продолжительность — первый вегетационный период. При выпадении радионуклидов осенью после уборки урожая или зимой внекорневое загрязнение в последующем урожае будет намного меньше, чем при выпадении в период вегетации растений. В этот период на сельскохозяйственных угодьях проводят глубокую вспашку и другие мероприятия, направленные на снижение повторного загрязнения сельскохозяйственной продукции.

Третий период начинается со второго вегетационного периода после выпадений. Продолжительность его определяет

ся радионуклидным составом выпадений. При выпадении ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu он длится несколько десятков лет. Загрязнение продукции сельскохозяйственного производства происходит в основном за счет корневого поступления радионуклидов в продукцию растениеводства и последующей их миграции по пищевой цепи. В этот период проводят мероприятия, направленные на снижение миграционной способности радионуклидов в корма и организм животных, соблюдая правила, направленные на снижение повторного загрязнения продукции радиоактивной почвой.

В связи с развитием атомной индустрии и широким использованием атомной энергии в народном хозяйстве появились потенциальные источники загрязнения искусственными радионуклидами окружающей среды, особенно за счет выбросов радиоактивных продуктов перерабатывающими атомными предприятиями, атомными электростанциями (АЭС) и во время аварийных ситуаций на них. Только за период 1971–1984 гг. в 14 странах мира наблюдалась 151 авария на АЭС. Если к этому добавить испытания ядерного оружия, то на всей планете возникает нерегулируемый фактор радиационного воздействия на весь животный и растительный мир, в том числе и на человека.

На территории бывшего Советского Союза произошли две самые крупные в мире ядерные аварии.

Ядерная авария на Южном Урале в 1957 г. вблизи города Кыштым относится к числу наиболее тяжелых. В результате выпадения радиоактивных осадков (Восточно-Уральский след) произошло загрязнение кормовых угодий и внешнее загрязнение кожных покровов животных. При поедании грязных кормов концентрация радионуклидов в организме животных достигала 1,1 МБк/кг. При такой концентрации радионуклидов через 9...12 суток происходила гибель животных с явными симптомами острой лучевой болезни. Поглощенная доза при этом составляла 1,35...2,9 Гр (Р. М. Алексахин, А. П. Поваляев, В. А. Соколов и др.).

В 1957–1959 гг. было утилизировано 10 тыс. тонн различной сельскохозяйственной продукции. Из сельскохозяйственного использования было выведено 59 тыс. га в Челябинской области и 7 тыс. га в Свердловской области.

Результаты Чернобыльской катастрофы стали еще более масштабными. Только в Белоруссии было ликвидировано 20 колхозов и совхозов, а проживающие там люди переселены на незагрязненные территории. В наиболее пострадавшей Гомельской области было эвакуировано 50,9 тыс. голов крупного рогатого скота. В послеаварийный период в Республике Беларусь было произведено большое количество мяса с превышением ВДУ. В 1986 г. — 21,1 тыс. тонн, в 1987 г. — 6,9, в 1988 г. — 1,4, 1989 г. — 0,6 и в 1990 г. — 0,06 тыс. тонн. В 1991 году было утилизировано и захоронено 8,3 тыс. тонн этого мяса в могильнике, расположенном в 30-км зоне.

В первые два месяца после аварии основным загрязнителем сельскохозяйственной продукции оказался ^{131}I . В первые 10 суток после аварии доза на щитовидную железу у коров в 30-км зоне достигала 24...135 Гр и 2...11 Гр в 30...80-км зоне по следу радиоактивных выпадений (И. И. Крышев, Р. М. Алексахин, И. Н. Рябов и др.). Все это послужило причиной эвакуации животных, а также населения из 30-км зоны. Содержание ^{131}I в молоке коров вне зоны отселения в первые недели после аварии достигало 370 кБк/л, что в 100 превышало допустимые нормы. В некоторых районах Западной Европы содержание йода в молоке коров достигало 7,5...11,0 кБк/л. Всего в 1986 г. было получено 1313,7 тыс. тонн молока с превышением ВДУ. Это молоко было переработано в продукты длительного хранения (сыр и масло). В процессе приготовления масла в него поступает только 90% радионуклидов из молока. При хранении сыров и масла более 2 месяцев происходит их очищение от радионуклидов йода за счет их физического распада. После распада радионуклидов подобную продукцию можно употреблять в пищу.

При загрязнении продукции долгоживущими радионуклидами практически невозможно добиться ее самоочищения, поэтому в этих случаях используют специальные приемы технологической переработки.

Загрязненное зерно является одним из основных поставщиков радионуклидов в организм взрослого человека, поэтому целесообразно в качестве продовольствия использовать урожай зерновых культур с площадей с минимальными уров-

нями радиоактивного загрязнения, употребляя в первую очередь урожай зернобобовых культур и кукурузу, которые по сравнению с другими зерновыми культурами загрязняются в меньшей степени. Урожай с угодий с высокими уровнями загрязнения следует использовать на техническую переработку и на семена, а с относительно невысокими уровнями — для фуражных целей. Целесообразно включение картофеля и корнеплодов в рационы животных в максимально возможных количествах (даже взамен фуража) в случае недостатка зерна, собранного на площадях с допустимым уровнем радиоактивного загрязнения.

Использование древесины в качестве топлива и древесной золы в качестве удобрения производится с территорий, загрязненных до 185 кБк/м^2 (5 Ки/км^2). В связи с интенсивным накоплением ^{137}Cs в грибах, ягодах и других лесных пищевых продуктах введены ограничения на их использование. При плотности загрязнения $37 \dots 74 \text{ кБк/м}^2$ ($1 \dots 2 \text{ Ки/км}^2$) ограничений нет. При плотности $77,7 \dots 185 \text{ кБк/м}^2$ ($2,1$ до 5 Ки/км^2) заготовка грибов, ягод, березового сока, плодов, хвои, лекарственных трав производится при обязательном контроле. При плотности более 185 кБк/м^2 (5 Ки/км^2) их заготовка не разрешается.

Гарантированное производство зерновых культур и картофеля на продовольственные цели становится возможным при плотности загрязнения пахотных угодий цезием-137 до 555 кБк/м^2 (15 Ки/км^2). Для целенаправленного, планомерного ведения сельскохозяйственного производства в зоне $555 \dots 1480 \text{ кБк/м}^2$ ($15 \dots 40 \text{ Ки/км}^2$) необходим прогноз возможности производства различных видов продукции растениеводства и животноводства с учетом гранулометрического состава и агрохимических свойств каждого поля. Возделывание на продовольственные цели озимой пшеницы, ржи, ячменя, картофеля и некоторых овощных культур (огурцы, кабачки, томаты) на землях с плотностью загрязнения цезием-137 $555 \dots 1480 \text{ кБк/м}^2$ ($15 \dots 40 \text{ Ки/км}^2$) возможно только на хорошо окультуренных дерново-подзолистых суглинистых и супесчаных почвах (при отсутствии загрязнения почв стронцием-90). На окультуренных песчаных почвах возделывание этих же культур возможно при плотности загрязнения почв

менее 1110 кБк/м^2 (30 Ки/км^2). Необходимо строго учитывать уровень загрязнения почвы при возделывании столовых корнеплодов свеклы и моркови, особенно на песчаных почвах, поскольку имеется вероятность получения урожая с превышением допустимых уровней содержания цезия-137. При размещении столовых корнеплодов на легких почвах необходим прогноз возможного накопления радиоцезия урожаем.

При плотности загрязнения почв стронцием-90 $37 \dots 111 \text{ кБк/м}^2$ ($1 \dots 3 \text{ Ки/км}^2$) практически невозможно возделывание столового картофеля и зерновых культур на продовольственные цели. Зерновые культуры могут использоваться на фураж, преимущественно для мясного откорма и производства молока-сырья для переработки на масло.

При плотности загрязнения угодий в пределах $555 \dots 1480 \text{ кБк/м}^2$ сенокосы и пастбища можно использовать для дойного стада ограниченно, в основном для производства молока, поступающего на переработку. На окультуренных пахотных почвах и улучшенных луговых угодьях мясное скотоводство здесь можно вести с введением заключительного откорма чистыми кормами. Зеленые и грубые корма, получаемые на торфяно-болотных почвах, а также на естественных пастбищах и сенокосах, пригодны только для начальной стадии откорма животных.

Сокращение посевов клевера с заменой их на злаковые травостой обосновано только на почвах, загрязненных ^{90}Sr с плотностью более $11,1 \text{ кБк/м}^2$ ($0,3 \text{ Ки/км}^2$), зеленая масса и сено клевера непригодны для скармливания дойному стаду, так как клевер накапливает радионуклиды стронция в среднем в 2,5 раза больше, чем злаковые травы. На дерново-подзолистых почвах, загрязненных преимущественно цезием, посевы клевера предпочтительны, так как он накапливает радиоцезий в среднем на 30% меньше, чем многолетние злаковые травы. На дерново-подзолистых почвах с плотностью загрязнения цезием-137 $185 \dots 555 \text{ кБк/м}^2$ ($5 \dots 15 \text{ Ки/км}^2$) и стронцием-90 $11,1 \dots 18,5 \text{ кБк/м}^2$ ($0,3 \dots 0,5 \text{ Ки/км}^2$) более пригодны клеверо-злаковые травосмеси, которые обеспечивают кормовой рацион белком при минимальных дозах азотных удобрений, а на плодородных почвах и без минерального азота. Полное исключение бобового компонента из тра-

восмесей требует повышенных доз азота, что усиливает загрязнение растений радиоцезием. На загрязненных торфяно-болотных почвах целесообразны только злаковые травосмеси, так как клевер накапливает здесь примерно в два раза больше радионуклидов цезия и стронция, чем многолетние злаковые травы.

Особого внимания заслуживают посевы кукурузы, высокие урожаи зеленой массы которой можно получать как при чередовании ее с другими культурами в севообороте, так и в бессменных посевах в течение двух-трех лет. Расширение посевов кукурузы на зерно в южных загрязненных районах позволяет пополнить кормовой баланс поскольку на дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава невозможно возделывание многолетних бобовых трав. Кроме того, зерно кукурузы меньше накапливает радионуклиды.

Главными условиями при подборе культур являются пригодность почв по гранулометрическому составу и режиму увлажнения, степени окультуренности и плотности радиоактивного загрязнения. Необходимо также учитывать и общеприродные требования растений к предшественникам, поскольку важнейшим элементом системы земледелия на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, является севооборот.

Это указывает на необходимость разработки планов размещения сельскохозяйственных культур по полям севооборотов с учетом всех свойств и особенностей каждого поля, используя последние материалы радиологического и агрохимического обследования почв и уточненные коэффициенты перехода радионуклидов из почвы в растения и далее в продукцию животноводства.

Ветеринарно-радиационное обследование животных, кормов и воды с целью возможности их дальнейшего использования. В условиях чрезвычайных обстоятельств ветеринарно-санитарный и радиологический контроль объектов ветеринарного надзора приобретает особо важное значение. Возникает необходимость оперативного контроля за радиоактивным загрязнением объектов внешней среды, фуража, воды с целью быстрого определения возможности их дальнейшего использования. Фураж и воду можно допускать

в корм и для водопоя животных только при условии, если их загрязненность радиоактивными веществами не превышает допустимых норм. В остальных случаях фураж дезактивируют или оставляют на длительный срок хранения самодезактивации в результате радиоактивного распада.

Дезактивацию осуществляют в зависимости от вида фуража (зернофураж, сено, комбикорм), способа его хранения и упаковки (затарен в фуражных помещениях, россыпью, в бумажных или обычных мешках и т. д.), характера и степени радиоактивного загрязнения. Она может быть проведена разными способами: удалением загрязненного наружного слоя фуража, заменой загрязненной тары чистой. Дезактивация воды может быть достигнута путем отстаивания ее с последующим сливом верхних слоев воды в чистую емкость: коагулированием с последующим отстаиванием; фильтрованием через сорбенты и иониты; перегонкой.

Разработаны химические и агротехнические методы, ограничивающие поступление стронция из почвы в растения. Химический метод основан на использовании конкурентных отношений кальция и ^{90}Sr . Так, при внесении кальция в кислые почвы (5...12 т на 1 га), которые бедны этими элементами, снижается поступление стронция-90 в растения на 20...60%. Одновременное внесение кальция и навоза усиливает данный эффект. На почвах, богатых кальцием, подобные добавки неэффективны. Агротехнический прием, снижающий поступление стронция в растения с короткими корнями при поверхностном загрязнении им почвы, предусматривает разовую глубокую перепахку с оборотом пласта; метод можно рекомендовать для обработки лугов и пастбищ.

Пребывание животных в зоне радиоактивного загрязнения приводит к их радиационному поражению, степень которого может быть различной. Для определения степени тяжести поражения и возможного хозяйственного использования животных очень важно провести их ветеринарно-санитарное обследование (диспансеризацию). Хозяйственное использование пораженных радиацией животных может быть следующим: оставление на воспроизводство, откорм, убой на мясо или с целью получения технических продуктов (мясокостная мука, технический жир и др.).

На местности, загрязненной радиоактивными веществами, поражение может быть за счет общего внешнего гамма-облучения или сочетания поражения внешним гамма-облучением и внутренним поражением радиоактивными веществами.

Внутри организма животных радиоактивные вещества могут поступать через органы пищеварения и дыхания. Внутреннее поражение животных радиоактивными веществами значительно отягощает развитие лучевой болезни, обусловленной общим внешним гамма-облучением.

Обследование пораженных животных начинают с анализа радиационной обстановки на территории их пребывания: уровень радиации и степень радиоактивного загрязнения кормов и воды, место размещения животных (на пастбище, в деревянных или кирпичных помещениях, прогон по загрязненной территории). При возможности рассчитывают дозу облучения, полученную животными за время нахождения на загрязненной радиоактивными веществами местности, а также содержание радиоактивных веществ в суточном рационе, пользуясь методами, изложенными в соответствующих инструкциях и рекомендациях.

Из клинических данных определяют общее состояние животных — угнетение, возбуждение, нарушение координации движения, степень выраженности рефлексов, состояние слизистых оболочек и конъюнктивы (анемия, кровоизлияния), частота пульса и дыхания, температура тела, упитанность, акт дефекации (понос, кровь или примесь крови в фекалиях). Выборочно у 5...10 животных из группы, находившихся в одинаковых условиях, определяют показатели крови (количество лейкоцитов, тромбоцитов, нейтрофилов, лимфоцитов, лейкоформулу). Рассчитывают абсолютные количества лимфоцитов, индекс сдвига ядра; обращают внимание на дегенеративные изменения ядра и цитоплазмы, определяют индекс ретракции кровяного сгустка.

При затруднении прогнозирования исхода лучевой болезни используют коэффициент прогноза (КП). Для этого определяют активность сукцинатдегидрогеназы в лимфоцитах крови. Данные диспансеризации заносят в диспансерную карту.

В целях определения наличия радиоактивных веществ на поверхности тела и в организме проводят радиометрические исследования приборами ДП-5 или СРП-68-01.

Перед началом измерений определяют внешний гамма-фон местности на расстоянии 1 м от земли. В случаях, если он превышает допустимую величину уровня радиоактивной загрязненности животных более чем в 3 раза, измерение загрязненности животных проводят в различного рода укрытиях, снижающих гамма-фон.

При измерении общей радиоактивной загрязненности животных экран датчика дозиметрических приборов располагают на расстоянии 1,5...2 см от поверхности кожного покрова. Измерение вначале проводят со стороны спины и крупа, затем определяют мощность излучения правой и левой сторон тела животного, области левой голодной ямки, мечевидного хряща животного, конечностей и головы.

Прибором ДП-5 определяют, помимо общей радиоактивной загрязненности животных, локализацию радиоактивных веществ (на поверхности кожи или внутри организма). С этой целью проводят два измерения уровня радиации у поверхности тела животного: при закрытом окне датчика (экран в положении «Г») и открытом окне (экран в положении «Б»). Если при открытом окне датчика показания прибора существенно выше, чем при закрытом, то радиоактивные вещества находятся на поверхности кожи, если же оба показания одинаковы, то это указывает на наличие их внутри организма. Кроме того, определяют наличие радиоактивности в моче, фекалиях и молоке.

С диагностической целью при необходимости из числа обследованных животных каждой контрольной группы проводят убой. При этом обращают внимание на наличие кровоизлияний в слизистых, серозных оболочках и внутренних органах, отечности в области гортани, трахеи, печени, почек, состояние щитовидной железы, селезенки, лимфоузлов, костного мозга (консистенция, цвет). Пробы мяса и внутренних органов подвергают радиометрии и радиохимическим исследованиям.

На основании комплекса исследований проводят сортировку животных по тяжести радиационного поражения: легкая,

средняя, тяжелая и крайне тяжелая степени. Сортировку осуществляют как можно раньше, чтобы не было неоправданного расхода кормов и сил на содержание животных. При прогнозировании тяжелой и крайне тяжелой степени острой лучевой болезни и тяжелой степени хронической животных убивают на мясо. При средней степени лучевой болезни целесообразно животных свести в одну группу и организовать лечение. При этом животных старых, истощенных, малопродуктивных, пораженных другими болезнями убивают на мясо или уничтожают (при некоторых инфекционных болезнях). В отношении животных после выздоровления определяют дальнейшее их хозяйственное использование (откорм или воспроизводство).

Перед убоем животных в зависимости от степени радиоактивной загрязненности моют 0,3...0,5% -ными растворами моющих или поверхностно-активных веществ или водой под давлением (до трех атмосфер), добиваясь снижения уровня внешнего гамма-излучения ниже 50 мкР/ч. Если же не удастся обработкой снизить радиоактивную загрязненность до допустимой нормы, таких животных выделяют в обособленную группу и выдерживают под наблюдением до спада радиоактивности.

Людей, работающих с загрязненными животными, обеспечивают индивидуальными дозиметрами и спецодеждой. После работы проводят их санитарную обработку и дозиметрический контроль.

Обязательным условием при переработке скота является дополнительная мойка животных водой перед убоем, наложение лигатуры на пищевод перед обескровливанием и на прямую кишку при заделке проходника, отделение и захоронение щитовидной железы.

При забеловке и съемке шкур принимают меры по предотвращению загрязнения туш, не допуская их контакта с шерстным покровом шкуры. Чтобы предотвратить загрязнение поверхности туш содержимым желудка и кишок, последние удаляют одновременно. После разделения туш на полтуши и зачистки поверхности их тщательно промывают водой, после чего проводят радиометрический контроль.

При содержании радиоактивных веществ в пределах допустимых уровней туши направляют в холодильник. Такое

мясо используют на общих основаниях. В случаях превышения уровня радиоактивной загрязненности туши хранят в отдельных камерах холодильника до снижения радиоактивности до допустимых норм и используют их в последнюю очередь. Наряду с этим, учитывая, что мышцы имеют обычно значительно меньшую радиоактивность, чем кости, целесообразно произвести обвалку туш. Радиоактивная загрязненность мяса после этого уменьшается. Некоторого снижения уровня радиоактивной загрязненности мяса можно достигнуть засолкой, при этом часть радиоактивных веществ распадется естественно, а часть перейдет в рассол.

Мясо животных, подвергшихся только внешнему облучению и убитых до появления признаков лучевой болезни или после клинического выздоровления, выпускают без ограничений, если оно отвечает другим санитарно-гигиеническим требованиям.

Если убой проводят на полевом убойном пункте, то его необходимо обеспечить достаточным количеством воды, оборудовать ямы для стока смывных вод и утилизации органов желудочно-кишечного тракта с содержимым и конфискатов, приготовить место для сбора и консервирования кож. Места, где производился убой животных, затем необходимо тщательно дезактивировать или оградить.

Кожу, снятые с животных, пораженных проникающей радиацией, а также загрязненные радиоактивными веществами ниже допустимого уровня, выпускают без ограничений.

Переработку жира-сырца, субпродуктов производят в соответствии с требованиями действующей технологической инструкции.

Молоко, полученное от коров, выпасаемых на загрязненных территориях, используют в цельном виде и для переработки в кисломолочные продукты только по разрешению органов санитарного надзора.

Технологические приемы переработки загрязненной радионуклидами продукции животного происхождения. Мероприятия, направленные на снижение опасности последствий радиоактивного загрязнения кормовых и пищевых продуктов, детально описаны в работах Н. А. Корнеева, А. Н. Сироткина, З. В. Дубровина, О. М. Белова, Г. С. Мешалкина,

Г. А. Донской. Эти приемы включают механическое удаление загрязнения с поверхности почвы, способы снижения перехода радионуклидов в растения, животных, продукцию животноводства, а также деконтаминацию пищевых и кормовых продуктов. Наиболее перспективными в области животноводства оказались технологические и кулинарные способы обработки продукции, снижающие содержание в ней радионуклидов. Так, после сепарирования цельного молока 85...90% стронция-90, йода-131, цезия-137 остаются в обрате и 8...16% — в сливках (А. Д. Белов, В. А. Киршин). Двух-трехкратная промывка сливок теплой питьевой водой и обезжиренным молоком снижает содержание в них стронция-90 еще в 50...100 раз. При переработке сливок в сливочное масло основная часть указанных радионуклидов переходит в пахту и промывные воды. Концентрация стронция-90, йода-131, цезия-137 в сливочном масле составляет 36, 76 и 49% концентрации радионуклидов в молоке. Очевидно, из загрязненного молока прежде всего целесообразно получать сливки и сливочное масло. Перетопка сливочного масла позволяет удалить из этого продукта практически полностью ^{90}Sr и ^{137}Cs и 10% ^{131}I . Переработка молока на сыры, творог, порошковое и сгущенное молоко, которые также могут быть подвергнуты длительному хранению, позволяет значительно снизить или исключить содержание в этих продуктах короткоживущих радионуклидов, например ^{90}Sr , ^{131}I и ^{140}Ba . Обезжиренное молоко, в котором остается основная часть радионуклидов, может быть использовано для получения белковых концентратов — творога и сыра.

По способности переходить из молока в творог при кислотном способе свертывания радионуклиды образуют следующий ряд: ^{131}I , ^{137}Cs и ^{90}Sr . После промывки кислотного сгустка происходит эффективное вымывание из него ^{131}I и особенно ^{137}Cs , тогда как ^{90}Sr остается в сгустке. В кислотный казеин из молока поступает 6,3...8,2% ^{90}Sr , 3,0...3,9% ^{131}I и лишь 1,0...1,6% ^{137}Cs . Из обезжиренного молока может быть выработан сыр типа коттедж, в который переходит лишь 2,7% ^{90}Sr и 1,1% ^{137}Cs . Концентрация радионуклидов в сыре соответственно в 1,9 и 6,2 раза меньше, чем в молоке (А. И. Ильенко).

Таким образом, замена в рационе молока, содержащего повышенные концентрации радионуклидов, полученными из него продуктами позволяет более чем в 10 раз снизить вклад радионуклидов в рацион человека. Переработка цельного молока в сметану и творог домашним способом исключает из питания человека до 63...82% содержащихся в нем ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{131}I , а переработка такого молока на творог и сыр заводским способом снижает содержание в рационе ^{90}Sr , ^{137}Cs — на 90%, а ^{131}I — на 70% (Г. С. Мешалкин, А. Д. Белов, В. А. Киршин).

Радиоизотопы цезия и йода находятся преимущественно в водной фазе молока, поэтому при получении масла и сыров они остаются в водной фазе. Стронций же, являясь аналогом кальция, в основном связан с казеином в виде казеинатфосфатного комплекса. Поэтому для очистки в молоке необходимо вначале разрушить этот комплекс путем подкисления лимонной или соляной кислотой. При сквашивании молока этот комплекс разрушается молочной кислотой, выделяемой молочнокислыми бактериями. При кислотном свертывании молока до 85% стронция удаляется с сывороткой, а при безкислотном сычужном свертывании молока с сывороткой удаляется не более 20% стронция и 80% его переходит в сыр. Удаление с сывороткой ^{131}I и ^{137}Cs практически одинаково как при сычужном, так и при кислотном свертывании молока. В полученном таким образом сыре остается в среднем 6% цезия и около 10% йода (Г. А. Донская).

Очистка молока от радионуклидов может быть проведена с помощью применения малорастворимых соединений щелочноземельных элементов, использования ионообменного метода и электродиализа. Так, применение пирофосфата в течение 1 сут позволяет удалить из молока до 83% стронция-90 без существенного изменения состава и свойств продукта. Один объем анионита Дауэкс 2Wx8 позволяет удалить свыше 95% ^{131}I из 230 объемов молока и примерно 50% ^{90}Sr . Такой прием позволяет с помощью одного объема катионита удалить около 70% ^{137}Cs из 30 объемов молока, при этом химический состав продукта практически не изменяется. Электродиализный метод очистки молока удаляет до 90% ^{90}Sr , 80% ^{140}Ba и 99% ^{137}Cs , а на электродиализной установке с анионообмен-

ными мембраной из молока может быть удалено 70...90% ^{131}I . Этот метод представляется перспективным для промышленного применения, так как характеризуется компактностью оборудования, простотой эксплуатации и эффективностью удаления радионуклидов из молока (Г. С. Мешалкин).

Хорошие результаты получают при использовании ионообменных смол-анионитов (КУ — 2...8 час, АВ — 17...8 час), которые удаляют до 90% цезия и йода и 60...65% стронция без ухудшения качеств молока. Селикагель удаляет из молока 80...90% цезия и йода и 30...40% стронция, цеолиты снижают загрязненность молока цезием на 90%.

Сорбенты на основе анионообменной целлюлозы ЦМ-А2 можно использовать как в промышленных условиях, так в индивидуальных хозяйствах. Они позволяют убрать из молока до 95% радиойода. Метод очень прост и технически выполняется добавлением в расчете на 1 литр молока 35...40 г данного сорбента прямо в ведро, через 15...30 мин перемешивания сорбент отделяют фильтрованием через слой ваты или лавсановую ткань. Сорбент в индивидуальных хозяйствах рассчитан на однократное использование, после чего его утилизируют как радиоактивные отходы (Г. А. Донская).

При обработке мясной продукции следует учитывать особенности распределения радионуклидов по разным органам и тканям. Например, концентрация ^{90}Sr в костной ткани свиней, получавших с рационом этот радионуклид, хронически превышает концентрацию в мягких тканях в 600...7000 раз. Нуклиды цезия и калий-40 концентрируются главным образом в мышцах. В ранние периоды после поступления радионуклидов во внешнюю среду наибольшая концентрация радиоактивного йода накапливается в щитовидной железе. С учетом указанных особенностей распределения радионуклидов при разделке животных часть продукции (мышцы, субпродукты) может быть использована непосредственно для пищевых целей, а другая (щитовидная железа, лимфатические узлы) выведена из пищевой цепи или подвержена выдержке для уменьшения концентрации короткоживущих радионуклидов. В последнем случае наиболее быстро содержание радионуклидов будет уменьшаться в субпродуктах, более медленно — в костях. Для снижения содержания радионуклидов

в костной ткани рекомендуется производить выварку ее в воде с добавлением соли (Г. С. Мешалкин). Переход ^{90}Sr из костей в бульон после хронического поступления радионуклида животным колеблется в пределах 0,009...0,18%, а при заправке животных перед убоем — 4...10% и более (З. В. Дубровина, О. М. Белова). Из костей коровы, которой был введен йод-131 за 2 недели до убоя, в бульон переходит $2,5 \pm 0,2\%$. Выварка рутения-106 из костей козы, затравленной за 8 сут до убоя, не превышает 33%, а из костей разных животных в бульон переходит 67...80% цезия-137.

В процессе варки мяса, полученного от 7-месячного бычка, в бульон переходит $57 \pm 11\%$ ^{90}Sr , а после добавления в воду кислот (лимонной или молочной) выварка увеличивается до 76...85%. Примерно столько же ^{90}Sr переходит из мяса в бульон у кур, получавших радионуклид в течение 1 мес. При этом 50...60% радионуклида, накопленного в мясе, переходит в бульон в течение первых 10 мин варки и может быть удалено с образовавшимся бульоном (З. В. Дубровина, О. М. Белова).

Выварка цезия-137 не связана с длительностью заправки и видом животных, но имеет тенденцию к увеличению у взрослых животных по сравнению с молодыми. Так, из мяса телят, козлят и поросят после варки в бульон переходит 77...81% цезия-137, а из мяса взрослых животных — 85...87%, что позволяет снизить концентрацию цезия в варенном мясе в 3...6 раз по сравнению с сырым продуктом. Аналогичные данные получены для рыб и кроликов (А. Г. Папуло, Е. Г. Речина).

Снизить концентрацию радионуклидов в мясе можно длительным хранением его в засоленном виде и после вымачивания солонины. Применение этих технологических приемов (четыре обработки со сменой рассола) снижает концентрацию цезия-137 в мышечной ткани на 63...99%, причем эти значения зависят от размеров нарезанных кусочков мышечной ткани, числа обработок проточной водой, длительности вымачивания и отношения твердой и жидкой фаз. Перетопка сала сопровождается переходом свыше 95% цезия-137 в шквару, в результате чего концентрация этого радионуклида в топленном жире снижается почти в 20 раз и становится примерно в 100 раз меньше, чем в мышцах (Г. С. Мешалкин).

ОСОБЕННОСТИ ВЕДЕНИЯ ЖИВОТНОВОДСТВА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Радиоактивное загрязнение долгоживущими искусственными радионуклидами на территории Крайнего Севера обусловлено испытанием ядерного оружия, плановыми и аварийными выбросами радиоактивных веществ при проведении подземных ядерных взрывов, выбросом радиоактивных веществ при авариях на атомных объектах. Кроме того, немаловажную роль в загрязнении окружающей среды Севера играет естественная радиоактивность, которая связана с разработкой месторождений полезных ископаемых, содержащих аномальное количество естественных радионуклидов, а также месторождений самих естественных радионуклидов.

Из продуктов питания местного производства самое высокое содержание искусственных радионуклидов регистрируется в органах и тканях северного оленя, которое в десятки раз выше, чем в говядине и конине в этих же регионах.

Основным источником поступления радионуклидов в организм северного оленя являются лишайники, которыми олень питается в основном в зимнее время. В некоторых регионах доля лишайников в рационе оленя остается высокой и в летний период. Лишайники, в силу своих биологических особенностей, способны аккумулировать различные радионуклиды из внешней среды и являются, по сути, индикаторами радиоактивного загрязнения окружающей среды. Потребление оленины на Севере некоторыми группами коренного населения составляет 80...100% от всего потребляемого мяса. Это говорит о присутствии на Крайнем Севере радиоэкологической цепочки «лишайники — северный олень — человек».

Наблюдения за радиоактивным загрязнением внешней среды, начатые в конце 1950-х годов, выявили некоторые особенности поведения долгоживущих искусственных радионуклидов в условиях Севера. Так, обнаружилось, что содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме северных оленей и коренных жителей приарктических районов России, Аляски, Канады и Скандинавских стран оказалось более высоким по сравнению с другими живыми существами, обитающими в средних широтах Северного полушария. Приоритет открытия арктической (северной) цепочки «лишайник — олень» принадлежит

американским исследователям, которые обнаружили на Аляске в 1959 г. повышенное содержание искусственных радионуклидов в оленине и лишайниках (Н. Е. Palmer, W. S. Hanson, B. J. Griffin, W. S. Roesch, 1963). Впервые факт обнаружения повышенного содержания ^{137}Cs у коренных жителей Крайнего Севера, питающихся оленями, признается за объединенной группой ученых из Скандинавских стран, которые в конце 1960 — начале 1961 г. измерили содержание ^{137}Cs в организме финских лопарей (J. K. Mittinen, A. Jokilainen, P. Koine, K. Liden, Y. Naversten, 1963; K. Goran, K. Svenson, K. Liden, 1965). В СССР на повышенное содержание искусственных радионуклидов глобального происхождения в лишайниках и оленине обратили внимание еще в 1958–1959 гг., а первые измерения уровня ^{137}Cs в организме оленеводов были проведены в начале 1962 г. в Ленинградском институте радиационной гигиены.

Дальнейшие исследования показали, что в северной цепочке наряду с ^{137}Cs в повышенных концентрациях присутствует ^{90}Sr и природные радионуклиды ^{210}Po и ^{210}Pb .

Огромный вклад в проблему изучения закономерностей миграции радионуклидов на Крайнем Севере СССР внесли такие ученые, как М. Н. Троицкая, А. И. Нижников, М. С. Ибатулин, В. В. Колесников, Б. Я. Литвер, Л. А. Теплых, Д. И. Бельцев, А. А. Моисеев, П. В. Рамзаев, М. А. Невструева, Г. Г. Воккен, Е. К. Лобова, В. А. Горев, Э. М. Кирсюк, Э. П. Лисаченко, И. М. Дмитриев, И. Кадыков и др.

ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Большая часть территории Крайнего Севера характеризуется резко выраженной континентальностью климата, за исключением островов и узкой прибрежной полосы северных морей, где континентальность проявляется слабее. В формировании климата определяющую роль играет сибирский антициклон, не имеющий себе равного в мире по высоте показаний барометра и устойчивости режима. Почвы зимой сильно подмерзают, накапливая большой запас холода. По ресурсам тепла в вегетационный период выделяются три агроклима-

тических района: очень холодный, холодный и умеренный агроклиматический.

Почвы на Севере представлены очень большим разнообразием, а некоторые из них являются эндемиками. Почвы можно подразделить на следующие группы:

- 1) таежные палевые мерзлотные;
- 2) таежные мерзлотные оподзоленные;
- 3) переходные от лугово-болотных к таежным палевым;
- 4) перегнойно-карбонатные мерзлотные;
- 5) лугово-черноземные мерзлотные;
- 6) лугово-болотные;
- 7) солонцы и солончаки;
- 8) почвы северной тайги и тундры;
- 9) горные почвы.

Специфические почвенно-климатические условия, большая протяженность с севера на юг и с востока на запад, неоднородность рельефа обуславливают значительное разнообразие растительного покрова и смену зональных растительных ассоциаций. На Севере выделяют две ботанико-географические зоны: тундровая и таежная, а также несколько подзон, границы между которыми не всегда четко прослеживаются.

Зона тундр на территории Севера занимает значительную площадь, простираясь полосой вдоль побережья северных морей и на островах. Зона тундр подразделяется на подзоны: южная арктическая, северная субарктическая, средняя субарктическая и южная субарктическая. Флора всех подзон тундры характеризуется произрастанием следующих видов растений: мхи и лишайники, отличающиеся рядом общих эколого-биологических особенностей (крайне медленным ростом, способностью к сплошному обрастанию субстрата и образованию ковров, значительной независимостью от химических свойств субстрата); кустарнички и низкие кустарники — гипоарктические, бореально-гипоарктические и арктоальпийские, большей частью олиготрофные и обладающие широкой экологической амплитудой (они могут произрастать при резко различающейся увлажненности субстрата); травянистые растения, образующие антагонистическую группу по отношению к двум первым.

Переход от тундровой зоны к таежной не везде выявляется вполне отчетливо, так как притундровое редколесье местами разделяется безлесными возвышенностями, а в долинах рек леса заходят далеко.

В северной лесной зоне среди лесной растительности господствуют лиственничные леса, представленные лиственницей даурской, наиболее приспособленной к суровому климату и близкому подстиланию многолетнемерзлотных пород. В горно-таежных районах широко распространены лишайники: бруснично-лишайниковый, бруснично-лишайниковый с ерником и кедровым стлаником и др. Они образуют основной фонд пастбищ северного оленя в северо-таежных лесах.

Для южных лесов Крайнего Севера также характерно преобладание лиственничных лесов. Они встречаются в смеси с сосняками, которые развиты на песчаных почвах. В группе сосняков преобладают лишайниковые, растущие на повышенных участках водоразделов, песчаных реках, по берегам озер и окраинах массивов полузакрепленных песков. Березняки приурочены к поймам рек и приозерным участкам. В долинах горных рек довольно широко распространены чернозель и тополь душистый. Мхи и лишайники играют значительную роль в напочвенном покрове. Лишайники представлены в основном кустистыми кладониями.

ВИДОВОЙ СОСТАВ ЛИШАЙНИКОВ И ДРУГИХ РАСТЕНИЙ

Суровый климат накладывает свой отпечаток на флору Крайнего Севера. Характерной особенностью северных растений является их низкорослость, корневая система расположена поверхностно из-за близкого подстилания многолетнемерзлотных пород. Здесь преобладают многолетники, наиболее полно использующие короткий вегетационный период.

Кормовое значение для северного оленя имеют около 400 видов растений. К кормовой флоре относятся кустистые кормовые лишайники (58 видов), известные под названием ягеля, кустарниковые ивы и березы (44 вида), осоковые (34 вида), злаки (52 вида), в меньшей степени бобовые (24 вида) и ряд

других семейств (170 видов), в их числе сложноцветные (34 вида), гречишные (15 видов), хвощи (7 видов).

Лишайники служат основным кормом северному оленю в зимнее время, а также составляют существенную часть рациона в бесснежное время. Из 16 тыс. 600 видов лишайников олени поедают 95 видов, но наибольшее кормовое значение имеют не более 20 видов. Лучшими и наиболее поедаемыми видами служат кустистые кладонии: оленья (*Cladonia rangiferina*), лесная (*Cladonia sylvatica*), альпийская (*Cladonia alpestris*), мягкая (*Cladonia mitis*). Благодаря широкому распространению они составляют в западных районах Севера 85...90% общего количества поедаемого оленем ягеля, в восточных районах — 75...80%.

Кроме кладоний, олени поедают и некоторые цетрарии: кукушечью (*Cetraria cucullata*), снежную (*Cetraria nivalis*), исландскую (*Cetraria islandica*). В западных районах Крайнего Севера в рационе оленя цетрарии составляют 2...5%, в восточных — 10...20% всего количества поедаемых лишайников. Местами они образуют значительные запасы кормов. По химическому составу они близки к кладониям, однако содержат значительно больше жира (до 10%).

Особую роль играют бородатые (эпифитные) лишайники, растущие в большом количестве на коре деревьев в северных редколесьях. Хорошим кормом служат: алектория вороненая (*Alectoria chalybeiformis*), гривистая (*A. julata*), уснея густобородатая (*Usnea dasypoga*). Эти лишайники становятся наиболее ценным кормом в периоды, когда олень не может раскопать наземный ягель, особенно в период гололеда. Запасы бородатых лишайников достигают 63...85 кг/га. По питательной ценности эпифитные лишайники превосходят кладонии и цетрарии и содержат до 8% протеина и 9% жира.

Общий запас кормовых лишайников достигает максимума в лесотундре, далее к северу площади, занимаемые ягелями, сокращаются, а запасы их уменьшаются.

Обычно ягель составляет около 2/3 всего количества кормов, потребляемых оленем на пастбищах в течение года. Несмотря на свою кормовую неполноценность (небольшое содержание белков и минеральных веществ) ягель представляет собой важнейший источник углеводов, почти полностью

усвояемых оленем, кроме того, он широко распространен и легко доступен для оленя.

Грибы являются ценным питательным и витаминным кормом для северного оленя. Наибольшее кормовое значение имеют шляпочные грибы: подберезовик (*Bjletus scaber*), подосиновик (*B. vertisipallis*), белый гриб (*B. edulis*), волнушка (*Lactarius torminosus*) и сыроежка (*Rossula* sp.) и др.

Урожайность грибов сильно колеблется из года в год и составляет от 10 до 100 кг/га. При обилии грибов олени быстро нажировываются, так как грибы обладают очень высокой питательной ценностью. Больше грибов в лесной и лесотундровой зонах, меньше — в арктических и горных тундрах.

Летне-зеленые корма содержат все питательные вещества и витамины, необходимые для северного оленя. В летнее время олень поедает более 350 видов различных растений. Однако степень их использования крайне низкая. Олень любит свежую нетронутую зелень, ест на ходу и долго на одном месте не задерживается. На пастбищах олень очень разборчив: одни растения поедает целиком, у других — лишь листья, цветы или плоды.

НАКОПЛЕНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ¹³⁷Cs И ⁹⁰Sr В ЛИШАЙНИКАХ

Лишайники, в силу своих биологических особенностей способны аккумулировать радионуклиды из внешней среды в больших количествах. По удельной радиоактивности лишайники в десятки раз превосходят травы. Лишайники произрастают в течение длительного времени. Например, ветвистый лишайник высотой 6 см имеет возраст около 50 лет. Кроме того, их сорбционная поверхность на единицу массы, за счет открытых микроскопических нитей гриба, в десятки раз больше, чем у других растений. Так, у ветвистых лишайников поверхность достигает 4000 см²/г, в то время как, например, у злаковых при диаметре органов 1 мм она составляет 40 см²/г; для листьев — 200 см²/г. Большое значение имеет и тот факт, что каждая веточка лишайника представляет собой сплетение нитей гриба с вкрапленными между ними клетками водоросли, причем благодаря «пористой» структу-

ре вся поверхность микроскопических нитей обладает высокой способностью к сорбции. Также лишайники характеризуются чрезвычайно низким метаболизмом, их рост составляет 0,5...3 мм в год, поэтому изучение накопления радионуклидов в слоевищах лишайников тем более важно, что во многих северных биогеоценозах они составляют основу растительного покрова, а в трофическом звене «лишайник — северный олень — человек» именно лишайники первично сорбируют и продолжают длительное время удерживают радионуклиды.

Экспериментально было показано, что разные виды и экологические группы лишайников способны неодинаково накапливать радионуклиды. Так, если сравнивать накопление радионуклидов в слоевищах различных экологических групп лишайников, то ^{90}Sr преимущественно сорбируется эпифитными видами лишайников (произрастающими на деревьях), а ^{137}Cs — эпигейными (напочвенными) видами. В целом, по степени накопления ^{90}Sr лишайники располагаются в ряду «эпифиты — напочвенные — эпилиты», а по ^{137}Cs в ряду «напочвенные — эпилиты — эпифиты». Более того, слоевища одного вида, собранные с разных субстратов (гранит и сосна), по-разному накапливают радионуклиды.

Исследования, проводимые в условиях природных биогеоценозов Якутии, также показали, что содержание ^{137}Cs в напочвенных лишайниках на порядок величин выше, чем ^{90}Sr . Различия по содержанию радионуклидов в лишайниках разных видов составляли 2...3 раза, а в идентичных видах из разных растительных сообществ — 1,5...2 раза. Наиболее эффективно оба радионуклида накапливаются в слоевищах напочвенных видов *Cladonia amaurocraea* и *Cetraria cucullata*. Эпифитные лишайники у трех изученных видов рода *Usnea* из растительных сообществ по содержанию ^{90}Sr достоверно различаются в 2,0...2,5 раза, а цезия-137 — в 1,5...2,8 раза. Отношение $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ для напочвенных видов лишайников в среднем составляет 2,5...9,3, а у эпифитных сдвигается до 1,5. К примеру, установленное в выпадениях соотношение этих радионуклидов равно 1,3...1,6, а в почве из-под лишайникового покрова — 0,9...1,6 (Н. П. Лысенко, А. Г. Павлов, 2000).

Необходимо знать, что в накоплении радионуклидов отдельными видами лишайников огромное значение имеет

биомасса вида. Так, например, в лишайниковой синузии листовничника около 93% радионуклидов аккумулируют два доминирующих по биомассе (26,0 ц/га) вида — *Cetraria cucullata* и *Cladonia rangiferina*.

Большой интерес представляет изучение характера вертикального распределения радионуклидов в слоевищах лишайников. На примере напочвенных видов было установлено, что ^{90}Sr распределяется довольно равномерно по всему слоевищу лишайника. В то время как ^{137}Cs накапливается преимущественно в верхушках талломов (более молодых частях слоевищ). Этот факт представляется весьма важным, т. к. северные олени при пастыбе стравливают только верхнюю часть ягеля. Концентрация его в основании слоевищ обычно в 2,0...2,5 раза меньше. Для рода *Cladonia* соотношение между ^{137}Cs и ^{90}Sr в 1964 г. для верхней части этого лишайника было равно 10, а для основания — лишь 2,8, а для вида *Cetraria cucullata* соотношение 12,2 в верхней части сдвигается к основанию растений до 7,9. Это происходит за счет уменьшения содержания ^{137}Cs в основании лишайника, в то время как ^{90}Sr довольно равномерно распределяется по высоте лишайников. Исследования, проведенные в 1998–1999 гг. в Якутии, показали: наибольшая удельная активность ^{137}Cs достоверно регистрировалась в верхней трети слоевищ, которая до 7,2 раза была выше, чем в средней и нижней трети лишайника соответственно. Отношение $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ для верхней трети лишайников колебалось от 4,7 до 10,3, для основания — от 0,9 до 5,3 (Н. П. Лысенко, А. Г. Павлов, 2000), табл. 20.

Удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в лишайниках в 1965 г. была максимальной. По результатам исследований, проведенных в Мурманской области и Якутии, к 1965 г. наметился достоверный спад. Однако динамика изменения удельной активности радионуклидов в лишайниках проходило с периодом полураспада порядка 4...5 лет, но этот период со временем имеет тенденцию к увеличению. По-видимому, по мере уменьшения выпадений в загрязнении лишайников заметную роль начал играть почвенный механизм поступления радионуклидов.

Лишайники не имеют корней, слоевище напочвенных кустистых лишайников состоит из мертвой и живой частей.

Таблица 20

Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в слоевищах эпигейных лишайников

Вид	Часть растения	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$
Cladina rangiferina (Олекминский улус)	Верхушка	297 ± 45	29 ± 7	10,3
	Середина	122 ± 27	24 ± 5	5,0
	Основание	147 ± 15	28 ± 6	5,3
Cladina stellaris (Олекминский улус)	Верхушка	385 ± 37	48 ± 11	8,0
	Середина	280 ± 11	45 ± 10	6,2
	Основание	104 ± 9	58 ± 14	1,7
Cetraria cucullata (Томпонский улус)	Верхушка	280 ± 21	30 ± 7	9,3
	Середина	97 ± 15	26 ± 9	3,7
	Основание	65 ± 17	25 ± 5	2,6
Cladina rangiferina (Томпонский улус)	Верхушка	279 ± 78	47 ± 15	5,9
	Середина	57 ± 15	49 ± 7	1,1
	Основание	38,6	40 ± 16	0,9
Cetraria cucullata (Нижнеколымский улус)	Верхушка	290 ± 23	34 ± 7	8,4
	Середина	105 ± 22	32 ± 7	3,3
	Основание	80 ± 11	33 ± 9	2,3
Cladina rangiferina (Нижнеколымский улус)	Верхушка	269 ± 35	57 ± 11	4,7
	Середина	217 ± 26	45 ± 13	4,8
	Основание	93 ± 23	51 ± 13	1,8

Примечание. Данные приводятся в Бк/кг воздушно-сухого вещества.

Живая часть растений состоит из живых клеток водорослей и гриба, мертвая часть подециев, вследствие гибели обоих компонентов, имеет более темный цвет. Нижняя часть подециев ягеля отличается от верхней меньшим содержанием протеина, большим содержанием клетчатки и золы. Лишайники обладают очень большой влагоемкостью, причем мертвая часть подециев отличается меньшей влагоемкостью, чем живая. Поэтому почвенная влага с растворенными в ней веществами впитывается лишайниками, как губкой, причем мертвая часть подециев служит связующим звеном между почвой и живой частью. Роль мертвой части подециев в питании лишайников представляет большой интерес.

Некоторые исследователи утверждали, что субстрат является лишь местом прикрепления для этих растений и не играет существенной роли в их питании, однако имеется ряд доказательств, свидетельствующих о важности роли субстрата в жизни лишайников. Б. И. Гроднов в 1936 г. в своей работе показал, что количество и качество химических веществ в лишайниках тесно связано с составом субстрата. Проведенные Т. А. Работниковым исследования в Южной Якутии показали, что кустистые лишайники не развиваются на молодых гарях. Исследователь объясняет это тем, что в почве отсутствуют необходимые для развития этих растений органические вещества, сгоревшие при пожаре. В опытах, проведенных Э. А. Башковой на кладонии оленьей (*Cladonia rangiferina*) в лабораторных и природных условиях, доказано, что субстрат не безразличен для жизнедеятельности кладоний и что этот лишайник поглощает питательные вещества через мертвую часть подцеиев. На субстрате, обогащенном питательными веществами, рост подцеиев ускоряется, внутри растений наблюдается интенсивное развитие водорослевого компонента.

Логично предположить, что с почвенной влагой в лишайники поступают растворенные в ней радионуклиды. Это указывает на почвенный механизм поступления радионуклидов в лишайники.

Проведенные исследования показали, что в лишайники в течение месяца из почвы переходит до 0,17% ^{137}Cs , в то время как у трав за весь вегетационный период из почвы поступает лишь 0,01% этого радионуклида (М. Н. Троицкая, П. В. Рамзаев, А. А. Моисеев и др., 1971).

Почвенный механизм поступления радионуклидов в лишайники еще плохо изучен и требует дальнейшего рассмотрения, т. к. имеется множество факторов, влияющих на переход радионуклидов в этом начальном звене миграции. К таким факторам можно отнести различную миграционную способность радионуклидов в почвах и лишайниках; многообразие видового состава лишайников и различную их способность в накоплении радионуклидов; различные свойства субстратов, на которых произрастают лишайники; влияние природно-климатических факторов и др. Все эти вопросы требуют детального подхода и изучения.

ФИЗИОЛОГИЯ И РАЦИОН СЕВЕРНОГО ОЛЕНЯ

Северный олень (*Rangifer tarandus*) относится к отряду парнокопытных, подотряду жвачных, семейству плотнорогих, или оленей (*Cervidae*). Он хорошо приспособлен к существованию в суровых арктических условиях. Жизнь на Крайнем Севере выработала у северного оленя ряд особенностей. Важнейшей из них является приспособленность к питанию зимой. Приспособленность оленя к северным кормам отразилась на анатомо-физиологических особенностях его пищеварительной системы. Как и другие жвачные, северный олень имеет четырехкамерный желудок. Объем рубца составляет 30 л, сычуга — 1,5 л, кишечник достигает 25 м.

Пищеварительный тракт оленя развит слабее, чем у других жвачных, стенки кишечника обладают более нежным строением, пищеварительные процессы идут менее интенсивно. Это является результатом питания лишайниковым и свежим зеленым кормом.

Северные олени круглогодично выпасаются на подножных кормах и поедают более 400 видов растений. В зависимости от сложившегося рациона у различных отродий оленей соотношения между зелеными и ягельными кормами существенно различаются (табл. 21).

В районах, достаточно обеспеченных ягелем и зелеными кормами, преобладает обычный тип; в местностях с избытком запаса ягеля и недостатком зеленых кормов — высокоягельный; в районах с обильным запасом зеленых кормов на летовках и зимних пастбищах и отсутствием или ничтожным запасом ягеля — малоягельный тип.

Таблица 21

Состав пастбищных кормов северного оленя (%)

Корм	Домашний олень						Дикий олень	
	Обычный		Высокоягельный		Малоягельный		Зима	Лето
	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	лето		
Ягель	70	5	95	20	5	—	30	5
Зеленые корма	30	95	5	80	95	100	70	95

Однако установлено, что большое влияние на структуру рациона оказывает не только место выпаса, но и породный состав оленей. У отдельных пород (отродий) выработались свои рационы. Разводимые в Якутии эвенские и чукотские (харгин) олени при зимнем выпасе в аналогичных условиях и на одинаковых пастбищах имели разный состав кормов в рубцовом содержимом. Так, у эвенских оленей присутствовало: 51% лишайников; 23,7% зеленых растений и сухих трав; 6,9% ветоши и 11,6% посторонних примесей. В отличие от них, в рубце харгинов (чукотских оленей) содержалось: ягеля — 11,2...23,1%, зеленых растений и ветоши — 60...81%. Для примера, установлено, что в Мурманской области удельный вес лишайников составляет 85%, зеленых травянистых растений — 4,3%, некормовых примесей — 8,2%.

Олени харгин придерживаются тундровых участков, где снег тоньше, хотя и плотнее, но больше подснежной зелени. Эвенские олени выпасаются в основном в лесотундре и горно-тундровых районах, где лишайники составляют основу фитоценоза. Особенности рационов отдельных отродий оленей сложились исторически и в какой-то мере, очевидно, закреплены генетически. Харгин приобрел способность к преимущественному питанию в зимнее время травами и ветошью в результате содержания ряда его поколений на тундровых малоягельных или безъягельных пастбищах. У эвенских оленей способность к большему использованию ягеля сложилась в результате длительного периода содержания на богатых ягелем лесных пастбищах.

Состав поедаемых кормов зависит от сезона года, от характеристики пастбищ, запасов и доступности на них кормов. Из-за недостатка зимне-зеленых кормов на пастбищах в рационе оленя преобладают лишайники. Большему поеданию лишайников также способствуют глубокий снежный покров и его плотность.

Питание оленей напрямую связано со временем года. С октября и до конца мая олени добывают корм из-под снега, глубина которого колеблется от 20 до 120 см. Поздней осенью и в начале зимы, когда снег еще рыхлый, олени поедают зеленые части пушиц, осок, хвощей, сухие листья вейника, дудника лесного и др. С начала декабря до середины апреля олени пере-

ходят в основном на мелкокочковатые багульниково-лишайниковые и бугристо-мочажинные болота и листовничные редколесья, отличающиеся обильным произрастанием лишайников. В среднем олень в таежной зоне поедает за сутки в зимнее время 5,1...5,4 кг воздушно-сухого лишайника и 300...450 г подснежной травы. Примечательно, что при стравливании лишайника олень поедает его только на 32...50% от его высоты, т. е. верхнюю, более нежную и молодую его часть. Это способствует быстрому восстановлению лишайникового покрова.

Из зимне-зеленых растений наибольшее значение имеет пушица влагалищная, арктагросис широколистный, осока прямостоячая, лисохвост луговой и др. Эти растения обычно съедаются оленем на 20...50% от их высоты.

В третьей декаде апреля и в течение мая, из-за уплотнения снега и недоступности зеленых кормов, олень переходит на сухие травы и лишайники, произрастающие на обнаженных от снега буграх. В это время содержимое рубца составляют: лишайники — 44,6%, сухие осоки, пушицы, злаки, листья кустарников — 40,3%, зеленые травы — 4,3%, не кормовые примеси — 10,8%. В сутки олень потребляет 4,3...5,2 кг ягеля. В это время олень стравливает ягель более чем на половину его высоты (на доступных участках 60%, на малодоступных — 73...80%).

Большую роль ранней весной играют эпифитные лишайники, растущие в большом количестве на коре деревьев в северных редколесьях. Эти лишайники становятся наиболее ценным кормом в периоды, когда олень не может раскопать наземный ягель, особенно в период гололеда.

В летний период основную часть рациона оленей составляет зелень, причем значительная доля приходится на кустарники. Разнотравье составляет 23...44%, кустарники — от 13 до 75%, злаки и осоки — от 2 до 17%. Лишайники в рационе составляют от 0 до 20% (в среднем 16%). Количество зеленых мхов и примесей незначительно. За сутки олень съедает 17...22 кг зеленой массы, что в пересчете на воздушно-сухое вещество равно 4,3 кг.

По данным М. Я. Аксеновой, в стойле взрослый олень (бык-кастрат) за сутки съедает 7,9 кг листвы березы (2,6 кг воздушно-сухого вещества). Анализ рубцового содержимого

у оленей таежной зоны в июне показал, что листва берез составляет 25...35% от содержимого, в тундровой зоне она не превышает 8,8%.

Осенью в рационе начинает преобладать лишайниковый корм, в основном это кустистые виды рода *Cladina* и листоватые рода *Cetraria*. В среднем лишайниковый корм составляет 52,2% (25...78%). Особенно много ягеля потребляют в это время животные, пасущиеся в лесной зоне. Значительным остается участие кустарников и зеленых травянистых растений (36,1%). Поздней осенью с отмиранием зеленых частей кустарников и травянистых растений в рационе оленя возрастает доля хвощей.

Грибы в рационе оленей, при хорошем их урожае осенью, составляют основу рациона, а в годы неурожая могут отсутствовать в рационе и вовсе. Особенно много грибов потребляют олени, пасущиеся в лесной зоне. Грибы являются для оленей ценным питательным и витаминным кормом.

Следует отметить, что характерным является наличие в рационе северных оленей в раннеосенний и позднеосенний сезоны хвои лиственницы, которая может составлять 4...8%.

Маршруты выпаса северных оленей планируются с учетом результатов исследования кормовых ресурсов.

Важнейшие показатели этого исследования таковы: запас кормовой массы, его ботанический состав и кормовая ценность, распределение по территории, степень доступности, количественные и качественные изменения кормового запаса по сезонам и скорость его восстановления, возможная нагрузка на пастбище, оптимальный и доступный сезоны их использования. Располагая этими данными, можно организовать в хозяйстве рациональное научно обоснованное использование кормовых ресурсов.

ПОСТУПЛЕНИЕ ^{137}Cs И ^{90}Sr В ОРГАНИЗМ СЕВЕРНОГО ОЛЕНЯ

Содержание ^{137}Cs в мышечной ткани оленей сильно варьирует в зависимости от географического места обитания животных. Максимальные значения (до 117 нКи/кг) отмечены в конце 1964 — начале 1965 г. в Мурманской области (Ловозерский район). В то же время на севере Якутии (район Оетунг-Чокур-

дах) уровни загрязнения были минимальными (в 5...7 раз ниже). В 1998 г. в пределах Якутии содержание ^{137}Cs в мышечной ткани северных оленей, содержащихся в разных районах, различалось до 3,5 раза. По содержанию ^{90}Sr в костной ткани различия были менее выражены (до 1,5 раза). В то же время уровни загрязнения верхнего слоя почв (5 см) с находящейся на ней растительностью существенно не различались (не более 2 раз). Это говорит о том, что вариации значения удельной активности ^{137}Cs в оленине нельзя объяснить только различиями в выпадениях. Еще в конце 1965 г. был найден высокий коэффициент корреляции между удельной активностью ^{137}Cs в оленине и лишайниках ($0,87 \pm 0,10$). Далее была выявлена взаимосвязь между содержанием ^{137}Cs в оленине и долей содержания лишайников в рационе животных.

Одной из характерных особенностей уровня содержания ^{137}Cs в оленине является резко выраженная сезонность. Максимальный уровень наблюдается в конце зимнего выпаса (май). В летнее время при выпасе оленей на травах концентрация ^{137}Cs в организме оленя уменьшается в 10...20 раз. В начале сентября с переходом оленей на лишайниковые пастбища удельная активность ^{137}Cs начинает возрастать.

Сезонный эффект (18-кратный спад удельной активности) отмечен в 1964 г. в Коми с последующим подъемом к началу 1965 г. до исходного уровня. Десятикратный спад отмечен на Аляске, восьмикратный — в Финляндии, трех-пятикратный — в Швеции. По данным исследований, проведенных в Якутии в 1998–1999 гг., наблюдался спад активности по ^{137}Cs в 1,5 раза. По содержанию ^{90}Sr в костной ткани сезонный эффект был менее выражен (Н. П. Лысенко, А. Г. Павлов, 2000).

Сезонность многих процессов вообще характерна для организма северного оленя (от переломов костей к концу зимы до морфологических изменений во внутренних органах в зависимости от времени года).

Резко выраженные сезонные колебания удельной активности ^{137}Cs в оленине дают основание говорить о наличии двух причин. Во-первых, существенного сезонного изменения уровня радиоактивного загрязнения кормов (в рационе оленя в летнее время практически отсутствуют лишайники). Во-вторых, короткого биологического периода полувыведения ^{137}Cs из

организма оленей. Хотя сезонный эффект является фактом, он не всегда ярко выражен. Например, в Мурманской области, в отличие от Коми, олени питаются лишайниками не только зимой, но и летом, и сезонность содержания ^{137}Cs у них выражена менее ярко.

Биологический период полувыведения ($T_{\text{биол}}$) ^{137}Cs из организма северного оленя можно оценивать на основании данных об изменении удельной активности ^{137}Cs в мышцах оленя по сезонам года: 18-кратное снижение этого показателя за 3 месяца летнего времени в Коми соответствует $T_{\text{биол}}$, равному 22 суткам (М. Н. Троицкая, П. В. Рамзаев, А. А. Моисеев и др., 1971).

В опытах, проведенных зарубежными исследователями, показано, что при однократном введении радионуклида в организм северного оленя биологический период полувыведения радиоактивного цезия из организма 9 оленей составил в среднем 33 дня. Другим автором приводится значение $T_{\text{биол}}$, равное одному месяцу. Анализируя данные о динамике удельной активности глобального ^{137}Cs в мышцах оленей, Лиден и Густавсон получил $T_{\text{биол}} = 27 \pm 5$ суток (K. Liden, M. Gustafsson, 1967).

Изучение закономерностей накопления и выведения ^{137}Cs у оленей при выпасе их в осенне-зимний и весенний периоды на пастбищах тундры показали, что ^{137}Cs по органам и тканям северных оленей распределяется неравномерно. Хотя ^{137}Cs считается равномерно распределенным изотопом, это верно лишь с 2...3-кратной ошибкой. Так, концентрация изотопа, рассчитанная на весь организм, примерно в два раза меньше, чем его концентрация в мышцах. Концентрация его в крови в 9 раз меньше, чем в мышечной ткани, концентрация ^{137}Cs в которой принята за 100%. Вследствие короткого эффективного периода полувыведения ^{137}Cs из организма оленей равновесное состояние по ^{137}Cs у них наступает сравнительно быстро (через 25...30 дней), и поэтому о концентрации цезия-137 в мышцах и внутренних органах можно судить по удельной активности крови. Количество цезия-137, обнаруженное в 500 мл крови и умноженное на 20, будет характеризовать концентрацию ^{137}Cs в килограмме мышечной ткани (П. В. Рамзаев, М. С. Ибатулин, Э. М. Крисюк и др., 1971).

Зависимость содержания ^{137}Cs от сезона года необходимо учитывать, и пренебрежение этим фактором может привести к ошибочным данным. В зимнее время организм оленя находится в состоянии равновесия в отношении ^{137}Cs , поэтому, зная его концентрацию в какой-либо одной ткани, можно по типу распределения предсказать концентрацию в другой ткани.

Стронций-90 концентрируется преимущественно в костях, однако в пересчете на стронциевые единицы (с. е.) его концентрация во всех органах и тканях оленя (мышечная ткань, печень, сердце, почки, кости, рога) одинакова.

Д. И. Бельцевым, Л. А. Теплых и Е. К. Лобовой доказана возможность прижизненного измерения ^{90}Sr в скелете северного оленя по анализу рогов. Анализ же других органов и тканей на ^{90}Sr не имеет значения с радиобиологической и гигиенической точки зрения, так как в мышцах и других органах его концентрация в 1000 раз меньше, чем в костях. Стронций-90 в органах и тканях, в том числе в костной ткани и рогах оленя, распределяется после достижения равновесия пропорционально концентрации в них кальция. В золе мышечной и костной ткани оленя содержится 0,5% и 40% кальция соответственно, что позволяет при жизни оленя по концентрации ^{90}Sr в рогах определить концентрацию ^{90}Sr в других органах и тканях.

Поступление и поведение ^{90}Sr и ^{137}Cs в организме северного оленя в настоящее время еще недостаточно изучено по сравнению с крупным рогатым скотом, овцами и другими сельскохозяйственными животными. Изучение северного оленя сопряжено с определенными трудностями, связанными с невозможностью содержания их в лабораторных условиях. В природных условиях исследование этого животного не дает окончательных результатов, т. к. ареал разведения оленей очень велик и отличается большим разнообразием природных условий. В связи с этим отмечается чрезвычайное разнообразие в рационе оленей доли лишайников, которая может варьировать от 0 до 70%. Более того, имеются существенные различия в физиологии питания между различными породами домашних северных оленей при выпасе в одинаковых условиях. Дикие олени также отличаются от домашних по содержанию в рационе лишайников и других растений.

Исследования, проводимые в Якутии в 1998–1999 гг., показали, что наибольшее среднее значение коэффициента перехода (КП) ^{137}Cs в зимний период наблюдается у эвенского оленя, выпасающегося в северной тайге (17% от суточного поступления с кормом). У эвенкийского и чукотского оленей, которые выпасаются в южной тайге и тундре, средний КП ^{137}Cs составил 13,9% и 13,5% от суточного поступления соответственно. Различия среднего значения КП ^{90}Sr в костную ткань оленей в зимний период было менее выраженным и составило 267,4%, 259,3% и 251,8% у эвенского, эвенкийского и чукотского оленей соответственно.

В летний период КП ^{137}Cs в мышечную и ^{90}Sr в костную ткань оленей был достоверно выше, чем зимой, в среднем в 2,2 и 1,2 раза по ^{137}Cs и ^{90}Sr соответственно.

Наибольший КП ^{137}Cs в мышечную ткань оленей в зимний период наблюдался у молодых животных в возрасте 6...8 месяцев (19,1...24,4%), который в среднем в 1,6 раза был выше, чем у 2...3-летних (12...14,6%), и в 2,0 раза выше, чем у 4...5-летних (9,4...12,1%). КП ^{90}Sr в костную ткань оленей в зимний период также был выше у 5...6-месячных оленей в 1,4 раза по сравнению с 2...3-летними и 4...5-летними оленями (Н. П. Лысенко, А. Г. Павлов, 2000).

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРОДУКЦИЮ ОЛЕНЕВОДСТВА

Одной из основных мер, направленных на снижение поступления радионуклидов в организм домашних северных оленей, а значит, и человека, является снижение количества лишайников в рационе оленей. На содержание лишайников в рационе прямое влияние оказывает климатический фактор: малоснежная зима облегчает доступ оленю к подснежной зелени и способствует уменьшению количества лишайников в рационе; летом, в засушливый сезон олень вообще исключает лишайники из своего рациона, т. к. он не поедает их в сухом состоянии.

Также на поступление радионуклидов в организм животных с рационом прямое влияние может оказывать система

содержания оленей. При круглогодичном изгородном содержании оленей потребление ягеля резко сокращается из-за уменьшения его запасов внутри изгороди. К тому же северные олени в таких условиях вынуждены объедать лишайники на значительную высоту или на 100%, после чего те не восстанавливаются (в нормальных условиях выпаса олени скучиваются только верхушки ягеля). В то же время, как уже было показано ранее, ^{137}Cs , в отличие от ^{90}Sr , накапливается преимущественно в верхней трети талломов лишайника, поэтому при стравливании лишайников целиком происходит сокращение поступления ^{137}Cs на 36...47%. Конечно, из этого не следует, что для уменьшения поступления ^{137}Cs с рационом нужно создавать неблагоприятные условия для выпаса оленей, а правильнее будет создавать такие условия, при которых олени поедали бы больше подснежной зелени, а не ягель.

В качестве примера произвольного регулирования содержания лишайников в рационе оленей можно привести оленеводческие хозяйства бассейна реки Печеры. В этих хозяйствах были проведены учеты запасов ягеля в 1940, 1952 и 1963 гг., они показали, что за 23 года запасы ягеля сократились на 50...70% из-за нарушения режима пользования пастбищами. Однако это не привело к катастрофе. Вместе с этим значительно изменился зимний рацион оленей. Проведенные исследования по содержанию рубцов оленей показали, что содержание ягеля с 85...90% в 1940 г. сократилось до 30% в 1963 г., а травянистых кормов увеличилось с 5...10% до 55...70%.

Истощение запасов лишайников может происходить в результате пожаров и при неправильном использовании пастбищ (т. к. за период 10...12 лет ягельное пастбище можно посещать только 3...4 раза). В связи с делихенизацией (истощением запасов ягеля) олени вынуждены использовать другие корма.

Существует возможность целенаправленного регулирования содержания лишайников в рационе оленей путем зимнего выпаса животных в местах с обильным произрастанием подснежной зелени или при изгородном содержании в отдельные сезоны года (в те периоды, когда олени наиболее интенсивно поедают ягель). Также существует опыт по круглогодичному изгородному содержанию оленей, при этом истощение

запасов лишайников внутри изгороди происходит очень быстро и животные начинают использовать альтернативные источники пищи в виде травянистых растений.

Олени не сразу привыкают к безъягельному рациону, но по прошествии какого-то времени появляются отдельные отродья оленей, приспособленные к преимущественному питанию подснежной зеленью. Вышеприведенное наблюдение, конечно, касается в основном отродий оленей, у которых очень высок процент потребления лишайников. Вообще, рацион оленей с большим содержанием зеленых растений больше соответствует физиологической норме, и при достаточной обеспеченности пастбищ подснежной зеленью эти животные могут обходиться без потребления лишайников. Прежнее мнение о ягеле как о единственном и незаменимом зимнем пастбищном корме оленя ошибочное.

Нужно учитывать и то, что в целом по Северу существуют районы с недостаточными запасами зеленых растений в зимний период, и сокращение запасов ягеля не может быть возмещено за счет травянистых кормов. Следовательно, возникает потребность в увеличении запасов подснежной зелени, особенно это касается районов широкого распространения ягельных пастбищ. Проблема обогащения оленьих пастбищ зелеными кормами не нова, и эта работа должна вестись в следующих направлениях.

1. Спуск тундровых и лесных озер и регулирование водного режима в озерной котловине. Исследователями было отмечено появление весьма богатых травостоев на самоосушенных озерах (якутское — Алас, ненецкое — Хасырей, чукотское — Пноутки). Рекомендации по использованию приема обогащения оленьих пастбищ зелеными кормами путем осушения озер с помощью отводных каналов были предложены В. Н. Андреевым в 1989 г. (при осушении озер необходимо учитывать интересы водообеспечения населения, рыбного и охотничьего промысла).

2. Подсев зимне-зеленых трав на выбитых пастбищах и гарях с внесением хотя бы в минимальных дозах азотных удобрений. В результате проведенных опытов намечен ассортимент многолетних трав, которые можно использовать для посева. В последнее время из-за дороговизны концентриро-

ванных кормов во многих оленеводческих хозяйствах Севера успешно применяется интенсивный предубойный откорм оленей на подсеваемых зимне-зеленых травах.

3. Воздействие химическими веществами, замедляющими старение и стимулирующими осеннее развитие вегетативной массы.

Таким образом, из вышеизложенного можно заключить, что потребление оленем лишайниковых кормов можно целенаправленно регулировать, а значит, и контролировать поступление радионуклидов с рационом. Вместе с этим необходимо разработать и применять сорбенты, которые можно задавать оленям вместе с концентрированными кормами и минеральными подкормками. Все перечисленные мероприятия способны минимизировать поступление радионуклидов в продукцию оленеводства.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные последствия для сельскохозяйственного производства самой крупной в мире Чернобыльской атомной катастрофы?
2. Как прогнозировать накопление радионуклидов в кормах, вырращиваемых на загрязненной радионуклидами территории?
3. Как прогнозировать накопление радионуклидов в получаемом молоке и мясе?
4. Каковы основные пути использования загрязненных сельскохозяйственных угодий?
5. Что можно сделать для снижения накопления радионуклидов в кормах, получаемых с загрязненных угодий?
6. Каковы принципы нормирования поступления радионуклидов в организм сельскохозяйственных животных?
7. Как организовать ведение животноводства на загрязненной территории?
8. С помощью каких средств и технологических приемов можно добиться снижения содержания радионуклидов в организме животных и получаемой продукции?
9. Каковы особенности проведения ветеринарных мероприятий в условиях радиоактивного загрязнения среды?
10. Как снизить загрязненность полученной животноводческой продукции?
11. Каковы особенности ведения животноводства в условиях Крайнего Севера?



ГЛАВА ШЕСТАЯ

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

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.

МЕХАНИЗМ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о том, что у различных излучений он в основном одинаковый, начиная от исходных актов поглощения и переноса энергии излучения и заканчивая физиологическими и морфологическими изменениями в облученном организме.

Вскрытие общих закономерностей биологического ответа на воздействие ионизирующих излучений — задача невероятно трудная и прежде всего потому, что, по меткому выражению Н. В. Тимофеева-Ресовского, необходимо понять и преодолеть основной радиобиологический парадокс, состоящий в крайнем несоответствии между ничтожной величиной поглощенной энергии и крайней степенью выраженности ре-

акций биологического объекта, вплоть до летального эффекта. Например, при гамма-облучении дозой 9...10 Гр, смертельной для большинства млекопитающих, ткани поглощают ничтожно малую энергию — около 170 кал, т. е. такое количество тепловой энергии, которое передается человеку от выпитого стакана горячего чая, вызывая повышение его температуры тела всего на 0,001°C. Сколько атомов подвергается ионизации при облучении 10 Гр? Оказывается, что если облучать непрерывно какое-либо вещество, по плотности соответствующее живым тканям, с интенсивностью, создающей смертельную дозу, в течение часа, то половина его атомов превратится в ионы примерно через 1000 лет.

В механизме биологического действия ионизирующих излучений 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 — опосредованное действие, которое обуславливается нейрогенными и гуморальными сдвигами, возникающими в организме под влиянием радиации.

Для объяснения механизма первичного действия ионизирующих излучений на биосубстрат предложено более десяти гипотез и теорий, многие из которых, по современным представлениям, не выдерживают критики и имеют уже только историческое значение.

По гипотезе Штрауса (1923), в основе лучевого поражения лежит действие ионизирующих излучений на липоиды ароматического ряда как на наиболее радиочувствительные компоненты клетки.

Со временем был накоплен большой фактический материал о повреждающем действии ионизирующих излучений. Однако биологический и патогенетический механизм оставался неизвестным.

Для изучения этих вопросов были взяты в качестве биологической модели простые белки, протеиды, ферменты, вирусы, бактерии и грибы различных видов. Их подвергали облучению в различных условиях и агрегатных состояниях: сухом (высушенном) виде, в растворах, при глубоком замораживании в жидком азоте, в различных условиях

кислородного режима (при насыщении среды кислородом или при отсутствии его). Исследования проводили на животных различных видов.

В результате этих опытов были выдвинуты две теории механизма первичного, т. е. непосредственного, действия ионизирующей радиации, которые в настоящее время являются признанными:

- теория прямого действия излучений на составляющие молекулы вещества;
- теория косвенного действия.

Было показано, что при прохождении излучения через вещество или макромолекулы биологического субстрата энергия радиоактивных излучений передается атомам вещества, вызывая в них возбуждение и ионизацию. Этот первый этап воздействия излучения характеризует акт прямого их взаимодействия.

Следовательно, под прямым действием ионизирующей радиации понимают такие изменения, которые возникают в результате поглощения энергии излучения самими молекулами, а поражающее действие связано с актом возбуждения и ионизации атомов и макромолекул.

Под косвенным (непрямым) действием радиоактивных излучений понимают изменение молекул клеток и тканей, обусловленное радиоллизом воды и растворенных в ней веществ, а не энергией излучения, поглощенной самими молекулами.

ТЕОРИИ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИИ

На основе представления о прямом действии ионизирующих излучений возникла теория мишени и попаданий, выдвинутая Дессауэром, а в последующем развитая Кроутером, Тимофеевым-Ресовским, Циммером, Ли и другими исследователями.

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. Чем больше доза, тем оно вероятнее (доза-эффект); чем меньше, тем оно менее вероятно, но по закону случайности попадания оно всегда возможно.

В опытах на микробных клетках была показана количественная зависимость между дозой и биологическим эффектом: с увеличением дозы излучений в геометрической прогрессии увеличивается количество поврежденных единиц в объеме облучения. Когда гибель клеток, разрушение молекул, инактивацию ферментов можно описать экспоненциальной кривой, говорят об одноударном поражении, т. е. инактивация объекта происходит под действием одного попадания (это для микробных клеток, бактерий, вирусов). Для инактивации и разрушения клеток животных и растительных тканей требуется более одного попадания в мишень. Поэтому данный процесс называется многоударным, и гибель клеток описывается S-образной кривой, вычерченной в нормальных координатах.

Таким образом, в основе теории мишени лежат два положения. Первое из них — принцип попадания — характеризует особенность действующего агента (излучения). Эта особенность заключается в дискретности поглощения энергии излучения, т. е. поглощения порций энергии при случайном попадании в мишень. Второе положение — принцип мишени — учитывает особенность облучаемого объекта (клетки), т. е. различие в ее ответе на одно и то же попадание.

Однако эта теория многого не объясняет, в частности зависимость радиобиологического эффекта от температуры и наличия в облучаемой среде кислорода. Было замечено, что понижение температуры и снижение концентрации кислорода в среде снижают радиационный эффект, т. е. гибель клеток уменьшается.

По мнению Д. Е. Ли, одного из авторов теории мишени, эта теория может быть справедливой только в отдельных случаях — при инактивации или убивании бактерий, вирусов и одноклеточных организмов и при мутации. Эта особенность лежит в основе применения ионизирующих излучений в радиационной генетике и селекции микроорганизмов, грибов и растений, а также в радиационно-биологической технологии

(РБТ) как способ холодной стерилизации биологических препаратов (вакцин, сывороток, гормонов, витаминов), медицинских инструментов и перевязочного материала, не выдерживающих термической или химической обработки или теряющих при этом свои функциональные свойства, в консервации пищевых продуктов.

Стохастическая (вероятностная) теория. Дальнейшим развитием теории прямого действия излучений явилась стохастическая теория, предложенная в конце 1960-х годов О. Хугом и А. Келлером. Эта теория, так же как и теория мишени, учитывает вероятностный характер попадания излучения в чувствительный объем клетки, но, в отличие от нее, она еще учитывает и состояние клетки как биологического объекта, лабильной динамической системы.

Клетка как лабильная динамическая система постоянно находится в стадии перехода из одного состояния в другое путем клеточного деления — митоза. На каждой стадии деления существует вероятность повреждения ее вследствие различных факторов, в том числе и радиационного. В процессе деления клетки выделяют две фазы: интерфазу и собственно митоз.

Интерфаза — самая длительная по времени и составляет промежуток между двумя делениями (от 10 до 48 ч). В интерфазе отчетливо выделяются три стадии. Первая стадия — предсинтетическая (G_1), начинается сразу после окончания деления клетки. За ней следует вторая — стадия синтеза (S); в это время синтезируются ДНК и хромосомные белки. Третья стадия — постсинтетическая (G_2); она переходит в профазу (начало деления клетки).

Митоз имеет четыре стадии: профазу (начало деления), метафазу (разделение хромосом), анафазу (расхождение хромосом к полюсам клетки) и телофазу (формирование дочерних клеток). Митоз длится 30...60 мин.

Излучение влияет на все фазы и стадии клеточного цикла, однако радиочувствительность клетки в различные стадии митоза неодинаковая. Наибольшую чувствительность к ионизирующему излучению имеет клетка в стадии профазы, т. е. в начале деления. Облучение в период интерфазы приводит к потере способности приступить к новому деле-

нию. В клетках, уже начавших делиться (профаза), облучение тормозит его завершение. В этих случаях легко нарушается структура хроматинового вещества, в результате чего клетка может погибнуть.

На основании различия радиочувствительности клеток французские ученые Бергонье и Трибондо (1903) сформулировали правило: чувствительность клеток к облучению прямо пропорциональна интенсивности клеточного деления и обратно пропорциональна степени их дифференцировки (исключение составляют высокодифференцированные, но неделящиеся нервные клетки и лимфоциты крови).

Следовательно, наиболее повреждаемы клетки тех тканей, которые обладают высокой митотической активностью. К ним относятся клетки органов кроветворения (красный костный мозг, селезенка, лимфоузлы), половых желез, эпителия кишечника и желудка, а также клетки быстрорастущих опухолей. Поэтому не случайно при развитии острой лучевой болезни в первую очередь наблюдаются нарушения кроветворения, поражения желудочно-кишечного тракта (кровявые поносы), половых клеток и т. д.

Необходимо отметить, что на принципах радиопоражаемости быстро растущих клеток базируется практическое применение ионизирующей радиации в онкологии для подавления злокачественного роста опухолевых клеток. Лучевая терапия до настоящего времени является пока единственным лечебным фактором в борьбе со злокачественными новообразованиями, не считая химиотерапии.

Что касается радиочувствительности различных компонентов самой клетки, то наибольшая поражаемость принадлежит ядру. В экспериментах на амебах было показано, что пересадка ядра из облученной клетки (доза 1,5 кГр) в необлученную вызывает гибель последней, а при пересадке ядра из необлученной клетки в облученную этого не наблюдают. Эти и другие данные экспериментальных работ свидетельствуют о том, что главную ответственность за гибель клетки при облучении несет ядро.

Стохастическая теория учитывает не только все многообразие повреждений, вызываемых ионизирующим излучением, но и роль репарационных процессов. При анализе дозовых

кривых с учетом функциональной лабильности клетки экспоненциальная кривая указывает на систему без компенсаторных реакций, а сигмоидная соответствует системам, обладающим такими репаративными механизмами.

Таким образом, стохастическая теория как бы более биологична по сравнению с теорией мишени, но и она не смогла объяснить некоторые эффекты, и в частности эффект разведения.

Исследования, проведенные Г. Фрикке на разбавленных водных растворах, показали, что с увеличением концентрации вещества количество инактивированных под действием облучения молекул не возрастает согласно принципу мишени. Эффект разведения свидетельствует о наличии косвенного (непрямого) действия радиации.

ТЕОРИИ НЕПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

При косвенном действии ионизирующих излучений наиболее выражен процесс радиоллиза (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.

Процесс радиоллиза воды совершается в три фазы: физическая — длится $10^{-13} \dots 10^{-16}$ с; фаза первичных физико-химических превращений — $10^{-6} \dots 10^{-9}$ с; фаза химических реакций — $10^{-5} \dots 10^{-6}$ с. Физическая фаза, по существу, один из моментов прямого действия ионизирующего излучения на молекулярные и биологические структуры клетки.

При взаимодействии ионизирующих излучений (гамма-кванта, заряженной частицы) с электронной сферой атомов происходит возбуждение и ионизация атомов или молекул вещества, через которые проходят излучения. При этом на один акт ионизации приходится от 10 до 100 возбужденных атомов, которые в процессе рекомбинации излучают избыток энергии в виде характеристического рентгеновского излучения.

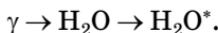
В физическую фазу происходит взаимодействие ионизирующего излучения с молекулой воды, в результате чего выбивается электрон с внешней орбиты атома и образуется положительно заряженный ион воды:



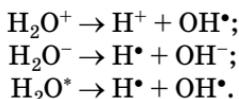
«Вырванный» электрон присоединяется к нейтральной молекуле воды, образуя отрицательный ион воды:



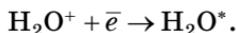
При эффекте возбуждения образуется нейтрально заряженная молекула воды с избытком энергии, привнесенной ионизирующим излучением:



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^\bullet и OH^\bullet); наступает вторая фаза радиолиза воды — фаза первичных физико-химических реакций:



Гидроксильные радикалы (OH^\bullet) — сильные окислители, а радикал водорода (H^\bullet) — восстановитель. Образование свободных радикалов может идти и другим путем. «Вырванный» 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:

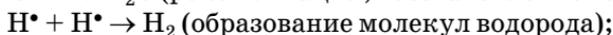


Ионизированная молекула воды (H_2O^+) может реагировать с другой нейтральной молекулой воды (H_2O), в результате чего образуется высокореактивный радикал гидроксила (OH^\bullet):

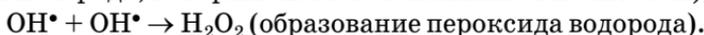


На этом заканчивается физико-химическая фаза и развивается третья фаза действия ионизирующего излучения — *фаза химических реакций*.

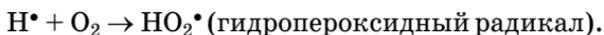
Обладая очень высокой химической активностью за счет наличия неспаренного электрона, свободные радикалы взаимодействуют друг с другом или с растворенными в воде веществами. Реакции могут идти следующими путями:



$\text{OH}^\bullet + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$ (образование молекул воды и выделение кислорода, который является сильным окислителем);

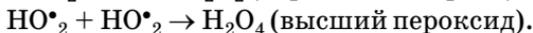
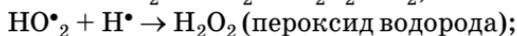
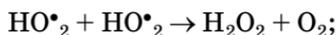


При наличии в среде растворенного кислорода O_2 возможна реакция образования гидропероксидов:



Эта реакция указывает на роль кислорода в повреждающем эффекте ионизирующего излучения.

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.

Взаимодействие свободных радикалов с органическими и неорганическими веществами идет по типу окислительно-восстановительных реакций и составляет эффект непрямого

(косвенного) действия. Величина прямого и непрямого действия в первичных радиобиологических эффектах различных систем неодинаковая. В абсолютно чистых сухих веществах будет преобладать прямое, а в слабо растворенных — косвенное действие радиации. У животных, по данным А. М. Кузина, примерно 45% поглощенной энергии излучения действует непосредственно на молекулярные структуры — прямое действие, а остальные 55% энергии вызывают не прямое действие. О различии прямого и косвенного действия радиации на биологические объекты и величине их влияния на развитие лучевого поражения, по мнению авторов теории, можно судить по двум феноменам — эффекту разведения и кислородному эффекту.

Эффект разведения — состояние, при котором абсолютное число поврежденных молекул веществ в слабом растворе не зависит от его концентрации и остается для данной экспозиционной дозы постоянным, так как в этих конкретных условиях в растворе образуется постоянное количество активированных радикалов. Эффект разведения достаточно четко проявляется в опытах *in vitro* с растворами и суспензиями микромолекул, вирусов, фагов и т. д. Он свидетельствует о величине косвенного действия радиации при лучевом повреждении этих микроскопических структур. Однако эффект разведения не проявляется при облучении суспензий перевиваемых клеток и тканей животных, так как в данном случае большая часть активных радикалов воды поглощается «поверхностными» метаболитами и не доходит до активных макромолекул клетки. Он также не регистрируется при облучении многоклеточных организмов.

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. Это явление было названо кислородным эффектом. Выраженность кислородного эффекта у разных видов излучений неодинаковая и зависит от их линейной потери энергии (ЛПЭ); с повышением ее эффект уменьшается.

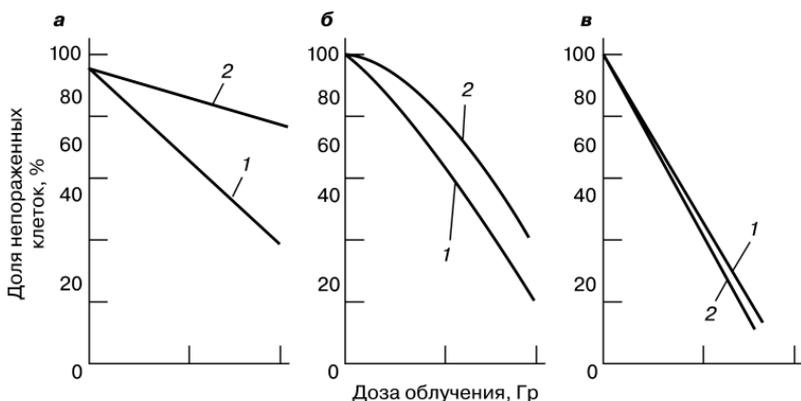


Рис. 38

Проявление кислородного эффекта при воздействии:

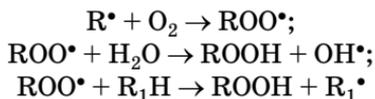
а — рентгеновскими лучами; *б* — нейтронами; *в* — альфа-частицами; *1* — в присутствии кислорода; *2* — в отсутствие кислорода.

При действии излучений с малой плотностью ЛПЭ (гамма- и рентгеновские лучи) наблюдается наибольший эффект, а при воздействии излучений с высокой ЛПЭ (альфа-частицы) он полностью отсутствует (рис. 38). Кислородный эффект проявляется во всех радиобиологических реакциях ослаблением или усилением биохимических изменений, мутаций у всех биологических объектов (растений и животных) и на всех уровнях их организации — молекулярном, субклеточном, клеточном, тканевом.

Кислородный эффект нередко применяется при лечении больных со злокачественными новообразованиями. Для усиления лучевого поражения клеток опухоли создают условия повышенного содержания кислорода в ней и одновременно для уменьшения радиационного повреждения здоровых клеток обеспечивают гипоксическое состояние окружающих тканей.

У млекопитающих максимальная радиочувствительность тканей отмечается при нормальном парциальном давлении кислорода (30...45 гПа). Снижая насыщенность тканей кислородом, можно повысить радиорезистентность животного (табл. 22). Повышение содержания кислорода в окружающей среде и в объекте облучения после лучевого воздействия положительно влияет на процессы пострadiационного восстановления.

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. Стабилизация радикалов OH^\bullet в присутствии кислорода увеличивает вероятность образования активных свободных радикалов органических веществ, которые присутствуют в облучаемой среде: $\text{RH} + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{R}^\bullet + \text{H}_2\text{O}$. Образовавшиеся свободные радикалы органических веществ в присутствии кислорода будут реагировать с ним, образуя пероксидный радикал (ROO^\bullet), который, в свою очередь, реагируя с любым органическим веществом или молекулами воды, инициирует цепную реакцию образования активных свободных радикалов и гидропероксидов, оказывающих токсическое действие на клетку:



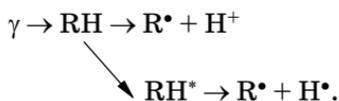
органическое
вещество

Таблица 22

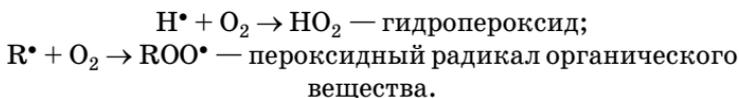
Степень проявления кислородного эффекта у кроликов при пониженном и нормальном парциальном давлении кислорода во вдыхаемом воздухе (по Н. А. Крыловой и Э. Г. Уразаеву)

Число животных	Доза облучения, Гр				
	7	9	11	13	15
7% кислорода во вдыхаемом воздухе (опыт)					
Всего	6	6	6	9	7
В том числе:					
Выжило	6	5	5	5	5
Пало	0	1	1	4	2
21% кислорода во вдыхаемом воздухе (контроль)					
Всего	5	6	9	7	5
В том числе:					
Выжило	4	4	4	2	0
Пало	1	2	5	5	5

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, которые приводят к глубокому изменению молекул:



Кроме того, липиды биомембран под действием ионизирующего излучения в присутствии кислорода образуют пероксиды и продукты их распада (малоновый альдегид и др.). Таким образом, в кислородной среде образуется больше токсических веществ; их концентрация выше, чем объясняет кислородный эффект.

Существует целый ряд гипотез, отражающих преимущественно не прямое действие ионизирующих излучений, т. е. качественную сторону возникновения и развития послелучевых процессов в организме.

Теория липидных радиотоксинов (первичных радиотоксинов и цепных реакций). Эта теория была предложена в 1950-е годы Б. Н. Тарусовым, Ю. Б. Кудряшовым, Н. М. Эмануэлем. Они показали, что уже в первые часы после облучения в тканях животных образуются вещества, которые при последующем введении их интактным животным вызывают гемолиз. Идентификация веществ установила их липидную природу, что дало основание назвать их липидными радиотоксинами (ЛРТ).

Липидные радиотоксины представляют собой лабильный комплекс продуктов окисления ненасыщенных кислот, гидропероксидов, альдегидов, эпоксидов и кетонов. Они вызывают не только гемолиз, но и другие реакции, характерные для лу-

чевого поражения: торможение клеточного деления, нарушение кроветворения, повреждение хромосомного аппарата и др.

Для осуществления цепных реакций необходимы радикалы с большой энергией, достаточной для образования последующих радикалов. В случаях, когда на один радикал образуются два или три, возникает самоускоряющийся процесс, который называют реакцией с разветвленными цепями. В организме животных в нормальных условиях низкий уровень окисления биолипидов обуславливают антиоксиданты — природные антиоксиданты. При лучевом воздействии такое равновесие нарушается вследствие появления большого количества радикалов. Автокаталитический режим цепных реакций возникает в случаях, когда содержание естественных антиоксидантов уменьшается на 10...15% (А. И. Журавлев). По мере уменьшения числа реакционно-способных молекул в субстрате реакция затухает; при этом снижается количество радикалов и пероксидов и увеличивается выход конечных продуктов (рис. 39).

По мнению авторов гипотезы, при облучении вначале поражаются липиды клеточных мембран, что приводит к нарушению химизма клетки, а затем образующиеся липидные радиотоксины вызывают окисление молекул других органических соединений живой ткани. Но и эта теория не

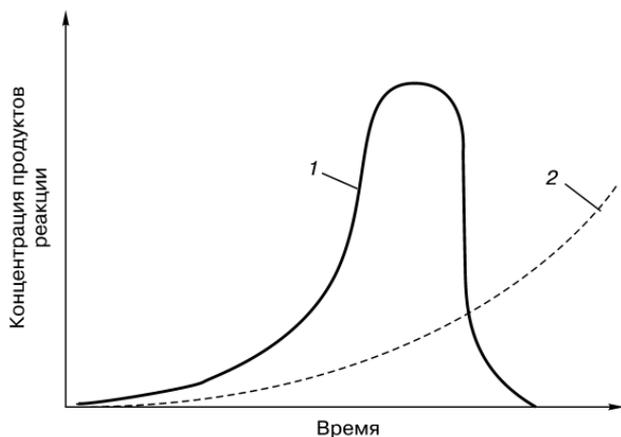


Рис. 39

Кинетика накопления промежуточных (1) и конечных (2) продуктов при цепных разветвленных реакциях

является универсальной, поскольку накопление липидных радиотоксинов количественно не связано с ЛПЭ, а ЛПЭ в основном определяет ОБЭ ионизирующего излучения.

Структурно-метаболическая теория радиационного поражения. Автор этой теории А. М. Кузин, который сделал попытку создать единую универсальную теорию радиобиологического действия ионизирующего излучения на основе анализа собственных исследований и накопленного за десятилетия научного материала других авторов, начиная от теории прямого действия на клеточном уровне и заканчивая высокоорганизованными многоклеточными организмами.

Свои идеи А. М. Кузин представил в монографии «Структурно-метаболическая теория в радиобиологии» (1986). В этой теории ведущая роль в радиационном эффекте отводится нарушениям в клеточном ядре и биомембранах. Биомембраны играют исключительно важную роль в делении клетки. Экспериментально было показано, что ДНК связана с биомембранами: начало расплетания спирали и синтеза ДНК происходит в точках ее прикрепления к мембране. На поверхности биомембран имеются особые рецепторы, передающие сигналы гормонов через липиды мембран. Липиды мембран, подвергаясь воздействию ионизирующей радиации, в присутствии кислорода образуют пероксиды и продукты их распада. Эти изменения приводят к нарушению проницаемости мембран и важных метаболических процессов: инактивации ферментов, гормонов, подавлению энергетических функций митохондрий и синтеза ДНК и РНК, расстройству управляющих систем и другим тяжелым последствиям.

Таким образом, в структурно-метаболической теории к радиационному поражению ядерных макромолекул как фактору прямого действия согласно теории мишени добавляются нарушение цитоплазматических структур и изменение нормального их функционирования.

А. М. Кузин ввел понятие о веществах, влияющих на геном клетки, и назвал их триггер-эффекторами. Под действием различных доз радиации триггер-эффекторы (семихиноны, хиноны, гормоны и др.) в зависимости от их концентрации могут оказывать депрессивное или репрессивное действие на геном клетки, а следовательно, и на биосинтетические про-

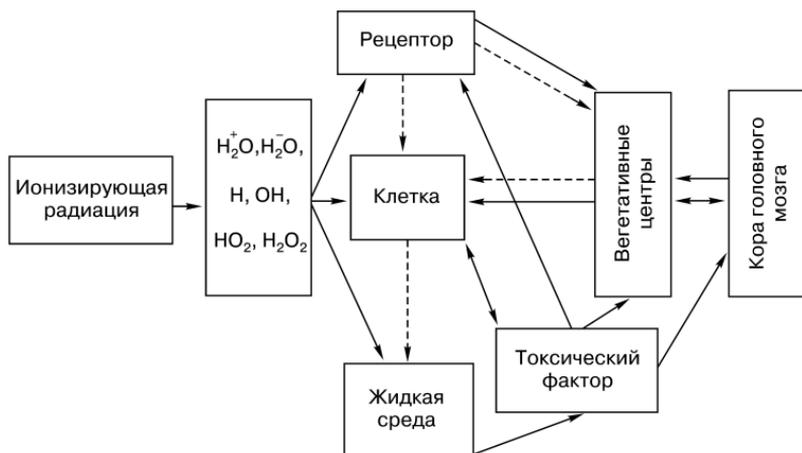


Рис. 40

Схема патогенеза лучевой болезни:

— пути повреждения; - - - пути адаптации.

цессы. Само ионизирующее излучение рассматривают как неспецифический триггер-эффектор. Признано, что ионизирующие излучения в числе других факторов внешней среды являются постоянными раздражителями биологических объектов, своеобразным стресс-фактором. Реакция организма зависит от силы раздражителя, т. е. от дозы ионизирующего излучения. Под влиянием радиации в организме не возникает принципиально новых химических соединений. Некоторые из токсических метаболитов всегда в небольших количествах содержатся в клетках здоровых тканей. Под действием радиации содержание их значительно увеличивается и дополнительно появляются новые токсические соединения. Первичные радиотоксины образуют большое количество вторичных радиотоксинов, которые играют существенную роль в патогенезе и исходе лучевых поражений (рис. 40).

В механизме биологического действия ионизирующих излучений на живые объекты условно можно выделить следующие этапы:

- первичные физические явления — поглощение энергии излучения атомами и молекулами биологического объекта, в результате они могут претерпевать возбуждение, ионизацию или диссоциацию;

- радиационно-химические процессы, при которых образуются свободные радикалы, взаимодействующие с органическими и неорганическими веществами по типу окислительных и восстановительных реакций;
- биохимические реакции, обуславливающие изменения функций и структур органов и систем и реакций целостного организма. Они определяют в конечном итоге механизм развития и специфику патологического процесса.

Структурно-метаболическая теория отличается большей аргументацией и дает более детальное представление о первичных механизмах действия радиации на организм, которое в дальнейшем усиливается нейроэндокринными и гуморальными реакциями, т. е. опосредованно.

Опосредованное действие радиации. Четко выделить непосредственные и опосредованные пути воздействия ионизирующего излучения на организм трудно.

Участие нервной системы в опосредованном действии ионизирующего излучения хорошо показано в трудах отечественных ученых И. Р. Тарханова, М. Н. Ливанова, А. В. Лебединского и др., которые отметили высокую чувствительность нервной системы к радиации и одновременно высокую пластичность и способность к компенсации.

Путем химической (анестезия) и хирургической (рассечение) денервации выяснено рефлекторное воздействие облучения на трофику тканей. При малых дозах происходит усиление биохимических процессов, а при больших дозах (500 Р и более) возникают глубокие трофические расстройства, приводящие к образованию язв.

Опосредованное участие нервной системы в реакциях на облучение обнаружено при развитии изменений во всех тканях и системах организма. Один из механизмов этого участия — рефлекторный, при котором в процесс вовлекаются вегетативный отдел нервной системы, ретикулярная формация и, вероятно, кора и подкорка (см. рис. 40).

Вторым путем опосредованного влияния радиации на функции и структуры органов служит эндокринная система. Ряд исследователей, особенно зарубежных, определяют лучевое поражение как одну из форм стресс-реакции. Обоснованием для этого вывода послужило то, что в первое время

после лучевого воздействия наступает гиперсекреция коры надпочечников, уменьшаются размеры тимуса и селезенки, развивается лимфопения. Облучение животных после удаления надпочечников не приводит к указанным изменениям в органах (П. Д. Горизонтов). В опосредованных реакциях на лучевое воздействие участвуют также гипофиз, щитовидная и другие эндокринные железы.

В качестве гуморального пути опосредованного действия радиации служат токсические вещества, образующиеся в организме при лучевой болезни. По П. Д. Горизонтову, понятие «радиотоксины» (лучевые токсины, токсические вещества) включает качественные и количественные изменения биологических свойств крови, лимфы, тканевой жидкости и других сред, развивающиеся при воздействии радиации и либо вызывающие патологические изменения, либо усугубляющие течение лучевого поражения. В определенные этапы лучевой болезни к токсическим агентам с полным основанием можно отнести медиаторы, гормоны, ферменты, продукты обмена веществ и распада тканей. Например, при облучении в крови повышается содержание ацетилхолина, который возбуждает рвотный центр, что вызывает рвоту; увеличенное выделение надпочечных гормонов приводит к повышению содержания гликогена в печеночной ткани. Облучение цитоплазмы клеток $HeLa$ приводит к торможению синтеза ДНК в ядре (А. М. Кузин). Установлено лейкопеническое действие крови облученных доноров при введении ее интактным реципиентам. Бактерицидные свойства кожи после введения радиотоксинов из облученных тканей восстанавливаются до исходного уровня через 14...16 дней, что на несколько дней опережает восстановление морфологического состава крови (Н. А. Свердлов).

Из приведенных материалов видно, что опосредованное действие радиации имеет большое значение в развитии основных синдромов лучевого поражения. Исследование механизмов непосредственного и опосредованного действий радиации на организм позволяет более дифференцированно использовать методы усиления или ослабления того или иного процесса лучевого повреждения, что имеет очень важное значение для лечения животного.

Эффекты, возникающие при действии ионизирующего излучения на организм, делят на 3 группы.

1. Соматические нестохастические (детерминированные) — эффекты, возникающие у облученного сразу после облучения большими дозами: острая и хроническая лучевая болезнь, локальные лучевые повреждения (катаракта), поражения кожи, нарушение репродуктивной функции и т. д. Вероятность появления такого эффекта в целом практически равна нулю при малых дозах, но будет резко возрастать при превышении некоторого уровня (порога) доз. Таким образом, тяжесть эффекта определяется дозой.

2. Соматические стохастические — эффекты, возникающие у облученного через длительное время после облучения, т. е. это отдаленные последствия: понижение сопротивления инфекциям, сокращение продолжительности жизни, возникновение опухолей, лейкозов. Предполагают, что вероятность их проявления и тяжесть являются беспороговой функцией дозы.

3. Генетические, или наследственные — эффекты, проявляющиеся в потомстве облученных людей и животных. Эти эффекты являются также стохастическими. При этом могут возникать доминантные и рецессивные генные мутации, хромосомные аберрации.

РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЖИВОТНЫХ

Реакции животного 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 и других факторов.

Для обозначения радиационной чувствительности животных существуют *летальные дозы* (ЛД). Это минимальные дозы облучения ЛД_{50/30} и ЛД_{100/30}, которые вызывают смерть соответственно 50 и 100% облученных животных в течение 30 дней.

Причины различной радиочувствительности по видам животных пока объяснить не удастся. Нет ни одной гипотезы, более или менее удовлетворительно объясняющей этот феномен. Одно ясно, что млекопитающие — животные и человек —

обладают наибольшей чувствительностью к облучению по сравнению с птицами, рыбами, земноводными и др. (табл. 23).

Различие радиочувствительности проявляется и в органах, составляющих организм как целое. Клетки одного органа также имеют неодинаковую степень чувствительности и способность к регенерации после лучевого повреждения.

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 стволы головного мозга,

Таблица 23

Летальные дозы облучения, Гр (грей)

Вид животного	ЛД _{50/30}	ЛД _{100/30}	Вид животного	ЛД _{50/30}	ЛД _{100/30}
Морская свинка	1,5...3,0	4,0...6,0	Щенки до 3 мес.	4,5...7,0	8,0...10,5
Овца	1,5...4,0	5,5...7,5	Мышь	4,6...7,5	7,0
Ягнята до 3 мес.	1,5...3,0	6,0	Крыса	5,0...7,0	10,0
Крупный рогатый скот	1,6...5,5 1,7...2,5	6,5 3,0	Кошка	5,0...7,5	8,0
Телята до 5 мес.	2,0...5,5	8,0	Легучая мышь	5,0...8,0	9,5
Осел	2,1...5,5	7,5	Хомяк	5,5...8,0	—
Коза	2,5	—	Полевка	6,0...9,0	9,0...10,0
Верблюд	2,5...4,0	6,0	Суслик	6,0...9,5	9,0...11,5
Человек	2,5...5,5	4...6,0	Сурок	8,0...10,0	11,0...12,0
Обезьяна	2,5...6,0	8,0	Кролик	10,0...13,0	14,0
Свинья	2,5...3,0	4,5	Монгольская песчанка	—	15,0...18,0
Поросята до 2 мес.	2,5...6,0	—	Птицы, рыбы	8,0...20,0	—
Лошадь	3,5...4,0	5...6,5	Насекомые	10,0...100,0	—
Собака	2,0...3,5	4,0...5,0	Змеи	80,0...200,0	—

мозжечок, гипофиз, надпочечники, семенники, тимус, лимфоузлы, спинной мозг, желудочно-кишечный тракт, печень, селезенка, легкие, почки, сердце, мышцы, кожа и костная ткань.

По морфологическим признакам развивающихся пострадиационных изменений органы разделяют на три группы:

- органы, чувствительные к радиации: лимфоузлы, лимфатические фолликулы желудочно-кишечного тракта, красный костный мозг, вилочковая железа, селезенка, половые железы. Морфологически регистрируемые изменения в них возникают уже при облучении дозой 0,25 Гр;
- органы, умеренно чувствительные к облучению: кожа, глаза;
- 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 разной чувствительности органов для организма небезразлично, будет ли облучаться все тело равномерно либо часть его или организм получит общее, но неравномерное облучение. Общее равномерное облучение вызывает наиболь-

Таблица 24

Влияние экранирования отдельных участков тела на выживаемость мышей при облучении

Экранированный участок	Доза облучения, Гр	Выживаемость за 30 дней	Экранированный участок	Доза облучения, Гр	Выживаемость за 30 дней
Селезенка	0,25	77,7	Контроль	8,00	0
Печень	10,25	33,0	Задняя конечность	7,00	30,4
Голова	10,25	27,7	Контроль	7,00	0
Кишечник	10,25	26,6	Задние конечности:	обе	6,00
Задняя конечность	10,25	13,0			
Контроль	10,25	0	одна	6,00	70,6
Селезенка	8,00	33,4	Контроль	6,00	17,6

ший радиобиологический эффект. Экранирование при облучении даже небольшого участка тела повышает устойчивость организма к воздействию радиации (табл. 24).

При экранировании радиочувствительной ткани или органа защитный эффект проявляется ярче. Так, если экранировать надпочечники массой 20...25 мг у крысы массой 200...250 г при облучении ее смертельной дозой гамма-лучей, то она выживает; контрольная погибает. Выраженный защитный эффект проявляется при экранировании участка кости с красным костным мозгом, например головки одной из бедренных костей.

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ТКАНИ, ОРГАНЫ И СИСТЕМЫ

Влияние ионизирующих излучений на нервную систему. И. Р. Тарханов (1896), Е. С. Лондон (1903, 1904), М. О. Жуковский (1903) и другие ученые установили высокую чувствительность нервной системы к радиационным воздействиям.

Е. С. Лондон в экспериментах на мышах установил, что облучение головы лучами радия приводит к функциональным (вялость, парезы, параличи) и морфологическим изменениям в коре больших полушарий. М. О. Жуковский обнаружил, что лучи радия вначале повышают, а затем понижают возбудительные процессы коры мозга.

Указанные исследователи не имели возможности проводить точную дозиметрию, однако, организуя опыты в строго идентичных условиях, они сумели показать разницу послелучевых реакций нервной системы у молодых и взрослых животных. Нервная система у молодых животных более радиочувствительна.

После общего облучения в очень высоких дозах (50 Гр и выше) или локального облучения головы у животного развивается центральный нервно-системный синдром. Иногда его называют мозговым синдромом. При этом виде лучевого поражения характерными будут признаки менингита, энцефалита, отека мозга. Исход поражения, как правило, летальный — животное погибает в течение первых часов, реже — двух-трех суток.

Влияние ионизирующих излучений на центральную нервную систему. Ответ центральной нервной системы (ЦНС) на облучение принципиально отличается от реакций костного мозга и кишечника отсутствием клеточных потерь. Это явление обусловлено тем, что зрелая нервная ткань — непролиферирующая система, состоящая из высокодифференцированных клеток, замещения которых в течение жизни не происходит. Поэтому ЦНС можно рассматривать как крайний (стационарный) вариант системы клеточного обновления со всеми вытекающими отсюда последствиями, характерными для лучевых реакций радиорезистентных неделящихся клеток.

Гибель клеток, приводящая к церебральному синдрому, происходит при огромных дозах, порядка сотен грей, причем до сих пор не выяснено, является ли причиной гибели нервных клеток их непосредственное повреждение или она вызвана опосредованно повреждениями других систем, прежде всего кровеносных сосудов.

Реакции различных отделов центральной нервной системы на действие радиации имеют как общие, так и специфические особенности. Например, к числу общих особенностей следует отнести волнообразную смену фаз повышенной и пониженной возбудимости отделов. Вместе с тем в разных отделах центральной нервной системы реакции развиваются несинхронно.

Нарушение взаимодействия между корой и подкорковыми центрами, а также сдвиги в центрально-периферическом взаимодействии играют большую роль в развитии лучевой болезни.

Изменения биоэлектрической активности центральной нервной системы — одни из самых ранних признаков реакции организма на радиационные воздействия. В коре головного мозга кроликов они проявляются уже в первую секунду общего облучения дозой $5 \cdot 10^{-4}$ Гр.

Пороговые дозы радиочувствительности нервной системы отличаются от доз, вызывающих тяжелые функциональные и морфологические нарушения центральных ее отделов, на несколько порядков. Они значительно ниже вызывающих реакции в других, наиболее радиочувствительных тканях. Указанная особенность нервной системы по отношению к

ионизирующему излучению отражена формулой, а именно: нервная система обладает высокой радиочувствительностью и одновременно высокой пластичностью и способностью к компенсации при действии радиации (Горизонтов, 1955)

Влияние ионизирующей радиации на органы чувств. Реакции на облучение слухового, вкусового, обонятельного, вестибулярного и других анализаторов в принципе проявляют общую закономерность и в начале процесса зависят от исходного состояния чувствительности. При малых дозах они повышаются, при больших — понижаются. Кроме того, при малых воздействиях отмечают в основном только функциональные сдвиги, а при больших — и морфологические изменения рецепторных приборов. Послелучевые реакции органов чувств являются суммой реакции как центральной, так и периферической их частей. Поэтому не всегда удается достаточно четко дифференцировать место и глубину функциональных морфологических изменений рецепторов от изменений центральных отделов анализаторов.

О чувствительности тканей глаз к воздействию радиации стало известно уже через год после открытия рентгеновских лучей. Позднее было прослежено, что при остром лучевом поражении может возникнуть патология, например сосудистые расстройства в любом из отделов глазного яблока как следствие общих изменений организма. При местном облучении появляются сосудистые реакции, конъюнктивиты и другие расстройства. Реакции сетчатки глаза на облучение регистрируют на электроретинограмме уже в первые 10 мин после облучения. Пороговая доза изменений электроретинограммы 0,005...0,0085 Гр. При облучении сетчатки происходит гибель палочек. Клинически в этих случаях наблюдаются потеря зрачкового рефлекса на свет, ослабление, временная или постоянная потеря зрения. Пострадиационные изменения в роговице характеризуются подавлением митотической активности эпителия. При малых дозах облучения (0,02...0,2 Гр) в роговице наступают временные проходящие изменения, при больших дозах (2,5 Гр и выше) могут развиваться необратимые морфологические нарушения, приводящие к снижению и потере чувствительности роговицы. Одно из тяжелых последствий облучения глаз — поражение хрусталика,

которое завершается лучевой катарактой. Она может возникнуть после внешнего облучения глаз рентгеновскими и гамма-лучами, нейтронным, альфа- и бета-излучениями, а также при попадании в организм радиоактивных изотопов альфа- и бета-излучателей ^{90}Sr , ^{210}Po и др.

Пороговая доза рентгеновских и гамма-лучей при местном облучении для развития катаракты примерно равна 0,15...0,2 Гр. С увеличением дозы частота случаев катаракты возрастает. В патогенезе лучевой катаракты характерно наличие латентного периода, который может исчисляться неделями и годами. Продолжительность латентного периода обратно пропорциональна дозе воздействия. У молодых животных катаракта возникает при меньших дозах облучения.

Из разных видов излучения наиболее выраженным действием на глаза обладают нейтроны: при их воздействии катаракта возникает значительно чаще, чем при других видах облучения. Объясняется это значительно большей биологической активностью нейтронов. Восстановительные процессы в тканях глаза, и в частности в хрусталике, при действии радиации выражены нечетко. С увеличением возраста животного и дозы облучения возможность восстановления поврежденных структур глаза уменьшается.

Влияние ионизирующих излучений на кожу. Это активно обновляющиеся, а потому весьма радиочувствительные клеточные системы. Стволовые клетки эпидермиса хорошо восстанавливают сублетальные повреждения (Dq для этих клеток ~ 5 Гр, в то время как для кроветворных клеток — 0,5 Гр).

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

Один из признаков лучевого заболевания животного, вызванного внешним облучением, — поражение кожи. При облучении в первую очередь изменяется ее чувствительность. При местном облучении кожная чувствительность зависит от исходного состояния; при повышенной возбудимости она снижается, при пониженной — повышается. Изменения реакций кожных рецепторов начинают регистрироваться с участков кожи при местном облучении дозой 0,02 Гр. С повышением

дозы воздействия наступают морфологические изменения рецепторных образований кожи.

Нарушение кожной чувствительности четко прослеживается и при общем облучении в дозах, вызывающих острую лучевую болезнь. В этих случаях наблюдается волнообразность ее изменений: первые 1...2 сут после облучения отмечается повышение чувствительности, затем наступает период нормализации, за которым следует вторая волна повышенной чувствительности; она обычно совпадает по времени с разгаром острой лучевой болезни. У свиней в тяжелых случаях облучения повышение кожной чувствительности сохраняется до атонального состояния.

Более чувствительны к ионизирующему излучению клетки базального слоя кожи, волосяных луковиц и сосочков, потовых и сальных желез. Основное проявление повреждающего действия радиации — трофические нарушения, ослабляющие процессы физиологической регенерации. В результате этого прекращаются и нарушаются митозы, появляются многоядерные клетки с пикнозом или набуханием ядер, наблюдаются атрофия или исчезновение волосяных фолликулов, частичная или полная атрофия сальных желез, истончение эпидермиса, а иногда гиперкератоз (рис. 41). Гамма-облучение в летальных дозах приводит к снижению бактерицидных свойств кожи и повышенному микробному обсеменению.

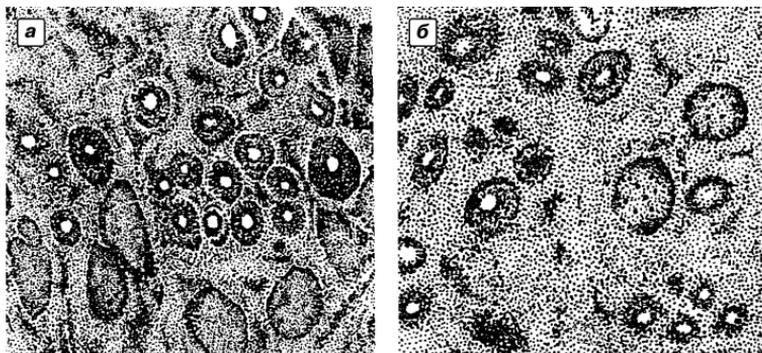


Рис. 41
Гистосрез кожи овцы:

a — необлученной; *б* — через 6 мес. после гамма-облучения дозой 3 Гр (снижение густоты и атрофические изменения вторичных волосяных фолликулов и сальных желез).



Рис. 42

Овца на 24-е сутки после гамма-облучения дозой 3 Гр
(по Н. П. Лысенко, М. В. Щукину)

У животных разных видов реакция кожи на облучение проявляется соответственно ее структуре. Например, у овец отмечается выпадение шерсти, иногда до полного облысения (рис. 42), у свиней — покраснение и кровоизлияние. Покраснение кожи у людей служило мерой облучения, которую называли кожно-эритемной дозой.

Послелучевые изменения в коже обычно протекают волнообразно: первая волна сменяется периодом затухания процессов, за которым следует вторая волна развития биохимических и морфологических изменений, иногда с четко выраженными признаками дерматита. В последующем кожа становится сухой, складчатой. Сроки и степень проявления того или иного признака повреждения кожи зависят от дозы облучения. При летальных дозах они возникают на 3...4-й день и продолжаются до гибели животного.

Особенность реакции на облучение кожи овец — эпиляция; у них она выражена наиболее ярко по сравнению с животными других видов. Причина эпиляции — послелучевое повреждение и атрофия волосяных фолликулов. Наступает она обычно с конца первой недели после облучения и при сублетальных дозах носит временный характер. При выживании овец после

облучения в летальных дозах восстановление шерстной продуктивности происходит медленно, в течение ряда лет.

Влияние ионизирующих излучений на соединительную ткань. Различают рыхлую и плотную соединительную ткань. Типичный представитель рыхлой соединительной ткани — подкожная клетчатка, а плотной — сухожилия и связки.

Соединительная ткань, по существу, была одной из первых тканей, на которой впервые установлено биологическое действие ионизирующих излучений. Уже в 1896 г. были описаны изменения в коже, возникающие под влиянием рентгеновского облучения. Последующие эксперименты показали, что после воздействия радиации изменяются клеточный состав соединительной ткани, структура эластических и коллагеновых волокон. Последние становятся базофильными, разбухают, теряют фибриллярность; в последующем они перерождаются и разрушаются. Изменения свойств соединительнотканых волокон сохраняются длительное время и зависят от дозы воздействия; при дозе 1...1,5 Гр они регистрируются в течение 20...30 сут, при больших дозах могут наблюдаться годами.

Влияние ионизирующих излучений на эндокринные железы. Железы внутренней секреции относят к радиорезистентным органам, хотя реакции эндокринной системы на общее облучение общеизвестны. Однако, так же как в отношении нервной системы, очень трудно оценить, являются ли эти реакции результатом непосредственного повреждения эндокринных желез или отражением воздействия излучения на другие системы и весь организм. Можно предположить, например, что наблюдаемые после общего облучения нарушения баланса гормонов, особенно щитовидной железы, надпочечников и гонад, могут быть следствием реакции гипоталамо-гипофизарной системы, учитывая тесную взаимосвязь между тирео-, адreno- и гонадотропными факторами гипофиза. Во всяком случае, с позиций систем клеточного обновления эндокринные железы представляют собой популяции функциональных высококодифференцированных клеток, как правило, с очень низким уровнем физиологической регенерации.

Эндокринная система находится в самой тесной связи с нервной системой. Обе регулирующие системы объединяются

гипоталамусом, нейросекреторные клетки которого занимают промежуточное положение между нейронами и инкреторными клетками желез внутренней секреции.

В ряду радиочувствительности органов (по функциональному принципу) эндокринные железы следуют за нервной системой. При радиационном воздействии на организм животных они рано и тонко отражают возникающие в других органах и тканях нарушения. Это свидетельствует о том, что чувствительность эндокринных желез на лучевой раздражитель является в основном опосредованной реакцией и осуществляется рефлекторным путем через нервную систему. Исключение может составлять непосредственное поражение щитовидной железы при инкорпорации радиоактивных изотопов йода (в этом случае она является критическим органом) и расположенных близко к ней паращитовидных желез.

Роль эндокринных желез в осуществлении как непосредственного, так и опосредованного влияния на организацию послелучевых реакций во многом зависит от состояния внутренней среды организма.

Изменения в гипофизе после облучения. Изменения структуры и функции гипофиза при местном и общем облучении организма прослежены на животных разных видов. Вначале после облучения повышается адренокортикотропная функция гипофиза, а в отдаленные сроки наступает ее снижение. При облучении в сублетальных дозах усиливаются тирео- и гонадотропная функции. Летальные дозы резко снижают и, соответственно, угнетают гормональную активность щитовидной и половых желез. В результате нарушения секреции и выделения тропных гормонов гипофиза регулируемые ими железы могут оказаться в состоянии физиологической изоляции (разобщенности). Об опосредованном влиянии излучения на гипофиз свидетельствуют опыты А. Г. Свердлова, в которых облучение области таза сопровождалось у кроликов стимуляцией адренокортикотропной активности гипофиза.

Изменения в надпочечниках после облучения. Реакции надпочечников у животных всех видов на действие радиации в принципе однотипны. В первый период (часы, иногда сутки) после облучения в широком диапазоне доз (от 0,25 до 50 Гр) наблюдается усиление секреции надпочечниковых

желез. Гиперсекреция коры надпочечников — один из механизмов опосредованных изменений крови и кроветворных органов. Однако активация их коркового вещества не единственный механизм отмечаемых изменений, но ей принадлежит существенная роль в развитии этих нарушений, особенно в ранние сроки поражения.

При облучении, независимо — общем или локальном, изменяются масса надпочечников, величина корковой и мозговой зон, уменьшается содержание липоидных субстанций. В облученных надпочечниках отмечается возрастание активности кислой фосфатазы, протеолитических ферментов и развитие деструктивных изменений. В коре надпочечников при облучении преобладающую роль, по-видимому, играет опосредованное влияние радиации, в частности со стороны нервной системы, гипофиза и других органов. О влиянии гипофиза на активацию функции коры надпочечников при действии радиации свидетельствует отсутствие регистрируемых изменений в функциональной активности надпочечников у гипофизо-эктомированных животных. Удаление гипофиза у крыс предупреждает первичную послелучевую реакцию адреналовых желез.

Таким образом, в острый период лучевого поражения повышается функциональная активность надпочечников, а в последующие сроки наступает истощение коркового и мозгового вещества и развитие атрофических процессов.

Изменения в щитовидной железе после облучения. Первичная реакция щитовидной железы на облучение характеризуется гиперфункцией, за которой в зависимости от дозы облучения и других условий следует нормализация или снижение функции. В отдаленные сроки наблюдается дисфункция железы, выражающаяся периодичностью гипер- или гипофункции. При локальном облучении дозами в несколько десятков грей морфологические изменения тиреоидной ткани наступают рано. Однако при общем облучении животного структурные сдвиги отмечаются уже при полулетальных дозах: уменьшается относительная масса щитовидной железы, преобладают фолликулы крупного диаметра с низким эпителием и густым коллоидом, появляются деструктивные изменения в отдельных фолликулах. В мышечной ткани обычно накапливается большое количество тироксина, и одновременно

с этим ускоряется его выведение из печени. В отдаленные сроки на фоне деструктивных пострадиационных изменений возможно развитие злокачественных новообразований в щитовидной железе.

Изменения функциональной активности щитовидной железы при общем внешнем облучении животных в основном определяются тиреотропной функцией гипофиза.

Пострадиационные изменения в других железах внутренней секреции. Изучены слабо. По одним данным, паращитовидная и эпифизиальная железы характеризуются высокой радиорезистентностью при общем внешнем облучении, по другим, они не являются исключением в эндокринной системе и также претерпевают фазные пострадиационные изменения, степень которых зависит от дозы воздействия.

Влияние ионизирующих излучений на органы пищеварения. Все органы пищеварения проявляют реакции на ионизирующее облучение. По степени радиочувствительности они распределяются следующим образом: тонкий кишечник, слюнные железы, желудок, прямая и ободочная кишки, поджелудочная железа, печень. При воздействии большими дозами радиации на весь организм или только на область живота в первую очередь наступает быстрое и сильное поражение кишечника, в результате чего развивается желудочно-кишечный синдром. Среднетлетальные и более высокие дозы вызывают выраженные функциональные и морфологические изменения в кишечной стенке. Наибольшую чувствительность при этом (по морфологическим изменениям) проявляют железистый эпителий, затем эпителий ворсинок и нервные интрамуральные сплетения. В пораженном эпителии слизистой оболочки (в криптах) уже в первые часы прекращается деление клеток и наступает их гибель. Деструктивные процессы приводят к повышенной десквамации эпителия и обнажению стромы слизистой оболочки кишечника, т. е. происходит клеточное оголение ворсинок и крипт кишечника; это сопровождается выходом плазмы крови в кишечник. Уменьшение объема плазмы может привести к коллапсу и шоку. Большую роль при заболевании животного играет снижение барьерно-иммунной функции кишечной стенки; в результате этого микрофлора кишечника попадает внутрь организма и вызы-

вает токсикоз и бактериемию. Средние сроки наступления смерти при желудочно-кишечном синдроме — 7...10 дней. Особенно выраженные по сравнению с другими отделами патоморфологические изменения наблюдаются в тонком кишечнике при нейтронном или гамма-нейтронном облучении.

Клиническое проявление лучевого поражения желудочно-кишечного тракта четко выявляется у животных большинства видов. Так, у плотоядных и всеядных животных уже через несколько часов после облучения в летальных дозах часто наблюдаются тошнота, рвота, понос, которые через 1...3 дня исчезают, а затем вновь появляются в разгар лучевой болезни.

Слюнные железы. На действие радиации они отвечают количественными и качественными сдвигами секреции. Интенсивность ее протекает волнообразно; при этом может изменяться соотношение составных частей или появляются вещества, не свойственные нормальной слюне. Например, у собак в слюне обнаруживается амилаза, которая после облучения отсутствует.

Желудок. Секреция желудочных желез при общем облучении в малых дозах изменяется в зависимости от исходного состояния: при гиперсекреции понижается, при гипосекреции повышается. При этом изменяются количество отделяемого желудочного сока и его переваривающая сила. Большие дозы лучевого воздействия угнетают желудочную секрецию и приводят к массивным морфологическим изменениям — кровоизлияниям, катарам, язвам и т. п.

Кишечник. Секреторная и ферментативная функции тонкого кишечника, особенно двенадцатиперстной кишки как при локальном, так и при общем облучении, изменяются волнообразно: в первые дни повышаются, а затем начинают снижаться. Это продолжается до развития восстановительных процессов, при тяжелых случаях — до гибели животного.

При тяжелом течении острой лучевой болезни у животных в первые сутки отмечают нарушение перистальтики, увеличение секреции и повышение активности ферментов, затем следует спад; к 5-м суткам до минимума снижаются секреция и активность ферментов в кишечнике, но активность их в кале в этот период повышается в несколько раз.

Радиационное воздействие вызывает фазные изменения синтеза ферментов и активности пристеночного пищеварения, которые тонко отражают состояние и реакции кишечника на облучение. Кратковременное усиление мембранного пищеварения при лучевом воздействии сменяется фазой угнетения, затем отмечается подъем активности ферментов, за которым вновь следует угнетение пристеночного пищеварения. У молодняка реакция кишечника на облучение проявляется при меньших дозах, и она более выражена, чем у взрослых животных. При летальных дозах облучения происходит ускоренный переход воды и натрия из крови в кишечник, т. е. наоборот по сравнению с нормальным состоянием.

Лучевые повреждения желудка и кишечника при внешнем местном облучении возникают при поглощенной дозе 30 Гр и более. При этом тяжесть патологического процесса зависит главным образом от дозы радиации.

Различают следующие виды поражения стенок желудочно-кишечного тракта: катаральные, катарально-геморрагические, язвенные и некротические, свищи и рубцовые стенозы.

Рубцовые разрастания в стенке желудка и кишок обычно возникают в отдаленные сроки — спустя несколько месяцев и лет. Клинические признаки лучевого повреждения желудочно-кишечного тракта — ухудшение аппетита и снижение массы тела.

Появление других симптомов зависит от степени тяжести процесса. При катаральных изменениях повышается выделение слизи с калом, возникает понос; при геморрагическом и язвенном процессах в кале всегда имеется кровь, иногда наблюдается кишечное или желудочное кровоизлияние. Длительное выделение крови с калом служит одной из причин развития постгеморрагической и железодефицитной анемии.

Нормализуется функциональное состояние желудочно-кишечного тракта в разные сроки, иногда растягиваясь на несколько месяцев.

Поджелудочная железа. Отмечается переменный характер изменения функции и структуры железы в зависимости от дозы облучения: малые стимулируют образование ферментов, большие угнетают выделение панкреатического сока, снижают активность амилазы, липазы, трипсина, инкрецию

инсулина и вызывают кровоизлияния, дегенеративные и некротические процессы в железистой ткани.

Изменения экзокриновой и эндокриновой структур и функции поджелудочной железы наступают довольно рано и при относительно невысоких поглощенных дозах радиации — при локальном облучении 10 Гр и более.

Печень. По морфологическим изменениям ткани после облучения печень относят к радиорезистентным органам. При общем облучении среднелетальными дозами в органе понижается активность каталазы и окислительного фосфорилирования, повышается активность щелочной фосфатазы, угнетаются процессы желчеобразования, изменяются обмен холестерина в паренхиматозных клетках и качественный состав желчи, нарушается процесс эвакуации ее в просвет кишечника. Изменяется белковый, жировой, углеводный обмен в печени. Возникают дегенеративные процессы, очаги кровоизлияний и некрозов в печеночной ткани.

При локальном облучении печени (поглощенная доза 40 Гр и более) развиваются необратимые изменения паренхимы печени, которые в дальнейшем вызывают цирроз. Один из постоянных признаков лучевого поражения печени при общем внешнем гамма-облучении организма — катаральное или катарально-геморрагическое воспаление с кровоизлияниями в стенки желчного пузыря. В большинстве случаев он бывает растянут относительно густой, тягучей, зеленоватого цвета желчью.

Сердечно-сосудистая система. Органы кровообращения не относятся к числу высокочувствительных к действию ионизирующих излучений.

Сердце. Реакция его на облучение сублетальными дозами проявляется довольно рано — изменяются ритм сокращений и электрокардиограмма, наблюдаются биохимические и гистохимические сдвиги в миокарде, возникают и другие нарушения. Наиболее радиочувствительная ткань — эндокард. При среднелетальных и более высоких дозах отмечаются морфофункциональные изменения во всех областях сердца — перикарде, эпикарде, миокарде и эндокарде. Микроскопически выявляются различные по величине кровоизлияния, которые могут быть в любом из участков сердца; обнаруживаются

дистрофия миокарда; снижается содержание РНК, ДНК и гликогена; появляются очаги некроза без выраженной воспалительной реакции вокруг них.

Кровеносные сосуды. Малые дозы излучения изменяют тонус сосудов и их реактивность к раздражителям другой природы. Кровяное давление понижается. Биохимические и морфологические изменения при облучении отмечаются во всех слоях сосудистой стенки. При воздействии среднетлетальными и более высокими дозами со временем отмечаются гиалиновое перерождение волокон наружного адвентициального слоя сосудов, изменение в эндотелиальных клетках капилляров и мелких сосудов. В результате теряется упругость сосудов и повышается их проницаемость, что в сочетании с тромбоцитопенией приводит к обширным и множественным геморрагиям в различных участках тела. В тяжелых случаях развиваются склеротические изменения в сосудах.

Органы дыхания. Легкие взрослых животных — стабильный орган с крайне низкой пролиферативной активностью в капиллярной системе. Данные о радиочувствительности слизистой оболочки верхних дыхательных путей разноречивы. Ее реакции на облучение, видимо, можно сравнить с реакциями слизистой оболочки ротовой полости. После малых и сублетальных доз радиации визуально незаметно каких-либо изменений со стороны органов дыхания, но при воздействии больших доз четко появляются нарушения внешнего дыхания: изменяются частота и глубина дыхательных движений. В легких быстро возникают застойные явления, наблюдается эмфизема; эти нарушения обнаруживаются при легкой кратковременной физической нагрузке. В разгар развития острой лучевой болезни в легких появляются множественные кровоизлияния, особенно по ходу сосудисто-бронхиальных узлов. Средостенные и бронхиальные узлы выступают в виде четок темно-красного цвета.

Изменения паренхимы легких характеризуются различными формами пневмоний — от участков серозной до обширных очагов геморрагической пневмонии. Плевра обычно серозно-фиброзно или фиброзно-геморрагически воспалена. При благоприятном исходе восстановительные процессы развиваются медленно. У крупных животных последствия ост-

рого лучевого поражения легких клинически проявляются до года периодическими хрипом и кашлем.

Сведения о лучевых повреждениях легких при локальном облучении разноречивы. Экспериментальными исследованиями и клиническими наблюдениями установлено, что характер лучевых повреждений легкого в основном обусловлен величиной поглощенной дозы. При местном облучении грудной клетки дозой 10 Гр и более легкие повреждаются в 100% случаев.

В механизме развития легочной патологии важное значение имеет возникновение повышенной сосудистой проницаемости и гемоциркуляторных расстройств в легких. Поражение бронхов приводит к нарушениям их проходимости, что обуславливает снижение газообмена, развитие ателектазов, пневмонии, плеврита, а в отдаленные сроки — развитие лучевого фиброза.

Органы выделения. Почки достаточно резистентны к действию излучения. В экспериментах на животных разных видов при местном и общем облучении морфологические и функциональные нарушения наблюдались только при дозах в несколько десятков грей.

Пороговая экспозиционная доза при локальном облучении почек составляет 30...50 Гр. При острой лучевой болезни во всех случаях поражаются почки и мочевыводящие пути — кровоизлияния различной интенсивности, застойные явления и дегенеративно-дистрофические изменения. Наиболее показательный признак поражения при острой лучевой болезни — изменение функции канальцев, в результате чего изменяется диурез. Так, после облучения среднетельными дозами в первый период увеличивается выделение натрия, калия, хлоридов, а также мочи. Последствием лучевого поражения почек может быть нефросклероз, морфологические и функциональные нарушения мочевого пузыря.

Костная и хрящевая ткани. Радиочувствительность их существенно зависит от возраста животного. У молодых растущих особей указанные ткани очень чувствительны, а у половозрелых, с законченным ростом, относительно радиорезистентны. Хрящевые клетки более чувствительны, чем остеокласты. При облучении у животных всех видов обнаруживают изменения в костной и хрящевой тканях.

Повреждения костей у половозрелых животных могут развиваться при местном облучении дозой 30 Гр и выше. В результате лучевого воздействия в кости сужаются кровеносные сосуды, нарушается питание. Это ведет к дистрофическим и другим процессам. Обычно нарушения первоначально возникают в местах соединения хряща с губчатой костью — происходит их разъединение. При облучении молодых животных замедляется рост костей и появляются различные деформации, например укорочение или искривление длинных костей, сплюсноты и другие формы.

В развитии лучевых поражений костей всегда выделяется латентный период, длительность которого у животных разных видов неодинаковая и зависит от степени тяжести процесса и продолжительности жизни.

Различают следующие виды лучевых повреждений костей: остеопорозы, остеонекрозы и остеомиелиты, которые могут осложняться переломами, вывихами и иногда трансформацией в злокачественные новообразования.

Особенно выраженные изменения костей и хрящей развиваются при попадании в организм остеотропных радионуклидов. При облучении черепа повышается вероятность развития кариеса зубов, у молодых животных замедляется рост.

Мышечная ткань. Наиболее радиорезистентна. Морфологические изменения ее возникают при местном облучении несколькими десятками грей. Однако при общем облучении животных изменения в мышцах наступают уже в ранние сроки лучевой болезни.

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА КРОВЬ И КРОВЕТВОРНЫЕ ОРГАНЫ

Изменения картины крови после облучения. Характерной реакцией на лучевое воздействие является изменение числа лейкоцитов. При облучении рентгеновскими лучами в среднетлетальных дозах и выше в первые минуты, часы наблюдается кратковременное незначительное уменьшение числа лейкоцитов (I фаза). В этот период отмечается изменение цветной люминесцентной реакции лейкоцитов с акрединовым оранжевым, что свидетельствует о ранних нарушениях

нуклеинового обмена в клетках. Вслед за кратковременным снижением количества лейкоцитов через 6...8 ч наблюдается их увеличение на 10...15% от исходного уровня (II фаза). К концу суток количество лейкоцитов резко снижается до исходного уровня и удерживается на нем.

Продолжительность возрастания числа лейкоцитов зависит от дозы облучения. При сублетальных дозах увеличение может продолжаться 3...5 сут, а при больших — его нет. Наиболее выраженное снижение количества лейкоцитов при облучении взрослых животных полулетальными дозами отмечается на 2...3-й неделе после воздействия. В данный период число лейкоцитов снижается в 3 раза и более по отношению к нормальным показателям. Восстановительный период, в течение которого количество лейкоцитов достигает исходной величины, составляет 2...3 мес.

Изменения общего количества лейкоцитов в периферической крови в первые 1...2 ч после лучевого воздействия являются следствием вегетативно-сосудистых реакций перераспределения крови, так как гибель клеток в данный период незначительная и это не может резко влиять на общее количество лейкоцитов. Изменения числа лейкоцитов в последующие сроки главным образом связаны с нарушениями костномозгового кроветворения. Следует отметить, что степень и фазность изменения общего количества лейкоцитов при действии ионизирующего излучения находятся в прямой зависимости от дозы радиации. При больших дозах первые две фазы проявляются в слабой степени, а фаза угнетения (уменьшения) наступает раньше и выражена сильнее. У молодых животных изменение содержания лейкоцитов наступает раньше и от меньших доз радиации, чем у взрослых, а восстановление показателей происходит быстрее и относительно полнее.

Изменения количества лимфоцитов. Наиболее радиочувствительной клеткой крови является лимфоцит, поэтому изменения количества лимфоцитов — объективный показатель степени лучевого поражения организма. В чувствительности лимфоцитов к лучевому воздействию заметных видовых различий пока не установлено. Продолжительность жизни лимфоцитов в крови здоровых животных может быть от нескольких часов до 1...2 сут.

При воздействии радиации уменьшается в первую очередь содержание лимфоцитов по сравнению с другими видами лейкоцитов, причем фазности в первоначальных изменениях, характерных для общего количества лейкоцитов, не наблюдается. Регистрируемое уменьшение содержания лимфоцитов отмечается при облучении дозой в 1 Гр. По мере увеличения дозы лимфопенический эффект усиливается. При облучении дозой ЛД_{50/30} наибольшее снижение количества лимфоцитов наблюдается через 1...3 сут. В этот период отмечаются и морфологические изменения лимфоцитарных клеток, нарушается соотношение малых, средних и больших форм, начинают преобладать малые лимфоциты, появляются двухъядерные клетки, зернистость и вакуолизация ядра и протоплазмы, изменяется активность ферментов.

Изменения лимфоцитов в крови обычно соответствуют изменениям их в селезенке, лимфоузлах, лимфофолликулах стенки кишечника, зубной железе и других органах.

Изменения количества нейтрофилов. У многих млекопитающих нейтрофилы составляют наибольшую часть лейкоцитов (до 60...70%). У кроликов и птиц зернистость этой группы лейкоцитов ацидофильная, поэтому их называют псевдоэозинофилами. Реакция нейтрофилов на радиационное воздействие — один из характерных признаков лучевого поражения; с небольшими особенностями она проявляется у животных всех видов.

У животных после лучевого воздействия в изменении количества нейтрофильных лейкоцитов выделяют 5 фаз (периодов):

I — фаза первоначального нейтрофилиза, наступающая в результате быстрого выхода клеток из костного мозга. Степень выраженности и продолжительности ее зависит от дозы облучения, вида животных и других факторов;

II — фаза первого опустошения. Число нейтрофилов в этот период уменьшается до 10...20% от исходного уровня, а в тяжелых случаях — еще больше, продолжаясь до гибели животного. Появление этой фазы объясняется прекращением выхода нейтрофилов из костного мозга и гибелью клеток вне сосудов;

III — фаза abortивного подъема, максимум ее отмечается на 7...17-й день. В данный период количество нейтрофилов может достигать 70...80% исходного значения. К этому вре-

мени возобновляется пролиферация выживших костномозговых клеток, большая часть которых была повреждена и стала неспособной к многократному полноценному делению. Прекращается митоз клеток, что приводит ко второму опустошению;

IV — фаза второго опустошения. Обычно оно бывает выражено сильнее и более продолжительно, чем во второй фазе;

V — фаза восстановления, развивается медленно и характеризуется началом репопуляции костного мозга.

Одновременно с фазными изменениями общего количества нейтрофилов изменяется и соотношение форм клеток. В фазы подъема увеличивается процент молодых форм — юных и палочкоядерных, т. е. отмечается сдвиг влево. В периоды опустошения преобладают сегментоядерные формы — сдвиг ядра лейкоцитарной формулы вправо. В эти периоды в крови появляются патологические формы — клетки с гиперсегментированными, пикнотичными или лизирующими ядрами, с вакуолями в ядре и цитоплазме, наступают биохимические изменения. Сроки восстановительных процессов нейтрофильных (псевдозоинофильных) клеток по сравнению с лимфоцитами растянуты и могут проходить с довольно значительными колебаниями.

Изменение количества эозинофилов. При действии сублетальных доз больших сдвигов в содержании эозинофилов в крови не установлено. Облучение в полулетальных дозах приводит к снижению их количества, за которым следует медленное восстановление. В хронических случаях радиационного воздействия часто развивается эозинофилия.

Изменение количества базофилов. Базофилы характеризуются высокой радиочувствительностью. При облучении дозами 1 Гр и выше в течение первых суток резко падает их количество; на высоте лучевой реакции они из крови исчезают. Относительно других форменных элементов крови восстановительный период количества этих клеток затягивается.

Изменение количества моноцитов. При облучении содержание моноцитов изменяется значительно меньше, чем других групп лейкоцитов. При облучении в полулетальных дозах количество моноцитов уменьшается на третьи сутки с максимумом депрессии к концу недели, после чего содержание их восстанавливается.

Изменение количества эритроцитов. Литературные данные свидетельствуют об относительно малой по сравнению с лейкоцитами радиочувствительности эритроцитов. Например, облучение эритроцитов собак и кроликов вне организма дозой 0,4 и 0,6 кГр не изменяет их функциональных свойств при введении реципиенту, обнаружено лишь незначительное укорочение их жизни. При облучении животных в сублетальных дозах количество эритроцитов в крови практически не изменяется, не происходит также существенного снижения уровня гемоглобина и показателя гематокрита. Однако при исследовании ретикулоцитов выявляются изменения возрастного состава эритроцитарных клеток. Так, ретикулоцитов у облученных животных на вторые-третьи сутки становится меньше на 10...20%, а с пятых суток содержание их увеличивается до нормы или выше; периодические колебания удерживаются на таком уровне до выздоровления. Повышение количества ретикулоцитов в крови облученного организма свидетельствует об активации эритропоэза, сокращении продолжительности жизни эритроцитов и нарушении их функционально-морфологических структур. Ускорение эритропоэза при облучении сублетальными дозами обеспечивает достаточно высокую компенсацию и восстановление картины красной крови. В случае облучения летальными дозами снижение содержания эритроцитов в крови ускоряется вследствие кровоизлияний, в результате чего возникает так называемая постгеморрагическая анемия.

Изменения в картине красной крови наиболее характерны при воздействии полублетальными дозами. В течение первых трех суток после облучения наблюдается увеличение количества клеток и содержания гемоглобина в 1 мм³ крови на 10...15%, затем следует период развития анемии с максимумом проявления ее на 15...20-е сутки, когда содержание эритроцитов и гемоглобина снижается в 2...3 раза и более против нормы. Одновременно с количественными сдвигами наблюдаются морфологические и биохимические нарушения в эритроцитах. В период анемии появляются пойкилоциты, анизоциты, клетки с пикнотичными ядрами, двухъядерные, с наличием вакуолизации ядра, цитоплазмы и токсической зернистости в ней. Увеличиваются средние размеры эритроцитов; в крови появляются в некоторых случаях эритро-

нормобласты. Цветной показатель или остается без изменений, или несколько увеличивается. Восстанавливается картина крови у животных медленно, в течение 2...5 мес.

Изменение количества тромбоцитов. По радиочувствительности тромбоциты занимают среднее положение между лейкоцитами и эритроцитами. При облучении среднелетальными дозами количество тромбоцитов до 5-го дня удерживается относительно на одном уровне, а затем резко падает, опускаясь до минимума на 9...10-е сутки. В эти сроки у животных, больных острой лучевой болезнью, появляются геморрагии, а при больших дозах развивается геморрагический синдром.

У птиц тромбоциты крупнее, эллипсоидной формы, с хорошо выраженным ядром и цитоплазмой. При сублетальных дозах облучения снижение количества тромбоцитов происходит медленно, с максимумом депрессии на 7...8-й день. В случае облучения полулетальными дозами падение отмечается с первых суток. Появляются тромбоциты двухъядерной формы, с непропорциональными размерами ядра и протоплазмы, с наличием зернистости в последней и другими отклонениями. Следует отметить, что в облученном организме тромбоциты, помимо количественных сдвигов, претерпевают и качественные изменения, которые приводят к нарушениям процессов поглощения протромбина и продолжительности свертывания крови, рекальцификации плазмы и другим дефектам. Восстановление числа тромбоцитов наблюдается на 35...45-й день после облучения.

Изменения свертываемости крови при облучении. Один из постоянно наблюдаемых признаков радиационного поражения животных — нарушение свертываемости крови, часто приводящее к геморрагическому синдрому. О нарушении процесса свертываемости крови при острой лучевой болезни свидетельствуют прежде всего изменения показателей, отражающих общую коагуляционную активность крови. К ним относятся время свертывания крови, время рекальцификации, тромботест, толерантность крови к гепарину и тромбоэластограмма.

При острой лучевой болезни наблюдается нарушение I фазы свертывания крови; при этом снижается количество образующегося тромбопластина. Основной причиной указанного нарушения является дефицит тромбопластического

фактора тромбоцитов вследствие наступающей тромбоцитопении; другой причиной этого может быть уменьшение содержания антикоагулянтов (гепарина, антитромбопластина).

II фаза свертывания крови, когда под влиянием активного тромбопластина протромбин переходит в тромбин, при лучевой болезни мало изменяется.

Существенным изменениям подвергается III фаза свертывания крови, т. е. процесс образования фибрина из фибриногена. В ходе лучевой болезни наблюдается отчетливое повышение количества фибриногена. Существенно изменяется и его качество, что приводит к уменьшению скорости перехода белка в фибрин. Ультраструктура фибрина при лучевой болезни нарушается, фибриновые волокна укорачиваются и располагаются беспорядочно, теряют характерную для физиологического фибрина поперечную исчерченность, приобретают аморфный вид. В результате изменения фибрина, а также количества и качества тромбоцитов ухудшается ретракция (сжатие) кровяного сгустка — конечный этап формирования тромба. Параллельно этому усиливается фибринолитическая, уменьшается антифибринолитическая активность крови, что приводит к более быстрому, чем в норме, лизису кровяного сгустка.

Имеется прямая взаимосвязь между степенью тяжести болезни и выраженностью расстройства гемокоагуляции. Наибольшее замедление свертывания крови наблюдается в разгар заболевания. При этом прослеживается зависимость между степенью снижения количества тромбоцитов и нарушением свертываемости. Большинство исследователей считают тромбоциты наиболее уязвимым звеном системы гемостаза. А. Г. Аладатов установил, что уже начиная со вторых суток после облучения в тромбоцитах появляются вакуоли, число которых нарастает в разгар болезни. Одна из причин тромбоцитопении и нарушения функциональных свойств кровяных пластинок — поражение мегакариоцитарного ростка костного мозга, механизмы которого изучены недостаточно.

Наряду с количественными и морфологическими изменениями тромбоцитов отмечаются нарушения их функциональных свойств, уменьшается адгезивность, изменяется способность к агрегации (скорость и степень ее замедляются), повы-

шается дезагрегация тромбоцитарных агрегатов, снижаются тромбопластиновая, фибринозная, серотонинзахватывающая, ретрактильная и ангиотрофическая функции тромбоцитов.

Реакции кроветворных органов на лучевое воздействие. Изменения картины периферической крови при лучевых заболеваниях — одно из основных следствий поражения гемопоэтической ткани. Нарушения процессов кроветворения наступают очень рано, непосредственно в ходе лучевого воздействия, и в дальнейшем развиваются пофазно.

Костный мозг. Обладает крайне высокой радиочувствительностью, в связи с чем поражение системы кроветворения всегда наблюдается в той или иной степени при общем облучении как его типичное проявление.

Основное назначение костного мозга — продукция зрелых высокодифференцированных клеток крови. В нормальных условиях гибель или исчезновение каждого клеточного элемента в периферической крови или в другом участке организма компенсируется образованием в среднем одной клетки в костном мозге. По меткому выражению В. Бонда, костный мозг представляет собой «фабрику», производящую клетки, а периферическая кровь — «службу сбыта» организмом уже зрелых элементов.

Общий принцип, обеспечивающий устойчивую работу любой системы клеточного обновления (имеется в виду поддержание ее в состоянии количественного и качественного динамического равновесия), состоит в том, что по мере отмирания и удаления зрелых клеток из функционального пула вместо каждой из них поступает новая, находящаяся в этот момент на стадии максимальной подготовленности. Таким образом, функционирующая система самоподдерживает себя из-за необходимости восполнения постоянно происходящих утрат, являющихся своеобразным стимулом к активации всех предшествующих пулов, в результате чего осуществляется перманентное клеточное обновление. Под воздействием излучения в любой клеточной системе обновления происходят резкие нарушения динамического равновесия между отдельными пулами, приводящие к тяжелым функциональным расстройствам в самой системе, а в зависимости от ее значения для жизнедеятельности и к соответствующим последствиям в организме.

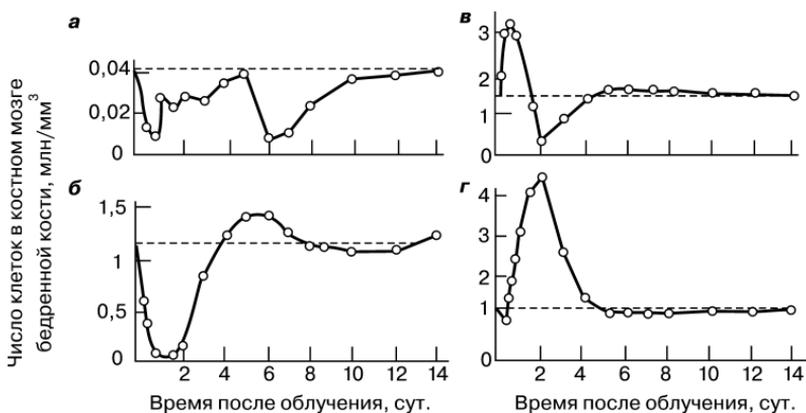


Рис. 43
Изменение числа эритробластических клеток
в костном мозге животных после гамма-облучения:

a — пронормобласты; *b* — нормобласты; *v* — ретикулоциты; *г* — эритроциты.

Реакции костного мозга на облучение проявляются очень быстро. При воздействии больших доз радиации уже в процессе облучения наблюдается прекращение митоза клеток и появляются дегенеративные формы клеток эритро- и миелобластического ряда и мегакариоцитов.

При внешнем облучении животных дозами $LD_{50/30}$ и выше вначале повреждаются эритробласты, затем в следующих стадиях нарушается созревание клеток эритробластического ряда: пронормобласты — нормобласты — ретикулоциты — эритроциты (рис. 43). Количество пронормобластов резко снижается уже к 16...18 ч, а клеток следующих стадий — на 1...3-е сутки. Содержание ретикулоцитов и нормоцитов в этот период повышено. Следовательно, эти клетки и после облучения продолжают дифференцироваться в более зрелые формы.

Снижение же количества эритроцитов в крови свидетельствует об их гибели в сосудистом русле и неполном замещении. Анемия обычно развивается спустя 2...3 недели. С увеличением дозы облучения нарастают и дегенеративные изменения эритроцитарных клеток в костном мозге. При летальных и сверхлетальных дозах радиации содержание клеток не восстанавливается и происходит аплазия костного мозга. Ретикулярные и жировые клетки костного мозга относительно радиоустойчивы, поэтому их количество не претерпевает заметных

изменений. При гистологическом исследовании устанавливаются расширение синусов костного мозга, отечность и кровенаполненность, в последующем гемопоэтическая ткань подвергается жировому и желатинообразному перерождению.

Кровотворная ткань, прилегающая непосредственно к хрящевой пластинке эпифизов, подвергается изменениям раньше и сильнее, чем костный мозг, расположенный ближе к центру самой кости, что связывают с различным содержанием кислорода в этих участках кости.

Ранние изменения костного мозга при внешнем облучении характеризуются относительным и абсолютным уменьшением незрелых форм красной и белой фракций крови, тромбоцитов и увеличением сегментоядерных гранулоцитов. Тромбоцитопения возникает в результате опустошения костного мозга (рис. 44); появление ее обычно сопровождается геморрагиями.

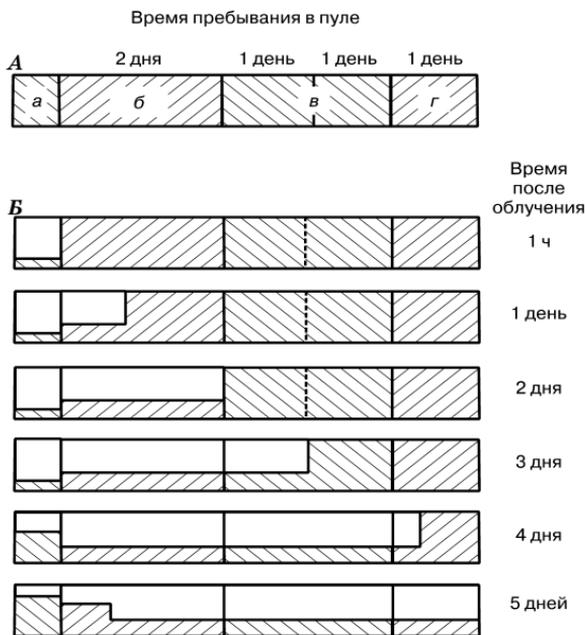


Рис. 44

Соотношение клеток в костном мозге:

А — в нормальном состоянии; Б — после облучения: а — стволовые клетки; б — делющиеся и созревающие; в — только созревающие; з — кровь.

Отмечено, что костный мозг обладает достаточно большой способностью к регенерации, которая при среднетлетальных дозах наступает через 4...7 суток; обычно к концу 4-й недели картина костного мозга становится близкой к нормальной. На темпы и полноту восстановительных процессов в костномозговой ткани большое влияние оказывает равномерность облучения. При экранировании участка гемопоэтической ткани значительно уменьшается степень повреждения, возрастают скорость и полнота восстановительных процессов. В реакциях костномозговой ткани проявляются и видовые различия радиочувствительности; например, у крупных животных они отмечаются позднее, чем у мелких лабораторных животных.

Лимфатическая ткань. Исключительно высокочувствительна к облучению. Радиационное воздействие приводит к раннему разрушению лимфобластов и лимфоцитов в лимфоидной ткани и лимфоцитов в периферической крови. Заметные морфологические изменения в лимфоузлах у кроликов регистрируются при облучении дозой 0,5 Гр, частичное разрушение — при воздействии дозой 4 Гр. Полулетальные и летальные дозы облучения, как правило, приводят к выраженным сосудистым расстройствам, дегенеративно-некротическим и атрофическим изменениям лимфоузлов и других лимфоидных образований. У выживших крупных животных после воздействия указанными дозами восстановительные процессы в лимфоузлах затягиваются до трех месяцев и более. При местном облучении лимфоузлов дозой 20 Гр и более в отдаленные сроки отмечаются развитие анастомозов поверхностных и глубоких сосудов, экстравазаты, лимфастазы, уменьшение размеров узлов и уплотнение их паренхимы.

Селезенка. Клетки селезенки довольно рано реагируют на лучевое воздействие. В результате разрушения клеточных элементов орган уменьшается в размере и массе. При облучении полулетальной дозой сразу же прекращается митоз и наступает гибель части лимфоцитов. Уменьшается содержание в ткани РНК и ДНК и увеличивается количество пигмента. Ретикулярная ткань более устойчива, поэтому с ее стороны заметно лишь относительное увеличение.

Вилочковая (зобная) железа. Клетки зобной железы — тимоциты — весьма радиочувствительны. При воздействии

среднетлетальными дозами уже в течение первых суток отмечается выраженное клеточное опустошение, погибает большая часть лимфоцитов; в разгар болезни остаются только единичные лимфоциты. Восстановление тимоцитов (лимфоцитов) идет вначале в мозговом веществе, а затем они поступают и в корковый слой железы. Другие виды клеток — соединительнотканнные, эпителиальные и макрофаги — проявляют большую устойчивость к облучению. Изменения функции вилочковой железы под влиянием ионизирующего излучения выяснены пока мало.

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОРГАНЫ РАЗМНОЖЕНИЯ И ПОТОМСТВО ЖИВОТНЫХ

Чувствительность к радиации организма и его органов во многом определяется периодом их развития. Она изменяется в течение всей жизни животного. Общая тенденция такова: начиная от зародыша и заканчивая половозрелым состоянием, радиочувствительность организма и его органов постепенно понижается, в среднем возрасте стабилизируется и к старости вновь повышается. У половозрелых животных отмечены некоторые половые различия радиочувствительности. Так, у самок в отдельные стадии полового цикла радиочувствительность заметно понижается, что связано с защитным действием половых гормонов, повышающих неспецифическую резистентность организма. Женские половые гормоны при введении их до облучения оказывают определенное защитное действие как у самок, так и у самцов. У самок радиочувствительность повышается при беременности и в подсосный период.

Половые железы. У млекопитающих они реагируют на действие радиации в принципе однотипно. Основное видовое отличие — величина повреждающей дозы, которая тесно связана с видовой радиочувствительностью организмов. При действии радиации на половые железы больше страдает генеративная функция (гаметогенез) и относительно меньше нарушается их гормональная деятельность.

Семенники. Высокая радиочувствительность мужских половых желез известна очень давно. Еще в 1903 г. Г. Альберс-

Шонберг показал возможность радиационной стерилизации яичек кроликов и морских свинок, а И. Бергонье и Л. Трибондо, изучая радиационные повреждения семенников, смогли сформулировать зависимость радиочувствительности клеток от интенсивности деления и степени дифференцировки.

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

Вследствие крайне высокой радиочувствительности половых клеток на ранних стадиях развития уже при дозах 0,5...1 Гр у большинства животных происходит массивное клеточное опустошение семенников, а выше 2...4 Гр наступает стерильность. Зрелые клетки — сперматозоиды, напротив, крайне радиорезистентны. В опытах на мышах, крысах и кроликах показано, что число сперматозоидов, их морфология, подвижность и способность к оплодотворению не меняются после облучения при дозах до 10 Гр. Поэтому плодовитость облученных млекопитающих сохраняется до тех пор, пока не истощится запас жизнеспособных зрелых половых клеток (по аналогии с костным мозгом и кишечником). Но и после этого наступающая стерильность носит временный характер, так как происходит постепенное восстановление сперматогенеза из сохранившихся жизнеспособных сперматогониев типа *А*.

Послелучевые реакции в семенниках, как и в других органах животного, зависят от дозы, кратности и мощности облучения. Изучение степени нарушения спермиогенеза у баранов при лучевом воздействии показало, что объем спермы при средней степени лучевой болезни на 30-й день уменьшается наполовину. Сокращение объема эякулята продолжается до трех месяцев, к концу второго месяца могут наступить импотенция и аспермия. Восстановление объема эякулята у баранов, облученных дозой 3 Гр, происходит к 4...7-му месяцу (табл. 25). Цвет, запах и консистенция спермы у всех облученных баранов почти не изменяются.

Таблица 25

Сроки проявления изменений показателей спермы баранов после внешнего гамма-облучения, мес. (по П. А. Карташову)

Показатель	Доза, Гр	
Объем эякулята:		
минимальный	3	4
восстановление	6	7
Концентрация спермиев:		
минимальная	5	3
восстановление	10	10
Подвижность спермиев:		
минимальная	1	2
восстановление	4 (95%)	8 (95%)

Примечание. Мощность дозы 4 Гр/мин.

Активность (подвижность) спермиев у баранов, облученных дозой 2 Гр, через 10 дней снижается до 80% и остается на этом уровне в течение 3...4 недель; затем она постепенно повышается и к 3...4-му месяцу достигает 90...95%. При облучении баранов дозой 3 Гр через 10 дней активность проявляют лишь 55% спермиев, к 20-му дню она повышается до 70%, но к двум месяцам вновь снижается до 45%. В последующие сроки до года подвижность спермиев находится в пределах 60...95%.

При облучении баранов ЛД_{50/30} активность их спермиев через месяц составляла 71%. Затем она значительно колебалась: через 7 мес. снижалась до 60%, а через 12 мес. поднималась до 87%, причем какой-либо зависимости между объемом эякулята и подвижностью спермиев не прослеживается. Облучение баранов указанными выше дозами приводило к уменьшению концентрации спермиев в эякуляте, причем в первый месяц снижение ее происходило в относительно одинаковой степени (в 2 раза) при всех дозах. Это свидетельствует о том, что радиация действует в основном на молодые стадии спермиогенных клеток. Зрелые спермии, по-видимому, дозами до 3 Гр повреждаются мало. Объем эякулята у облученных баранов изменяется несколько позднее, чем концентрация и подвижность спермиев. Из этого можно сделать вывод о том, что поражаются, хотя и несколько позже,

и придаточные половые железы, что и обуславливает снижение жизнеспособности спермиев.

У баранов, перенесших лучевую болезнь средней степени тяжести, относительно полно репродуктивная функция восстанавливается в первые 3...4 мес. При тяжелой степени острой лучевой болезни восстановительные процессы спермиогенеза происходят с ремиссиями и растягиваются по времени. Ягнята, полученные от овцематок, осемененных спермой баранов, перенесших тяжело протекающую острую лучевую болезнь, имели пониженную жизнеспособность.

Пострадиационные изменения семенников наблюдаются и у животных других видов при общем внешнем гамма- или рентгеновском облучении. Так, *у хряков* при средней степени лучевой болезни первые 2 недели не обнаруживается нарушения половой активности. Затем ухудшается качество спермы, достигая максимума на 6...8-й неделе. После этого начинаются восстановительные процессы, и к 4-му месяцу концентрация спермиев, как правило, достигает нормальной величины. При тяжелой и особенно крайне тяжелой степени лучевой болезни изменения в семенниках идут в более интенсивной форме. При вскрытии отмечают уменьшение и дряблость семенников и кровоизлияния в различных участках.

У быков-производителей внешнее облучение дозами до 4 Гр не вызывает стойких изменений функции семенников. При более высоких дозах в течение первых двух недель отмечаются морфологические изменения в семенниках, которые в последующем приводят к угнетению спермиогенеза. Восстановление функции семенников происходит медленно; сроки его зависят от тяжести общей лучевой реакции. В тяжелых случаях животное может остаться бесплодным в течение нескольких месяцев. У ослов, облученных дозами до 4 Гр, воспроизводительная функция сохраняется, а при дозе облучения 7,5 Гр через месяц обнаруживается аспермия. Признаки восстановления спермиогенеза наступают через 1...2 мес.

Половая функция петухов при внешнем гамма-облучении дозой 6 Гр не претерпевает заметных изменений. Небольшие дозы стимулируют рост семенников (рис. 45). Дозы, вызывающие тяжелое и сверхтяжелое течение лучевой болезни, приводят к нарушениям половой функции уже в первые дни

после облучения. У выживших петухов полного восстановления половой активности, качества спермы обычно не наступает.

Степень повреждения органов размножения у самцов при внутреннем облучении определяется типом распределения радионуклидов, попавших в организм, видом и энергией излучения,

эффективным периодом полувыведения и другими условиями. Почти все радионуклиды при попадании в организм вызывают патологические изменения структуры и функции семенников.

У молодых неполовозрелых животных семенники более чувствительны к действию радиации, чем у половозрелых. Эта зависимость прослежена на млекопитающих и птицах.

Реакции семенников на хроническое и повторное радиационное воздействие у сельскохозяйственных животных изучены мало.

Немногочисленные опыты свидетельствуют о том, что повторное облучение в летальных дозах вызывает более тяжелое поражение. В большей степени снижаются концентрация спермиев и их активность в эякулятах и увеличивается период восстановительных процессов. Многократные облучения самцов значительно усугубляют течение радиационных поражений, намного увеличивают продолжительность восстановительного процесса, при этом большой процент самцов остается бесплодным.

Хроническое лучевое воздействие обычно вызывает более выраженный эффект в половых железах, чем однократное воздействие той же суммарной дозой. В связи с тем что реакция семенников более выражена на повторное, многократное и хроническое облучение, их относят к числу органов, в которых проявляется кумуляция повреждающего действия радиации.

Яичники. Физиологическая регенерация в половых органах самок млекопитающих проявляется в основном не в смене отдельных клеток, а в циклически повторяющихся процессах развития, регулируемых эндокринным аппаратом,



Рис. 45
Стимуляция роста семенников (справа) у трехмесячных петухов после рентгеновского облучения их в суточном возрасте дозой 0,25 Гр (по В. И. Черемухину)

и охватывающих целые клеточные комплексы. В процессе развития того или иного фолликула происходит созревание женских половых клеток от оогоний до ооцита. Наиболее радиочувствительный элемент яичника — *яйцеклетка*.

Стерильность самок возникает при больших дозах, чем у самцов (у мышей — при 2...5 Гр, у крыс — при 15...20 Гр), но, как правило, необратимо. Это связывают с тем, что образование женских половых клеток заканчивается в ранние сроки после рождения, и у взрослых яичники не способны к активной регенерации. Поэтому если облучение вызвало гибель всех потенциальных яйцеклеток, то плодовитость утрачивается необратимо.

Пороговая доза, вызывающая постоянную стерильность у самок, составляет от 2,5 до 6 Гр при остром облучении и более 0,2 Гр/год при длительном многолетнем облучении.

У животных раннего возраста и в период полового созревания яичники более радиочувствительны, чем у половозрелых. У последних, в свою очередь, радиочувствительность железы зависит от ее функциональной активности. Например, облучение в период созревания фолликулов вызывает изменения яичников в большей степени, чем во время роста и развития желтого тела. Эти различия очень четко прослеживаются при облучении несущихся и несущихся кур.

При общем облучении у самок возникают изменения половых циклов, степень и направленность которых зависят от дозы воздействия. Для сельскохозяйственных животных повреждающая доза составляет около 1,5 Гр.

Картина радиационного поражения яичников при однократном облучении самок полулетальными и более высокими дозами излучений в принципе однотипна у всех животных. Вначале наблюдаются повреждения и гибель наиболее радиочувствительных тканевых элементов железы — зрелых фолликулов, затем дегенерация и гибель первичных фолликулов и других клеточных элементов. Многократные лучевые воздействия на яичники приводят к деструкции фолликулярного эпителия и фиброзному разрастанию соединительной ткани железы.

Повреждение яичников может наблюдаться и при внутреннем облучении организма. В таких случаях степень пора-

жения желез будет определяться поглощенной тканями животного дозой излучения.

При инкорпорации радионуклидов в дозах, не вызывающих картину острого лучевого заболевания, характерно вначале повышение функциональной активности половых желез, а затем медленное развитие патологических процессов.

Восстановление функции гонад как при остром, так и при хроническом лучевом поражении идет медленно и параллельно с общим выздоровлением. После переболевания острой и хронической лучевой болезнью тяжелой степени животные в большинстве случаев остаются бесплодными. Однако своевременное лечение, полноценное, богатое витаминами кормление и хорошие условия содержания животных в период лучевой болезни обеспечивают в ряде случаев полное или частичное восстановление функции половых желез за счет сохранившихся в яичниках первичных фолликулов.

Влияние ионизирующего излучения на зародыш, эмбрион, плод и течение беременности. Радиочувствительность организма, начиная от зародыша и заканчивая старостью, изменяется. В период внутриутробного развития реакции на облучение и их последствия в очень большой степени зависят от стадии развития организма. Выделяют следующие периоды внутриутробного развития организма животных:

- зародышевый (эмбриональный) период, в который закладываются и развиваются все системы органов; продолжительность его у коров 34 дня, у овец — 28, у свиней — 21 день;
- предплодный период у коров длится с 35-х по 60-е сутки, у овец — с 29-х по 45-е, у свиней — с 22-х по 30-е сутки; в данный период закладывается молочная железа, формируется хрящевой скелет, определяется пол и начинается окостенение скелета;
- плодный период характеризуется дальнейшим ростом плода и развитием видовых, породных и индивидуальных особенностей животного.

Чем раньше после оплодотворения самка подвергается облучению, тем больше вероятность гибели плода или аномалии его развития. Имеются видовые различия радиочувствительности, которые обуславливаются главным образом

продолжительностью и сроком беременности. Облучение сублетальными дозами в первые дни беременности до имплантации зародышей приводит к очень высокой их гибели (70...80%). В эмбриональный период происходит закладка органов, поэтому эффектами радиационного воздействия чаще всего становятся уродства и другие аномалии развития. Радиочувствительность зародыша в плодный период значительно ниже, чем в предыдущих стадиях его развития; внутриутробная смертность и аборт наступают реже.

Однако увеличивается процент смертности после рождения. Нередко у плода, облученного в конце плодного периода, развивается острая лучевая болезнь, и в результате этого у новорожденного замедляются рост, развитие, отмечаются анемия, лейкопения, кровоизлияния в различных участках и другие патологии. Нарушение кроветворения — одна из главных причин гибели плодов и новорожденных.

При внутреннем облучении, вызванном попаданием радионуклидов в организм, характер течения беременности и развития плода определяется степенью лучевого поражения. При острой лучевой болезни беременность прерывается и возникают аборт. У коров, перенесших подострую лучевую болезнь, способность к воспроизводству сохраняется. Однако беременность и роды чаще (до 50%) протекают патологически, заканчиваясь абортами, преждевременными родами, рождением нежизнеспособного потомства, смертью матери. У выживших коров последующие беременности тоже протекают часто патологически.

Сильно влияют на беременность и зародыш радиоактивные изотопы йода. Они имеют повышенную биологическую активность, легко проходят через плаценту и распределяются равномерно по тканям плода. С начала функционирования щитовидной железы у плода (у крыс и овец это наступает соответственно на 18-й и 50-й дни беременности) йод концентрируется в тиреоидной ткани, и к моменту рождения его накапливается в 3 раза больше, чем в железе матери. В качестве примера можно привести динамику перехода радиоактивного ^{131}I через плаценту у крыс: на 15-й день беременности его поступает в ткани плода 0,5%, на 18-й день — 8 и на 20-й день — 40% количества, содержащегося в крови матери.

Радиоактивный йод обладает высоким поражающим действием на зародышей в течение всего периода беременности. У коров нарушения беременности, родов и развития зародышей регистрируются при введении ^{131}I в количестве $5,18 \cdot 10^9$ Бк (140 мКи). Гибель зародышей в первый период беременности может достигать 30%, а у выживших эмбрионов наблюдаются замедление роста, уменьшение материнской и детской плаценты, нарушение развития органов. У потомства наблюдаются повышенная чувствительность к аэрогенным инфекциям, депрессия, эпиляция, запоры, метеоризм и пр. Патогенное действие радиоактивных изотопов йода на зародыш и плод проявляется как непосредственно, вызывая нарушения в тиреоидной ткани и в эндокринной системе в целом, так и опосредованно в результате изменения функций ряда органов организма матери, и в первую очередь эндокринных желез — щитовидной железы, надпочечников, яичников, гипофиза, паращитовидной железы и др.

В условиях хронического действия повышенного радиационного фона (Чернобыльская авария) у коров в первую половину стельности выявлен функциональный гипотериоз, особенно на 4...5-м месяцах. Во второй половине стельности установлено нарушение соотношения половых гормонов в сторону увеличения эстрогенов. Это способствует активизации сократительной функции матки, увеличивая тем самым риск самопроизвольных аборт (А. Д. Белов, Н. П. Лысенко, 1990).

Выраженное эмбриотоксическое действие оказывает и ^{90}Sr при попадании в организм матери до или в период беременности. Он тоже легко переходит через плаценту и откладывается в скелете плодов. При поступлении стронция в организм матери до наступления беременности в плод переходят сотые доли процента его, а при введении изотопа матери в последнюю треть беременности — 0,5...1,7%. При хроническом поступлении ^{90}Sr в организм матери в скелете новорожденных его содержится 17...50% концентрации в скелете матери.

Скорость перехода ^{90}Sr из организма матери в плод у животных разных видов различная, что определяется продолжительностью и степенью оксификации скелета плода.

В процессе перехода кальция и стронция через плаценту имеют значение градиент концентрации и активный

транспорт ионов. На внутриутробное развитие зародыша ^{90}Sr действует при относительно высоких концентрациях, например при введении свиноматкам через день $9,25 \cdot 10^5$ Бк (25 мкКи) в течение двух лет. Стронций вызывает гибель зародышей в период имплантации и плацентации, недоразвитие плода, уродства. Ведущее место в патологии беременности занимают изменения сосудистой системы плацент плода и матери. У поросят, получаемых от свиней, которым вводили ^{90}Sr по $46,25 \cdot 10^5$ Бк (125 мкКи) ежедневно в течение 6 лет, до 2,5...3 лет наблюдались отставание роста, повышенная смертность от болезни крови и злокачественных новообразований.

Хроническое поступление ^{90}Sr в организм животных с кормом после Чернобыльской катастрофы также увеличивает процент гибели зародышей, недоразвитие плода и уродства (А. Д. Белов, Н. П. Лысенко, 1990).

Влияние лучевого поражения родителей на потомство. При хроническом течении лучевой болезни воспроизводительная функция животных может не нарушаться. Она нередко восстанавливается после переболевания этой болезнью с острым течением. В таких случаях животные могут давать потомство, но развитие его, начиная от зародыша и до половой зрелости, будет определяться состоянием здоровья родителей. Если родители полностью выздоровели и находятся в хорошем состоянии и в их половых клетках не произошли мутации, то такие животные дают полноценное потомство. Если же полного восстановления структуры и функции одного или нескольких органов не произошло, то, безусловно, у потомства в большинстве случаев будет проявляться один или несколько признаков неполноценности, например морфологический — гипотрофия, функциональный — уменьшение двигательной активности, биохимический — гипопроотеинемия, иммунологический — снижение естественного иммунитета.

Как показали наблюдения, дети, родившиеся от матерей, подвергшихся воздействию облучения при взрыве атомных бомб в Японии, имели пониженную жизнеспособность; у детей старше года в 25% случаев проявлялась умственная отсталость, у других были микроэнцефалалия и болезнь Дауна.

У потомства, полученного от пораженных радионуклидами родителей, главным образом матерей, наблюдаются бо-

лее выраженные изменения, чем при внешнем облучении. В данном случае с молоком матери потомству будут поступать радионуклиды. Причем с молоком их поступает больше, чем через плаценту, ибо концентрация в молоке ряда изотопов бывает в несколько раз выше, чем в плазме крови матери. Например, в молоке коров и коз концентрация стронция в 5...10 раз, а йода до 12 раз выше, чем в плазме крови.

Неполноценность потомства, полученного от пораженных радиацией, иногда выявляется только при функциональных нагрузках на организм, например при беременности, кратковременной повышенной физической работе, действии повышенной или пониженной температуры, введении некоторых фармакологических средств и при других факторах. Использование функциональных нагрузок в клинических и лабораторных исследованиях позволяет достаточно объективно оценить степень неполноценности животного и его хозяйственно полезные качества.

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ИММУНОБИОЛОГИЧЕСКУЮ РЕАКТИВНОСТЬ ЖИВОТНЫХ

Ответные реакции организма на внедрение болезнетворного агента выражаются иммунологической реактивностью, с которой связаны защитные возможности организма, способность его сопротивляться инфекционному агенту и вырабатывать иммунитет к той или иной болезни. Естественная резистентность зависит от состояния иммунной системы. На пути проникновения микроорганизмов и вирусов внутрь организма имеется ряд защитных барьеров: кожа, слизистые оболочки, лимфатическая и кровеносная системы.

Неповрежденный кожный покров представляет собой непреодолимое препятствие для патогенных микроорганизмов. Кожа не только механически преграждает путь, но и обладает бактерицидными свойствами. Бактериальные культуры, нанесенные на поверхность кожи, погибают значительно быстрее, чем те же бактерии, загрязняющие животноводческие помещения или предметы ухода за животными. Основные антибактериальные вещества кожи — ненасыщенные жирные кислоты, обнаруженные в выделениях сальных желез,

а также локально высокое осмотическое давление, которое создают соли при потоотделении. Кроме того, секрет кожи имеет кислую реакцию, неблагоприятную для размножения многих видов микроорганизмов.

Неповрежденная слизистая оболочка органов дыхания, пищеварения, выделяющая бактерицидные секреты, препятствует проникновению большинства микроорганизмов.

Основу естественного иммунитета составляют неспецифические механизмы, связанные с функционированием клеточных (нейтрофилы, макрофаги, ЕК-клетки и др.) и гуморальных (комплемент, лизоцим, интерфероны и др.) факторов.

Гуморальные факторы обеспечивают необходимые уровни бактерицидной активности сыворотки крови за счет лизоцима, комплемента, пропердина, интерферона, бактериолизина, нормальных антител и др. Фагоцитарной способностью обладают клетки ретикулоэндотелиальной системы: лейкоциты крови и лимфы, фиксированные купферовы клетки печени, ретикулярные клетки селезенки, костного мозга, лимфатических узлов, эндотелий кровеносных и лимфатических сосудов, гистициты рыхлой соединительной ткани.

Ионизирующее излучение в любых дозах вызывает функциональные и морфологические изменения в клеточных структурах и изменяет деятельность почти всех систем организма. В результате повышается или угнетается иммунологическая реактивность животных. Иммунная система высокоспециализированная; ее составляют лимфоидные органы, их клетки, макрофаги, клетки крови (нейтрофильные, эозинофильные и базофильные, гранулоциты), система комплемента, интерферон, лизоцим, пропердин и другие факторы. Главными иммунокомпетентными клетками являются Т- и В-лимфоциты, ответственные за клеточный и гуморальный иммунитет.

Направленность и степень изменений иммунологической реактивности животных при действии радиации определяются главным образом поглощенной дозой и мощностью облучений. Малые дозы излучения повышают специфическую и неспецифическую, клеточную и гуморальную, общую и иммунобиологическую реактивность организма, способствуют благоприятному течению патологического процесса, повышают продуктивность скота и птиц.

Ионизирующее излучение в сублетальных и летальных дозах приводит к ослаблению или угнетению иммунологической реактивности животных. Нарушение показателей иммунобиологической реактивности отмечается значительно раньше, чем появляются клинические признаки лучевой болезни. С развитием острой лучевой болезни иммунологические свойства организма все более ослабляются.

Понижаться резистентность облученного организма к возбудителям инфекции может по следующим причинам: нарушение проницаемости мембран тканевых барьеров, снижение бактерицидных свойств крови лимфы и тканей, подавление кроветворения, лейкопения, анемия и тромбоцитопения, ослабление фагоцитарного механизма клеточной защиты, угнетение продукции антител, воспаления и другие патологические изменения в тканях и органах.

При воздействии ионизирующего излучения в небольших дозах изменяется проницаемость тканей, а при сублетальной дозе, кроме того, более резко увеличивается проницаемость сосудистой стенки, особенно капилляров. После облучения среднелетальными дозами у животных развивается повышенная проницаемость кишечного барьера, что является одной из причин расселения кишечной микрофлоры по органам. Как при внешнем, так и при внутреннем облучении отмечается рост аутофлоры кожи, который проявляется рано, уже в латентный период лучевого поражения. Этот феномен прослеживается у млекопитающих, птиц и человека. Усиленное размножение и расселение микроорганизмов на коже, слизистых оболочках и в органах обуславливаются снижением бактерицидных свойств жидкостей и тканей.

Определение числа кишечных палочек, и особенно гемолитических форм микробов, на поверхности кожи и слизистых оболочек — один из тестов, позволяющих рано установить степень нарушения иммунобиологической реактивности. Обычно увеличение аутофлоры происходит синхронно с развитием лейкопении.

Закономерность изменений аутофлоры кожи и слизистых оболочек при внешнем облучении и инкорпорации различных радиоактивных изотопов сохраняется. При общем облучении внешними источниками радиации наблюдается зональность

нарушения бактерицидных свойств кожных покровов. Последнее, по-видимому, связано с анато-физиологическими особенностями различных участков кожи. В целом бактерицидная функция кожи напрямую зависит от поглощенной дозы излучения; при летальных дозах она резко снижается. У крупного рогатого скота и овец, облученных гамма-лучами ^{137}Cs , при $\text{ЛД}_{80,90/30}$ изменения аутофлоры кожи и слизистых оболочек начинаются с первых суток, а к исходному состоянию у выживших животных приходят к 45...60-му дню (рис. 46).

Одним из факторов, обеспечивающих естественную антимикробную устойчивость тканей, является лизоцим. При лучевом поражении содержание лизоцима в тканях и крови уменьшается, что свидетельствует об уменьшении его продукции. Этот тест может быть использован для определения ранних изменений резистентности облученных животных.

У животных из хозяйств Гомельской области, загрязненной радионуклидами вследствие Чернобыльской катастрофы, установлено снижение лизоцимной активности в крови крупного рогатого скота, особенно у молодняка, на 20...30%. Обсемененность кожи микрофлорой у молодняка превышала контрольное значение в 1,5...3 раза. Это свидетельствует о снижении иммунологической реактивности организма. У отдельных коров с загрязненных радионуклидами территорий

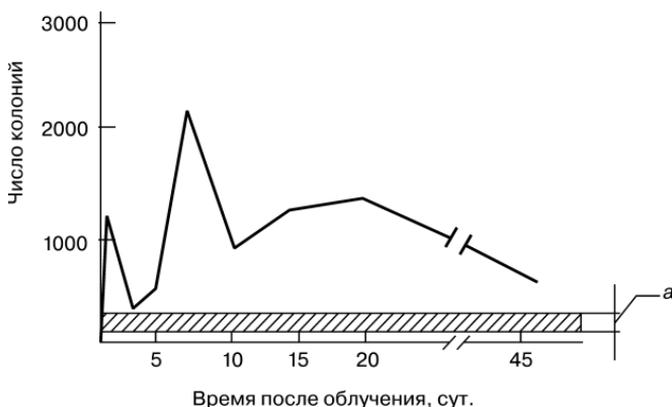


Рис. 46

Изменение числа выросших колоний при высеве со слизистой оболочки ротовой полости телят после их внешнего гамма-облучения дозой ЛД:

а — контрольный уровень (по Н. В. Панкратовой).

отмечено увеличение активности лизоцима наряду с повышением обсемененности кожи микрофлорой, что указывает на напряженность защитных механизмов (А. Д. Белов, Л. В. Рогожина, Н. П. Лысенко, 1990).

Большую роль в невосприимчивости животных к инфекциям играет фагоцитоз. При внутреннем и внешнем облучениях изменения фагоцитарной реакции в принципе имеют аналогичную картину. Степень нарушения реакции зависит от величины дозы воздействия; при малых поглощенных дозах (до 0,1...0,25 Гр) отмечается кратковременная активация фагоцитарной способности фагоцитов, при полублетальных фаза активации фагоцитов сокращается до 1...2 дней; в дальнейшем активность фагоцитоза понижается и в летальных случаях доходит до нуля. У выздоравливающих животных реакции фагоцитоза медленно активируются.

Значительные изменения в облученном организме претерпевают фагоцитарные способности клеток ретикулоэндотелиальной системы и макрофагов. Эти клетки довольно радиорезистентны. Однако фагоцитирующая способность макрофагов при облучении нарушается рано. Угнетение фагоцитарной реакции проявляется незавершенностью фагоцитоза. По-видимому, облучение нарушает связь между процессами захвата частиц макрофагами и ферментативными процессами.

В иммунологических механизмах самозащиты организма большую роль играют аутоантитела. При радиационных поражениях повышаются образование и накопление аутоантител. После облучения в организме можно обнаружить иммунокомпетентные клетки с хромосомными транслокациями. В генетическом отношении они отличаются от нормальных клеток организма, т. е. являются мутантами. Организмы, в которых существуют генетически различные клетки и ткани, обозначаются как химеры. Образовавшиеся под действием облучения аномальные клетки, ответственные за иммунологические реакции, приобретают способность вырабатывать антитела против нормальных антигенов организма. Иммунологическая реакция аномальных клеток против собственного организма может вызвать спленоmegалию с атрофией лимфоидного аппарата, анемию, отставание в росте и массе животного и ряд других нарушений.

При достаточно большом количестве таких клеток животное может погибнуть.

О нарушении у животных резистентности при облучении свидетельствуют лейкопения и анемия, подавление деятельности костного мозга и элементов лимфоидной ткани. Поражения клеток крови и других тканей и изменение их деятельности сказываются на состоянии гуморальных систем иммунитета — плазме, фракционном составе сывороточных белков, лимфе и других жидкостях. В свою очередь, эти субстанции, подвергаясь воздействию излучения, влияют на клетки и ткани и сами по себе обуславливают и дополняют другие факторы снижения естественной резистентности.

Угнетение иммунитета у облученных животных приводит к усилению развития эндогенной инфекции — увеличивается количество микробов аутофлоры кишечника, кожи и других областей, изменяется ее видовой состав, т. е. развивается дисбактериоз. В крови и внутренних органах животных начинают обнаруживаться микробы — обитатели кишечного тракта.

Бактериемия имеет исключительно важное значение в патогенезе лучевой болезни. Между началом бактериемии и сроком гибели животных наблюдается прямая зависимость.

При радиационных поражениях организма изменяется его естественная устойчивость к экзогенным инфекциям: туберкулезным и дизентерийным микробам, пневмококкам, стрептококкам, возбудителям паратифозных инфекций, лептоспироза, туляремии, трихофитии, кандидамикоза, вирусам инфлюэнцы, гриппа, бешенства, полиомиелита, ньюкаслской болезни, простейшим (кокцидиям), бактериальным токсинам. Однако видовая невосприимчивость животных к инфекционным болезням сохраняется.

Лучевое воздействие в сублетальных и летальных дозах отягощает течение инфекционной болезни, а инфекция, в свою очередь, утяжеляет течение лучевой болезни. При таких вариантах симптомы болезни зависят от дозового, вирусного и временного сочетания действия факторов. При дозах облучения, вызывающих тяжелую и крайне тяжелую степень лучевой болезни, и при инфицировании животных в первые три периода ее развития (период первичных реакций, латентный период и разгар болезни) в основном будут преоб-

ладать признаки острого лучевого заболевания. Заражение животных возбудителем остропротекающей инфекционной болезни незадолго до облучения сублетальными дозами или на фоне его приводит к утяжелению течения данной болезни с развитием относительно характерных для нее клинических признаков. Так, у поросят, облученных смертельными дозами (7 и 9 Гр) и зараженных вирусом чумы, через 5 ч, 1, 2, 3, 4 и 5 сут после облучения вирусом чумы при вскрытии находят в основном изменения, которые наблюдаются у облученных животных. Лейкоцитарная инфильтрация, клеточно-пролиферативная реакция, инфаркты селезенки, наблюдаемые при чистой форме чумы, в этих случаях отсутствуют. Повышенная чувствительность подсвинков к возбудителю рожи у переболевших лучевой болезнью средней тяжести сохраняется спустя 2 мес. после облучения рентгеновскими лучами в дозе 5 Гр. При экспериментальном заражении возбудителем рожи болезнь у свиней проявляется более бурно; генерализация инфекционного процесса наступает на 3-й день, тогда как у контрольных она обычно регистрируется только на 4-й день. Патоморфологические изменения у облученных животных при этом характеризуются выраженным геморрагическим диатезом.

Экспериментальными исследованиями на морских свинках и овцах выявлено своеобразное течение сибирской язвы у животных, больных лучевой болезнью средней тяжести. Как внешнее, так и сочетанное воздействие радиации снижает у них устойчивость к заражению возбудителем данной болезни. Клинические признаки не являются строго специфичными ни для лучевой болезни, ни для сибирской язвы. У больных отмечается выраженная лейкопения, повышается температура тела, учащаются пульс и дыхание, нарушается функция желудочно-кишечного тракта; в сыворотке крови появляются сибиреязвенные антитела в низких титрах, выявляемые реакцией непрямой гемагглютинации. Болезнь протекает остро и заканчивается летально. При патологическом вскрытии во всех случаях регистрируются уменьшение селезенки и обсеменение сибиреязвенными микробами внутренних органов и лимфоузлов.

Следовательно, воздействие ионизирующего излучения на животных в сублетальных и летальных дозах вызывает снижение всех естественных факторов устойчивости организма

к эндогенным и экзогенным инфекциям. Это проявляется тем, что у облученных животных возникновение инфекционных болезней происходит при меньшей дозе возбудителя; среди облученных увеличивается процент заболевающих, болезнь быстрее и чаще заканчивается гибелью. Нарушения иммунобиологической реактивности возникают уже в период первичных реакций на облучение и, постепенно увеличиваясь, достигают максимума развития в разгар лучевой болезни. У выживших животных естественные факторы иммунитета восстанавливаются; полнота такого восстановления определяется степенью лучевого поражения.

Действие излучений на искусственный иммунитет. К факторам искусственного иммунитета в первую очередь относятся специфические антитела и антитоксины.

По динамике продукции антител иммунологическую реакцию подразделяют на три периода:

- латентный период — время от введения антигена до появления регистрируемого титра антител;
- период продукции — время, в течение которого синтез антител, интенсивно увеличиваясь, достигает максимального титра;
- период равновесия или ослабления; в этот период продукция антител снижается и скорость ее сравнивается или уступает скорости исчезновения антител.

Иммунологическая реакция на второе введение антигена, как правило, проявляется раньше, латентный период бывает короче, а максимальный титр антител выше (рис. 47). Воздействие радиации изменяет ответную реакцию организма на введение антигена; степень изменений зависит от срока облучения относительно периодов иммунного процесса. Облучение иммунных животных вызывает ослабление иммунитета. Иммунизация, проведенная за несколько дней до облучения, благоприятно влияет на течение лучевой болезни. Вакцинация в первые 2...3 сут после облучения средне-летальными и летальными дозами не повышает резистентности. Более поздняя иммунизация усиливает невосприимчивость. При этом отмечается зависимость: чем позже после лучевого воздействия производится иммунизация, тем она эффективнее. Вакцинация в острый период лучевой болезни

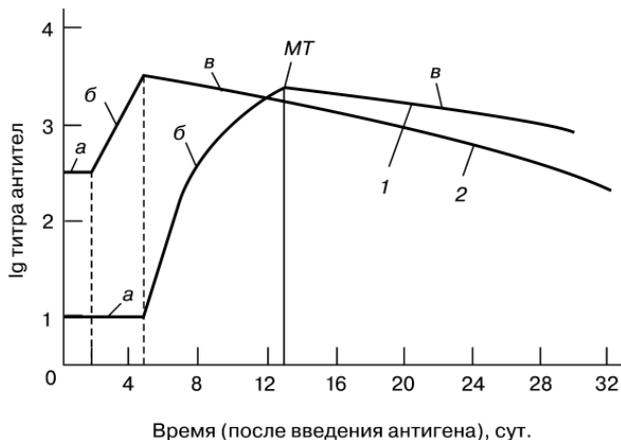


Рис. 47

Схематическое изображение иммунобиологической реакции на первое (1) и второе (2) введение антигена:

a — латентный период; *б* — период продукции; *в* — равновесие или снижение антител; *MT* — максимальный титр.

значительно отягощает течение последней и увеличивает смертность животных.

Степень снижения искусственно созданной невосприимчивости зависит от дозы облучения. Так, облучение дозами 1...2 Гр иммунизированных против туберкулеза молодых кур не снижает напряженности иммунитета, а доза 5 Гр угнетает его; восприимчивость к туберкулезной инфекции становится равной или несколько выше, чем у неиммунизированных необлученных молодок. Такая же закономерность проявляется и у млекопитающих: дозы облучения, не приводящие к развитию острой лучевой болезни, как правило, не снижают напряженности вакцинного иммунитета; большие дозы снимают невосприимчивость, понижая ее в разгар лучевой болезни ниже естественного фона. Однако устойчивость иммунизированных до облучения животных к заражению возбудителями болезни после радиации всегда выше, чем у облученных без предварительной иммунизации.

Изменение иммуногенеза при введении различных антигенов неодинаково. Так, под влиянием облучения он резко угнетается по отношению к возбудителям бруцеллеза, а активный антитоксический иммунитет сохраняется. Но имму-

низация после лучевого воздействия не обеспечивает выработку невосприимчивости и к токсинам.

При изучении механизма нарушения антителиогенеза было выявлено, что степень нарушения его зависит от того, на какую фазу антителиогенеза приходится облучение. В антителиогенезе выделяют две фазы: первая — начальная, или индуктивная, она радиочувствительна, по продолжительности короткая и связана с рецепцией антигена; вторая — продуктивная, охватывает весь последующий период продукции антител. Она относительно радиорезистентна. Если первая фаза заканчивается до облучения, то антителиогенез нарушается меньше, если же после облучения, то больше. Самое высокое подавление антителиогенеза отмечается при введении антигена через 12...24 ч после облучения. В данном случае специфические антитела появляются в крови лишь через 2 недели и позднее, а при введении антигена через 5 сут после облучения — через 10 сут. Удлинение индуктивной фазы происходит из-за разрушения клеток, продуцирующих антитела, и лишь когда эти клетки восстанавливаются и становятся способными к выполнению своих функций, начинают образовываться иммунные глобулины. Из изложенного материала следует, что радиация угнетает антителиогенез, но не подавляет его полностью. Степень угнетения антителиогенеза зависит от вида антигена. Повторные и многократные введения антигена облученным животным способствуют более интенсивной выработке антител по сравнению с однократной инъекцией антигена.

Наряду с изменениями активной иммунизации радиация ухудшает эффективность и пассивных прививок. Для обеспечения лечебного эффекта антитоксической сывороткой требуется доза в 3...5 раз выше, чем лечебные дозы для необлученных животных. Антибактериальный пассивный иммунитет у облученных животных нарушается больше, чем антитоксический. Пассивный иммунитет, как известно, складывается из двух процессов: первый — гуморальный, истинно пассивный процесс, он обеспечивается взаимодействием вводимых специфических антител с антигенами; второй процесс — активный, обуславливается клеточной реакцией. Поэтому при облучении изменяется второй процесс, а первый нарушается мало.

Действие излучений на аллергические и анафилактические реакции. Радиация существенно изменяет проявление феноменов аллергии и анафилаксии. Степень изменений их, так же как и нарушения иммунитета, определяется дозой облучения и временными соотношениями между введением аллергена и сроком лучевого воздействия. Малые дозы радиации не вызывают существенных изменений анафилактических и аллергических реакций. При больших дозах облучения они могут угнетаться, теряя специфичность проявления, и извращаться, в связи с чем достоверность используемых в клинической практике аллергических проб в таких случаях существенно снижается. Механизм изменений аллергической реактивности облученного организма пока еще мало исследован, по-видимому, в основе его лежат нарушения общего иммунобиологического состояния животного, и в частности повышенное образование аутоантител.

ЗНАЧЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ И МАЛЫХ ДОЗ РАДИАЦИИ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Естественный радиационный фон существует на протяжении всей истории Земли. Следовательно, естественная радиоактивность представляет собой фактор среды, в которой происходит как онтогенетическое, так и филогенетическое развитие организмов.

В. И. Вернадский, М. Кюри, несколько позднее А. И. Опарин и М. Кальвин считали, что энергетическими источниками жизни на Земле являются солнечный свет и ядерная энергия. В. А. Комаров также указывал, что ядерная энергия не могла не использоваться живыми организмами, ибо радиоактивность земной коры как источник кинетической энергии занимает одно из основных мест. Естественную радиоактивность составляют космические лучи и радиоактивные элементы земной коры. Интенсивность космического излучения на земной поверхности непостоянна; она изменяется в зависимости от солнечной активности, высоты над уровнем моря, широты и климатических условий (см. табл. 26).

Второй компонентой, составляющей природный радиационный фон Земли, являются естественные радиоактивные

элементы — уран, радий, калий, торий, углерод, тритий и др. Они широко распространены в природе и в рассеянном состоянии встречаются в почвах, породах, воде, воздухе и входят в состав тканей всех растительных и животных организмов.

Количество естественных радиоизотопов колеблется в разных районах Земли. Например, высоким содержанием отличаются моноцитовые районы Бразилии в штатах Эспириту-Санту, Рио-де-Жанейро, районы Керала и Мадраса в Индии, некоторые острова Новой Зеландии, дельты рек Нила и Конго в Африке, сланцевые и песчаные районы Франции, Чехии и Словакии и др.

Таблица 26

Изменение мощности общей дозы (мЗв/г) космического излучения в зависимости от высоты над уровнем моря и географической широты (по А. М. Кузину)

Высота над уровнем моря, км	Широта		
	экватор	30	50
0	0,35	0,4	0,5
0,6	0,7	0,9	3
1,7	2,2	3	3
5	4	5	8
10	14	23	45
20	35	60	140

Таблица 27

Поглощенные дозы в различных тканях от естественных источников радиации (мЗв/г) (по И. М. Белоусовой и Ю. М. Штуккенберг)

Источник излучения	Мягкие ткани и гонады	Кости	Легкие	Костный мозг
Космическое излучение	0,88	0,88	0,88	0,88
Среднее внешнее гамма-излучение почвы и построек	0,84	0,66	0,66	0,66
Гамма-излучение атмосферного воздуха	0,036	0,036	0,036	0,036
Суммарное облучение:	1,76	1,58	1,58	1,58
внешнее	0,036	0,48	6	0,18
всеми источниками радиации	2,12	2,06	7,58	1,76

С наличием радиоактивных элементов в природных образованиях связано существование поля ядерных излучений, которое постоянно воздействует на все живые существа биосферы (табл. 27).

Естественная радиоактивность постепенно уменьшается в силу распада многих радиоактивных элементов Земли (интенсивность космического излучения остается относительно постоянной), поэтому в те времена, когда начались процессы, приведшие к появлению жизни на Земле, радиоактивность была значительно выше.

Первые этапы развития жизни на Земле уходят вглубь доархеозойской эры. В эти периоды происходила химическая и биохимическая эволюция, приведшая к синтезу органических веществ и возникновению биохимических циклов. В результате отбора в процессе очень длительной химической и биохимической эволюции, при непрерывной изменчивости химической среды под действием свободных радикалов, возбужденных молекул и иницированных цепных реакций, образуемых при воздействии радиации, сформировались биохимические реакции, способные к самовоспроизведению системы белков и полинуклеотидов. На основании универсальности биохимических механизмов (адениловая система биоэнергетики, гликолитический тип распада углеводов, цикл лимонной кислоты, аэробное окисление веществ), установленных у бактерий, растений и животных, А. Г. Пасынский пришел к выводу, что некоторые химические соединения, свойственные высоким формам жизни, возникли на этой фазе эволюции.

С возникновением первичных форм жизни химическая и биохимическая формы эволюции уступили по интенсивности морфологическим и физиологическим. А. Л. Шабадаш, изучая сравнительную радиочувствительность различных по уровню развития организмов, показал, что более примитивной организации (например, бактериям, вирусам) свойственна повышенная радиоустойчивость.

Биогеохимические исследования свидетельствуют, что в начальные этапы развития органического мира на Земле преобладали виды организмов, накапливающие радиоактивные элементы. Это может указывать на использование ядерной энергии древними организмами для обеспечения энергетических

потребностей биосинтеза. К этому периоду (кембрийская эпоха) относят последовательное появление на Земле водорослей, грибов, мхов, папоротникообразных, голосемянных и покрытосемянных растений.

Из данных радиоэкологии следует, что уровень естественной радиоактивности отображает степень организации метаболических процессов живых объектов. С усложнением организмов, возникновением дифференциации и интеграции тканей радиоактивность их понижается, одновременно снижается и радиостойчивость. Тем не менее естественный радиационный фон (ЕРФ) и близкие к нему так называемые малые дозы необходимы для регуляции скорости деления клеток от бактерий до клеток животного.

На модели развития эмбрионов серых морских ежей А. М. Грищенко (1990) показал, что в условиях снижения внешнего облучения ниже ЕРФ со 150 до 75 и до 30 нГр/ч происходит дозозависимое замедление скорости первого и второго делений оплодотворенных яйцеклеток. Восстановление ЕРФ сопровождалось возвратом к естественной скорости деления клеток. Наоборот, при увеличении дозы внешнего облучения выше ЕРФ от 150 до 1250 и от 2500 до 10000 нГр/ч наблюдалось ускорение первого и второго делений клеток.

В образовании новых видов организмов большое значение имеет генетическое действие естественного радиоактивного фона. А. А. Сапегин, Н. П. Дубинин, Мюллер и другие показали, что воздействие радиации на наследственные свойства не имеет порога. Изменение наследственных свойств возможно от единичного акта ионизации и с повышением дозы увеличивается. Поэтому предполагается, что мутагенное действие радиации в древние эпохи было более значительным.

Районы с повышенным радиоактивным фоном отличаются большим своеобразием растительных видов, например заповедник Каменные Могилы на Украине (Д. М. Гродзенский). Современные данные позволяют считать, что у живых организмов вследствие их большой приспособляемости и пластичности возможна адаптация к повышению фонового излучения, которая вырабатывается при эволюционном отборе форм. В литературе описаны случаи возникновения радиостойчивых форм микробов из рода *Pseudomonas*. Они размножались

после облучения их дозой 200 кГр, тогда как обычные популяции погибали при воздействии 10...30 кГр. Отсутствие выраженных изменений у растительных и животных организмов, включая человека, в районах повышенного радиоактивного фона в 10...100 раз (штат Маин-Джераис в Бразилии, штат Керала в Индии, остров Ниуэ в Новой Зеландии и др.) дает основание говорить о возможности приспособления, адаптации живых организмов в течение ряда поколений к повышенным дозам ионизирующего излучения.

Имеются данные о том, что радиационные изменения, вызванные в семенах растений малыми дозами гамма-облучения, способны ослаблять повреждающее лучевое воздействие в семенах последующих поколений.

Таким образом, естественная радиоактивность как фактор внешней среды в развитии органического мира является одним из источников энергии, обеспечивающим филогенез растительных и животных организмов.

При определенных условиях результат облучения может быть стимулирующим, угнетающим и летальным. Стимулирующее действие, т. е. гормезиз⁷, ионизирующие излучения оказывают при облучении биологических объектов малыми дозами. Изучение действия малых доз ионизирующего облучения на живые объекты стало одной из центральных проблем радиобиологии. Это объясняется интенсивным развитием атомной энергетики и постоянно расширяющимся использованием искусственных радионуклидов в деятельности человека.

Ввиду резко различной видовой радиочувствительности количественный диапазон малых доз будет для различных видов биотических объектов очень широк. А. М. Кузин (1991) предлагает считать областью малых доз такое превышение природного радиационного фона для данного вида, при котором наблюдается явление гормезиса. Научный комитет по действию атомной радиации при Организации Объединенных Наций подходит к определению «низких» доз как эквивалентных

⁷ *Гормезис* — это стимуляция процессов пролиферации, роста и развития биологических объектов, вызванная малыми дозами агентов, обычные дозы которых вызывают ингибирующее и поражающее действие. Термин «гормезис» образован от слова «гормон», что указывает на главную роль гормональной системы в изменениях метаболизма под действием малых доз радиации.

уровней, соответствующих диапазону 0...0,2 Зв. В публикации В. Г. Владимирова и др. (1989) в качестве верхнего предела рассматривается доза в 0,5 Гр как подпороговая для проявления нестохастических эффектов. В клинической практике под малыми понимают дозы ионизирующей радиации, не приводящие к развитию отрицательных клинически выраженных эффектов — до 0,5...1 Гр (Ф. С. Торубаров, 1991), а в материалах Греевской конференции 1980 г. под малыми дозами ученые имели в виду диапазон 2...2,5 Гр, т. е. дозы, наиболее часто применяемые в лучевой терапии.

Экспериментально показано, что область малых доз лежит, как правило, ниже на два порядка летальной дозы (LD_{50}) для данного объекта. Так, например, для человека и животных, у которых LD_{50} составляет 4...5 Гр, дозы порядка 0,04...0,05 Гр и ниже следует относить к малым. В то же время для многих семян растений LD_{50} равняется 200...500 Гр, следовательно, для них малыми уже будут дозы 2...5 Гр.

Существует мнение, что под влиянием малых доз ионизирующей радиации могут возникать нарушения в геноме, однако они в основном репарируются, так как их количество не выходит далеко за пределы репарационных возможностей клетки (Д. И. Спитковский, 1989).

В классических исследованиях З. Бака, Л. А. Орбели, А. В. Лебединского, П. Д. Горизонтова, Г. Селье и других показано повреждающее действие больших доз ионизирующих излучений на эндокринную систему млекопитающих. При летальных и сублетальных дозах облучения резко изменяются функции секреторных клеток гипоталамуса, гипофиза, надпочечников и других эндокринных желез, причисляемых по морфологическим признакам к радиорезистентным тканям.

При облучении животных в малых дозах (0,5...0,4 Гр) были отмечены реакции активации гормоновыделения.

В связи с этим ряд исследователей (А. М. Кузин и др.) считают, что постоянно действующий ПРФ и малые дозы атомной радиации, соизмеримые с ПРФ, являются теми слабыми раздражителями, которые, систематически действуя на нейроэндокринную систему организма, способствуют поддержанию ее в активном состоянии, необходимом для нормального существования организма.

В подтверждение приводится пример использования радоновых ванн с лечебной целью. Радон, как инертный газ, вместе с кислородом проникает через поры кожи, легко достигает базального слоя эпидермиса, где, распадаясь, испускает альфа-излучение; при этом образуются дочерние радиоактивные продукты, распад которых и вызывает основное облучение обширной рецепторной системы кожи. (При простом наружном контакте с кожей толщина эпидермального слоя кожи 7 мг/см^2 достаточна для полного поглощения альфа-излучения радона.)

Известно, что широко используемая современной медициной рефлексотерапия исходит из представлений о существовании непосредственной связи внутренних органов с рецепторами кожи. Естественно предположить, что и раздражение этих точек под влиянием излучений оказывается необходимым для поддержания нормального существования организма как единого целого.

Ряд исследователей (Андерсон и др., 1980; М. Л. Гусарова, 1997) показали активацию иммунной системы у животных под влиянием малых доз радиации. Высказывается ряд гипотез о механизмах этого явления. Одна из них предполагает, что клетки, стимулированные антигеном к делению, усиливают пролиферацию под влиянием малых доз радиации, что и ведет к повышенной выработке антител, усилению иммунитета. Индуцированное радиацией повышение иммунитета обязано частично поражению клеток, участвующих в регуляции иммунного ответа, а именно одной из особо чувствительных субпопуляций *T*-клеток с супрессорной активностью.

Таким образом, суммируя все сказанное, можно сделать заключение, что атомная радиация в малых дозах воздействует на биоту путем перевода молекул в возбужденное состояние.

Особое значение для стимуляции деления клеток, роста и развития организма будет иметь возбуждение тех рецепторов биомембран, которые через промежуточные реакции индуцируют экспрессию генов, подготовленных для этого предыдущими стадиями развития организма.

Активация синтеза белков-ферментов, ДНК, гормонов — неизбежное следствие индуцированной возбужденным рецептором экспрессии ранее «молчавших» генов.

Активация под влиянием малых доз атомной радиации иммунитета и активности репарирующих ферментов лежит в основе повышенного сопротивления неблагоприятным факторам среды, увеличения продолжительности жизни.

Отмечены различия основных закономерностей проявления действия ионизирующей радиации в области малых доз (1...2-го порядка выше фона) по сравнению с действием больших доз.

1. Большие дозы угнетают рост, развитие, плодовитость, неспецифический иммунитет, общую сопротивляемость неблагоприятным факторам, а малые стимулируют.

2. При больших дозах более эффективно одномоментное облучение. Хроническое облучение в той же дозе снижает эффект угнетения. При малых дозах хроническое облучение дает больший эффект стимуляции по сравнению с одномоментным облучением в той же дозе.

3. В области малых доз эффект стимуляции имеет триггерный механизм и в определенных интервалах доз мало зависит от количества поглощенной энергии. В области больших доз эффект строго пропорционален количеству поглощенной энергии.

4. При больших дозах облучения наблюдаемые явления определяются прямым или косвенным разрушением генетических и мембранных структур клеток. При малых дозах выявляется радиационное воздействие на нормальные регуляторные функции этих структур.

Ведущее значение в стимулирующем (благоприятном для жизнедеятельности) действии малых доз приобретают процессы, возникающие в рецепторах биомембран. В конденсированной структурно-упорядоченной системе рецепторов биомембран даже при попадании единичного кванта или элементарной частицы большой энергии возникает большое число возбужденных систем (плазмоны, экситоны, солитоны), способных изменить конформацию рецептора, так же как это делает специфический сигнал, на восприятие которого настроен данный рецептор.

А. М. Кузин и др. считают, что при переходе в область малых доз и мощностей излучения активация протекающих процессов в живом организме связана, как правило, с возбу-

жденным состоянием молекул и их систем. Именно процессы возбуждения под влиянием атомной радиации занимают ведущее положение среди первичных причин, вызывающих стимуляцию деления клеток, роста и развития. При действии малых доз происходит возбуждение рецепторов, т. е. молекул, которые входят в построение многочисленных рецепторов биомембран. Именно рецепторы белковой природы с включенными в них полициклическими, ненасыщенными полиэновыми молекулами и представляют ту упорядоченную структурную среду, в которой попадание даже одного высокоэнергетического кванта или частицы способно вызвать конформационные изменения в рецепторах и тем самым дать сигнал, сыграть роль триггера в запуске нормальной физиологической реакции на данный сигнал. Если большие дозы радиации поражают структуры генома и его функции, то малые дозы радиации могут влиять на экспрессию генов непосредственно через возбужденные макромолекулы генома, или опосредованно воздействуя на рецепторы мембран.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности биологического действия радиации как этиологического фактора?
2. В чем суть теорий, объясняющих прямое действие радиации?
3. Какова характеристика температурного, кислородного и защитного эффектов?
4. Каковы основные положения теорий, объясняющих не прямое действие радиации на биологические объекты?
5. Как характеризуются опосредованные пути воздействия ионизирующего излучения на организм?
6. Каков механизм биологического действия ионизирующего излучения?
7. Какие ткани и клетки животного организма наиболее чувствительны к ионизирующей радиации и с чем это связано?
8. Какую роль играет естественный радиационный фон в биологических процессах?
9. В чем сущность структурно-метаболической теории биологического действия радиации?
10. Какие защитные барьеры препятствуют проникновению в организм животного микроорганизмов и вирусов?



ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ, ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ ПРИ ВНЕШНЕМ ОБЛУЧЕНИИ

Лучевая болезнь — общее нарушение жизнедеятельности организма, характеризующееся глубокими функциональными и морфологическими изменениями всех его систем и органов в результате поражающего действия различными видами ионизирующих излучений из внешних источников, а также при попадании радиоактивных веществ внутрь организма.

Патогенез. Развитие лучевой болезни связано с процессами взаимодействия ионизирующей радиации с жидкостями организма, веществом клеток и тканей и с организмом в целом.

Поглощение энергии ионизирующих излучений молекулами веществ организма составляет содержание прямого действия, а молекулами воды — непрямого первичного действия.

В первичном биологическом действии излучений выделяют две фазы: первую — физическую и вторую — физико-химическую. Первичный физический процесс взаимодействия ионизирующей радиации с веществом ведет к ионизации и возбуждению атомов и молекул с образованием соответствующих свободных радикалов, обладающих высокой химической активностью. В процессе радиоллиза воды под влиянием ионизирующих излучений возникают следующие свободные атомы и радикалы: H^{\bullet} , OH^{\bullet} , H_2O_2 и HO^{\bullet}_2 , а в результате радиоллиза молекул органических веществ (например, белков, липидов и т. д.), находящихся в растворе, — радикалы водорода и типа $ROOH^{\bullet}$.

В физико-химическую фазу указанные свободные радикалы (существуют не более 10^{-11} с) химически взаимодействуют друг с другом или со свободным кислородом биологических тканей — при этом образуются продукты (перекись водорода, гидропероксид, органическая перекись), обладающие мощной окисляющей активностью. Окислительные превращения биохимических веществ в жидкой среде и тканевых клетках вызывают вторичные функциональные и морфологические изменения различных систем организма, которые проявляются в виде лучевой болезни.

Прямое действие радиации может вызвать различные денатурационные изменения, разрыв наименее прочных связей, отрыв радикалов, расщепление молекул в виде деполимеризации и другие изменения.

Первичные окислительные превращения указанных выше веществ переходят во вторичные лучевые функциональные и морфологические изменения, которые всегда являются опосредованными через нервную систему, эндокринные железы, кровь и лимфу. Поэтому вторичные лучевые изменения представляют собой результат суммирования прямого местного и опосредованного действия радиоактивных излучений.

Образующиеся в процессе окислительных превращений биохимических соединений в жидкой среде и клетках токсические вещества вызывают рефлекторное действие на кору головного мозга, а циркулируя в крови и лимфе, оказывают непосредственное действие на кору головного мозга, вегетативные центры подкорковых узлов и клетки органов. В результате этого изменяется соотношение процессов возбуждения и торможения в коре головного мозга: в начале преобладает процесс возбуждения, а затем торможения, в связи с этим ослабляется ее регулирующая и трофическая функции в отношении подкорковых узлов, эндокринных желез, внутренних органов и других тканей.

Реакция спинного мозга на облучение выражается нарушением рефлекторной деятельности, а также появлением судорог и параличей. Наблюдаются значительные изменения в периферических ганглиях и нервных окончаниях различных органов.

В результате непосредственного действия ионизирующих излучений на органы эндокринной системы животного, а также из-за патологической регуляции их функции измененной нервной системы и действия образующихся в организме различных продуктов извращенного обмена нарушается процесс выделения гормонов. В первые часы после облучения отмечается усиление функции щитовидной железы, гипофиза, надпочечников, а с развитием острой лучевой болезни проявляется резкое угнетение функции этих желез.

Указанные изменения приводят к нарушению в обмене веществ, и прежде всего к изменению основного обмена. Наиболее ранними и специфическими являются торможение окислительного фосфорилирования вследствие инактивации дыхательных ферментов, содержащих сульфгидрильные группы, биосинтеза нуклеиновых кислот и белков, а также повышение активности гиалуронидазы, синтеза жирных кислот и холестерина.

Уменьшение количества ДНК и РНК вследствие угнетения их синтеза приводит к резким сдвигам в содержании нуклеотидов, понижению митотической активности и «ломке» хромосомного аппарата клеток, к угнетению биосинтеза белковых веществ со значительным ускорением их распада. Нарушения азотистого обмена обуславливают уменьшение массы облученных животных, отравление организма продуктами неполного белкового распада и изменение барьерных функций.

Значительные изменения претерпевает углеводный обмен. Развивающаяся гипердреналинемия ведет к уменьшению содержания гликогена в печени, скелетных мышцах и повышению содержания сахара в крови.

Таким образом, в результате поражающего действия ионизирующего излучения развивается цепь взаимосвязанных патологических явлений, определяющих в последующем выраженные функциональные и морфологические нарушения всех систем организма, которые в целом характеризуют лучевую болезнь.

Синдромы лучевой болезни. Лучевая болезнь не имеет резко выраженных специфических признаков. Однако при ее развитии можно выделить комплексы изменений — пато-

физиологические синдромы. Характерными для лучевой болезни являются панцитопенический, геморрагический, желудочно-кишечный и иммунобиологический синдромы. Наиболее рано из них проявляется панцитопенический, относительно позднее — геморрагический, а затем желудочно-кишечный и иммунобиологический.

Панцитопенический синдром связан с резким подавлением кроветворной функции лимфоидной ткани, селезенки и костного мозга. Он характеризуется изменением морфологического состава крови. Отмечаются резкая лимфопения, кратковременный нейтрофильный лейкоцитоз с последующей прогрессирующей лейкопенией (количество лейкоцитов уменьшается до 500 клеток и менее в 1 мкл), тромбоцитопения, гемоглобинемия, эритропения. Лейкопения понижает клеточно-защитную, эритропения и гемоглобинемия — дыхательную, а тромбоцитопения — тромбопластическую функции крови.

Геморрагический синдром развивается вследствие уменьшения свертываемости крови на почве понижения ее тромбопластической активности, а также повышения проницаемости, понижения тонуса и уменьшения прочности кровеносных сосудов (ломкостью). Он характеризуется развитием множественных кровоизлияний и упорных кровотечений в различных органах.

Желудочно-кишечный синдром связан с подавлением регенерации кишечного эпителия. Облучение нарушает воспроизводство нового эпителия, слущивание же старых клеток продолжается в прежнем темпе, возникают множественные кровоизлияния, переходящие затем в очаговые некрозы и язвы. Это приводит к опустошительным разрушениям слизистой оболочки кишечника, нарушениям секреции и моторики, пристеночного пищеварения, всасывания и, как следствие этого, к дистрофии и невосполнимой потере организмом воды и солей.

Кишечник становится воротами инфекции, не встречая сопротивления, в различные ткани и органы проникают микробы нормальной кишечной флоры — наступает бактериемия.

Иммунобиологический синдром развивается на почве резкого уменьшения количества и снижения фагоцитарной

активности лейкоцитов вследствие угнетения белого кроветворения, значительного понижения процесса образования антител, лизоцима и т. д. в связи с торможением биосинтеза белков, а также вследствие повышенного проникновения микрофлоры в местах кровоизлияний, кровотечений и язвлений, особенно в желудочно-кишечном тракте. Он характеризуется катастрофическим понижением сопротивляемости организма по отношению к самой различной микрофлоре, что обуславливает быстрое развитие в нем тяжелых инфекционных осложнений.

В облученном организме усиливается поствакцинальная реакция, значительно снижается эффективность пассивной иммунизации при обычных дозах, активные прививки в течение 2...3 недель после облучения малоэффективны или вообще неэффективны. Аллергические реакции извращаются как в сторону усиления их интенсивности, так и в сторону ослабления, вплоть до полного отсутствия. Нарастание лучевой бактериемии представляет грозный симптом и обычно предшествует гибели животного.

Таким образом, в целом лучевая болезнь представляет собой нервно-дистрофический процесс с преимущественным поражением кроветворных органов, сосудистой системы, пищеварительного тракта и понижением иммунобиологической реактивности организма.

В зависимости от дозы и мощности облучения, а также длительности и кратности облучения животных лучевая болезнь протекает остро и хронически.

При кратковременном воздействии большой дозы развивается остро или молниеносно протекающая лучевая болезнь. Острая лучевая болезнь с выраженной клинической картиной наблюдается при однократной дозе облучения 1,5 Гр и выше. В прямой зависимости от величины однократной дозы облучения находится тяжесть развивающегося патологического процесса: чем больше доза, тем тяжелее протекает болезнь.

Хроническая лучевая болезнь появляется после длительного или многократного внешнего общего облучения небольшими дозами, а также после длительного поступления в организм радиоактивных веществ в небольших количествах.

ТЕЧЕНИЕ ОСТРОЙ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ

В зависимости от величины дозы облучения и тяжести развивающегося патологического процесса различают четыре степени острой лучевой болезни: *легкую* (первую) степень, развивающуюся при однократном облучении животных всех видов, включая птиц, в дозах 1,5...2,5 Гр; *среднюю* (вторую) степень, появляющуюся при облучении дозами 2,5...4 Гр; *тяжелую* (третью) степень, возникающую при облучении дозами 4...6 Гр; *крайне тяжелую* (четвертую) степень, развивающуюся при облучении в дозах более 6 Гр.

В клинике острой лучевой болезни выделяют четыре периода: *начальный*, или период общей первичной реакции; *скрытый*, или период видимого благополучия; *период разгара*, или выраженных клинических проявлений болезни; *период восстановления*. Наиболее четко все периоды болезни выражены у животных, получивших дозу 3...6 Гр. При дозах облучения до 3 Гр или более 6 Гр цикличность развития болезни затуманивается и выделить периоды болезни удается не всегда.

Легкая степень лучевой болезни часто протекает без видимых клинических симптомов. Лишь у отдельных животных наблюдаются незначительное, скоропреходящее угнетение, частичный отказ от корма и периодические кратковременные поносы. При исследовании периферической крови в первые сутки отмечается лимфоцитопения и незначительный нейтрофилез, а в течение последующих 10 суток — лейкопения. Через сутки количество лимфоцитов уменьшается на 30...40%. На 10-е сутки число лейкоцитов снижается на 30...40%. К 20...25-м суткам количество лейкоцитов, в том числе лимфоцитов, достигает исходных величин. Заболевание заканчивается полным выздоровлением животного.

Изменения числа форменных элементов при легкой, средней и тяжелой формах лучевой болезни представлены на рис. 48.

Средняя степень лучевой болезни характеризуется скоропреходящей *первичной общей реакцией* организма, которая проявляется, как правило, через 2 ч после поражения

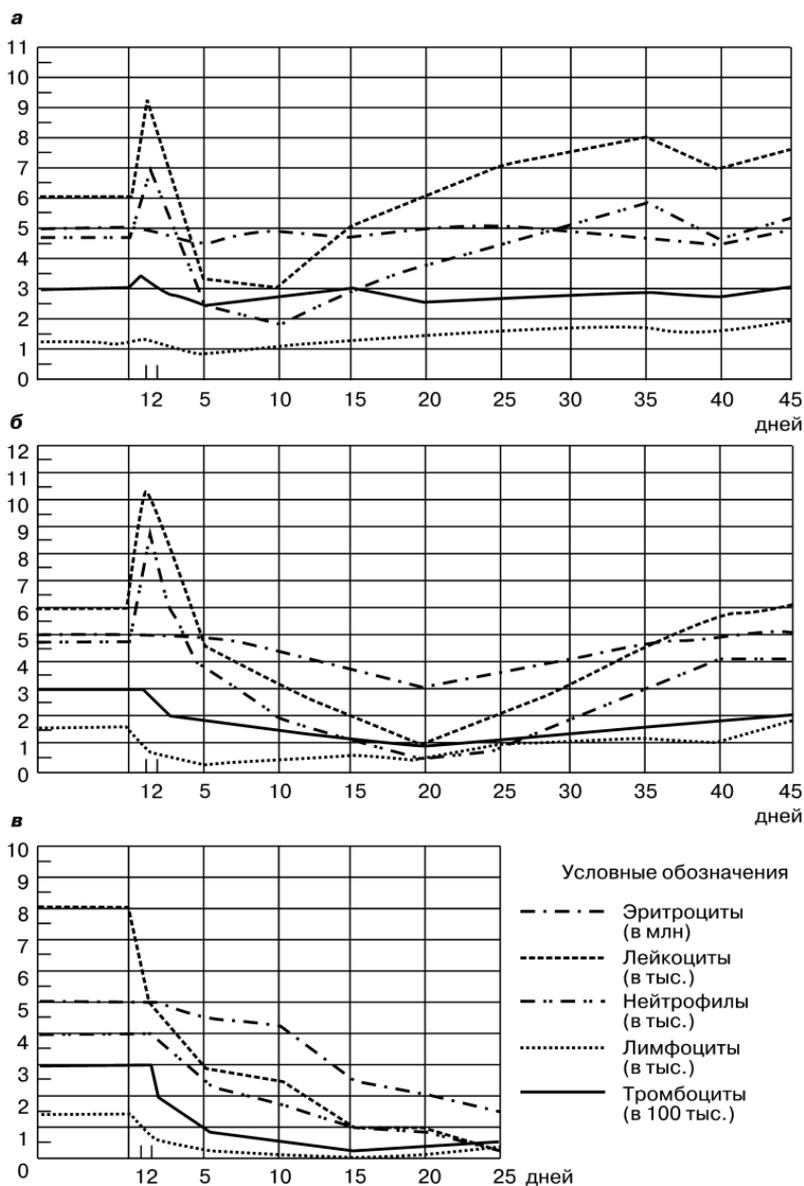


Рис. 48

Изменение числа форменных элементов
в 1 мм^3 крови при острой лучевой болезни:

а — легкой степени; *б* — средней степени; *в* — тяжелой степени.

и продолжается 1 сут. У животных отмечается общее возбуждение или, наоборот, угнетение. При возбуждении наблюдаются пугливость, переступание ногами, манежные движения, судорожные подергивания мышц губ, морды, конечностей и др., а при угнетении — пониженная реакция на внешние раздражения, сонливость и др. Иногда обнаруживаются сужение зрачков, гиперемия видимых слизистых оболочек, учащение пульса и дыхания, жажда, у собак и свиней — рвота. Постепенно клинические явления проходят, наступает скрытый период болезни.

Скрытый период довольно длительный и может продолжаться 10...15 сут. Он характеризуется отсутствием видимых клинических признаков. Животные внешне кажутся здоровыми, активно реагируют на различные раздражения, хорошо принимают корм, имеют нормальную температуру и массу тела. Только в крови имеются изменения: уже через 1 сут после облучения количество лимфоцитов уменьшается на 30...50%, на 5-е сут число лейкоцитов снижается на 40...50%.

Разгар болезни развивается постепенно. У животных ухудшается общее состояние, на 0,3...0,7°C может повыситься температура тела. Они заметно угнетены, слабо реагируют на внешние раздражения, отказываются от корма и испытывают жажду, может отмечаться слюнотечение, а у собак и свиней — рвота. Видимые слизистые оболочки становятся бледными, иногда обнаруживаются кровоизлияния, но кровоточивости не наблюдается. Появляется отечность морды, отек носоглотки и гортани, что приводит к затруднению дыхания. Могут быть кратковременные поносы с незначительной примесью крови и слизи в кале. Волосы легко выдергиваются, у овец выпадают. На 20...50% снижаются удои у лактирующих животных. В крови уменьшается количество лейкоцитов на 50...60%, лимфоцитов на 30...50%, эритроцитов на 10...20%, тромбоцитов на 5...25% (см. рис. 48б). Период разгара болезни длится до 20 сут и более, после чего постепенно начинается ее разрешение.

Период восстановления длится 1...2 мес. Большинство животных выздоравливает. При развитии осложнений со стороны органов дыхания и желудочно-кишечного тракта возможна гибель животного.

Тяжелая степень лучевой болезни. *Период первичных реакций* проявляется непосредственно после облучения и продолжается от нескольких часов до 2...3 сут. При поражении высокими дозами, особенно при воздействии ионизирующих излучений большой мощности, первичная реакция у животных может появиться уже непосредственно в период облучения и проявляться в виде шокоподобного состояния. Это связано с перевозбуждением центральной нервной системы и явлениями интоксикации.

Обычно после кратковременного возбуждения у животных развивается общее угнетение. В первые часы наблюдаются судорожные подергивания конечностей, общий тремор, маневные и часто некоординированные движения, сужение зрачков. С развитием угнетения усиливается адинамия, появляется связанная и шаткая походка. Отмечается покраснение слизистых оболочек, неустойчивый пульс, тахикардия и расстройство сердечной деятельности. У некоторых животных повышается температура тела, возникают функциональные расстройства желудочно-кишечного тракта. Характерны изменения клеточного состава периферической крови. Отмечается кратковременный лейкоцитоз со сдвигом лейкоцитарной формулы влево. В тяжелых случаях обнаруживаются гиперсегментированные формы нейтрофилов и явления вакуолизации. Отмечается ускоренное созревание всех клеточных элементов костного мозга и увеличенное поступление их в кровеносное русло. Очень рано угнетается функция лимфоидной ткани, что уже в первые часы после облучения ведет к быстро прогрессирующей абсолютной лимфопении. В периферической крови увеличивается количество ретикулоцитов, наблюдается макроцитоз эритроцитов и снижение их резистентности.

По мере ослабления первичной реакции состояние животного улучшается, наступает *скрытый период*, длительность которого может достигать 12 сут. Продолжительность его обратно пропорциональна дозе облучения. Чем больше доза, тем короче скрытый период, при очень тяжелых поражениях он может даже отсутствовать. В этом случае за первичной реакцией сразу же развивается типичная картина лучевой болезни.

В период видимого благополучия в периферической крови на 50...80% и более уменьшается количество лимфоцитов

и до 75% лейкоцитов. Иногда в 1 мкл крови насчитывается до 100...300 лимфоцитов. Наблюдаются токсическая зернистость нейтрофилов, фрагментоз, гиперсегментоз, пикноз ядер. Снижается содержание тромбоцитов и количество эритроцитов с уменьшением их резистентности. Уменьшается количество остаточного азота и хлоридов в крови. При исследовании костного мозга в этот период обнаруживается начальная гипоплазия всех ростков кроветворения.

Разгар болезни обычно продолжается 10...30 сут, а при очень тяжелых поражениях этот период сокращается до 5...10 сут. У животных резко снижается работоспособность и продуктивность, развивается общее угнетение. Они становятся адинамичными, вяло реагируют на внешние раздражители и отказываются от корма, но проявляют признаки жажды. Повышается температура тела, ее не удается нормализовать массивными дозами антибиотиков и сульфаниламидов, а жаропонижающие средства лишь усугубляют процесс. Кожа становится неэластичной, сухой и шелушивой, ее бактерицидность резко снижается. Шерсть вначале очень легко выдергивается, затем выпадает клочьями. Нарушается работа сердечно-сосудистой системы: понижается артериальное давление, возникает тахикардия, тоны сердца становятся глухими, у верхушки сердца прослушиваются систолические шумы. Часто развивается конъюнктивит, язвенный стоматит и серозно-катаральный ринит с появлением тягучего истечения. Наблюдается отек морды, носоглотки, гортани. Сильно проявляется геморрагический синдром. Появляются носовые кровотечения, кровоточивость десен, губ, кровоизлияния различного характера на слизистых оболочках и на отдельных участках кожи. Особенно обширны они в местах, подверженных механическим травмам: любое, даже самое незначительное воздействие в виде ушиба или давления на слизистые оболочки или кожу сопровождается образованием больших гематом. В этот период заболевания нередко случаются внезапной гибели животных вследствие кровоизлияния в мозг или миокард.

Появляется понос. Кал вначале водянистый, затем с примесью крови или дегтеобразный. Снижается секреторная функция желез и нарушается всасывающая способность слизистой

оболочки желудка и кишечника. Это ведет к резкому нарушению всех обменных процессов, развивается гематурия.

Прогрессируют патологические изменения морфологического состава крови. Развивается резко выраженная лейкопения. Количество лимфоцитов может снизиться до 80 клеток, а лейкоцитов до 200 клеток и менее в 1 мкл крови (см. рис. 48в). При очень тяжелом течении болезни лимфоцитов в крови часто и совсем не обнаруживается, а лейкоциты сильно изменены (цитолиз, пикноз и распад ядер). Число тромбоцитов понижено, а в тяжелых случаях их совершенно нет. Чем тяжелее поражение, тем быстрее и глубже угнетается кроветворение. Уменьшение числа эритроцитов наблюдается позже, чем других клеток крови. Причем вначале появля-

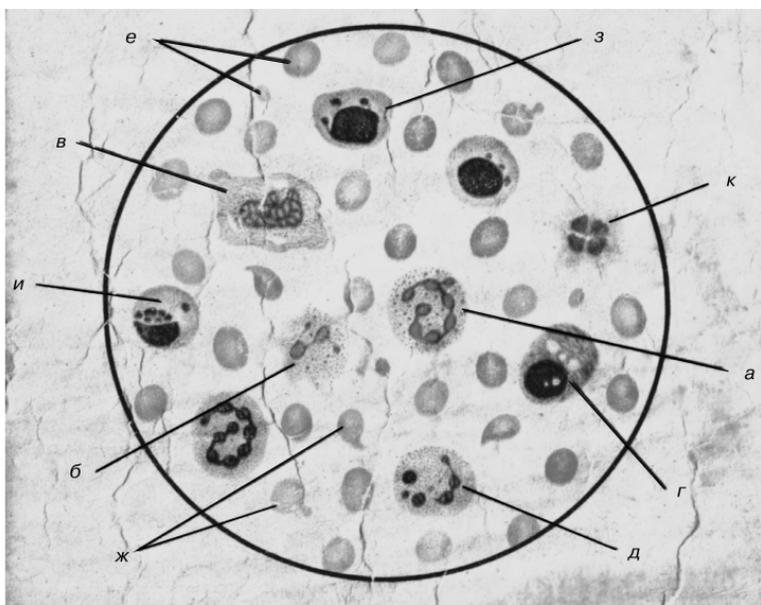


Рис. 49

Картина крови в период разгара лучевой болезни (3-я степень):

a — многосегментированный нейтрофил с токсической зернистостью; *б* — нейтрофил сегментоядерный в состоянии цитолиза; *в* — моноцит с вакуолизацией цитоплазмы; *г* — плазматическая клетка с вакуолизацией ядра и цитоплазмы; *д* — нейтрофил, ядро которого находится в состоянии кариорексиса и хроматинолиза; *е* — анизотроцит эритроцитов; *ж* — пойкилоцитоз эритроцитов; *з* — лимфоцит с фрагментозом ядра; *и* — лимфоцит в состоянии кариорексиса; *к* — лимфоцит в состоянии цитолиза.

ется значительное количество молодых форм эритроцитов (эритробластов), а в дальнейшем они почти исчезают. Отмечаются пойкилоцитоз, базофильная зернистость и анизоцитоз эритроцитов (рис. 49).

Происходит глубокое угнетение иммунозащитных механизмов, резкое снижение сопротивляемости организма к различным инфекциям. Поэтому часто развиваются геморрагическая или некротическая пневмония и язвенно-некротические процессы на слизистых оболочках органов ротовой полости, носоглотки и желудочно-кишечного тракта. Резкое повышение проницаемости всех тканей ведет к поступлению микрофлоры из дыхательных путей и кишечника в ткани и кровь, развивается сепсис. Пораженные животные часто гибнут. За несколько суток до гибели значительно снижается количество эритроцитов и гемоглобина в крови.

Период восстановления у выживших животных затягивается до трех и более месяцев. Полной нормализации функций и структур органов не происходит, они лишь компенсируются за счет других, менее пораженных органов и систем. Постепенно улучшается общее состояние, животные начинают реагировать на внешние раздражители, становятся подвижными. Через 3...4 мес. после облучения частично восстанавливается шерстный покров, который часто теряет пигментацию (седеет). Постепенно восстанавливаются функции кроветворения. В крови появляется большое число эритроцитов и лейкоцитов с нейтрофильным сдвигом лейкоцитарной формулы влево. Однако стабильное количество лейкоцитов и ретикулоцитов устанавливается довольно продолжительное время. Животные еще долго после исчезновения клинических признаков имеют пониженную работоспособность и продуктивность, а также извращенно реагируют на различные раздражители (лекарственные вещества, прививки вакцинами и т. п.). Плохие условия содержания, неполноценное кормление, сквозняки, переохлаждение, перегревание и другие неблагоприятные факторы, как правило, ведут к рецидиву лучевой болезни. Особенно опасны для этих животных инфекционные болезни.

Крайне тяжелая степень острой лучевой болезни в зависимости от уровня доз проявляется в нескольких клинических формах: костномозговой, кишечной, церебральной.

Костномозговая форма (6...10 Гр) лучевой болезни характеризуется угнетением кроветворения, в результате чего отмечается резкое уменьшение количества лейкоцитов, лимфоцитов и тромбоцитов в периферической крови. Это обуславливает развитие геморрагических проявлений энтерита, энтероколита, в отдельных случаях инфекционных осложнений. Общее течение болезни тяжелое, животные гибнут на 15...25-е сутки.

Кишечная форма (10...50 Гр) острой лучевой болезни характеризуется быстронаступающей массовой гибелью клеток эпителия, вследствие этого развиваются тяжелые нарушения желудочно-кишечного тракта. Процессы всасывания и экскреции веществ резко изменяются, происходит обезвоживание организма. Возникают изъязвления слизистой оболочки. Резкое ухудшение состояния организма наступает на 6...8-е сут заболевания. Отмечается лихорадка (температура до 40°C), тяжелый энтерит, кровоточивость. Большую роль играют возникающие инфекционные осложнения и интоксикации организма продуктами жизнедеятельности кишечной микрофлоры, глубокие изменения в кроветворной ткани не успевают развиться. Гибель животных наступает на 9...12-е сут после облучения.

Церебральная форма (50...100 Гр) острой лучевой болезни сводится к появлению непосредственно после облучения мышечного тремора, расстройства функции равновесия и координации движений, тонических и клонических судорог, которые вскоре принимают генерализованный характер. Характерны признаки отека мозга, энцефалита. Гибель отмечается в первые сутки, а при дозах, достигающих сотен грей, смерть животных может наблюдаться во время облучения. В этом случае первичные физико-химические изменения в тканях столь велики, что происходит денатурация белковых структур. Вследствие этого наступает смерть и быстро развивается состояние, сходное с трупным окоченением.

Хроническая лучевая болезнь у животных развивается в результате многократно повторяющегося в течение длительного времени внешнего облучения малыми дозами, а также при попадании внутрь радиоактивных веществ, надолго фиксирующихся в тканях организма. Она может быть и следствием острой лучевой болезни.

При хроническом течении лучевой болезни поражаются почти все системы и органы животного. На ранних этапах болезнь проявляется в виде функциональных нарушений, которые в дальнейшем могут приводить к глубоким трофическим изменениям, в результате этого почти полностью теряются хозяйственно полезные качества животного. В таких случаях наблюдается дистрофия органов, резко угнетается кроветворение, ткани теряют регенерационную способность, снижается естественная иммунологическая сопротивляемость организма к возбудителям инфекций, животное становится бесплодным. В отдаленные сроки (через год и более) возможно развитие лейкозов и злокачественных образований. При хронической лучевой болезни патологические симптомы нарастают постепенно по мере увеличения дозы облучения. Причем одни из них выражены более или менее четко, другие — сглаженно.

Хроническая лучевая болезнь характеризуется длительностью и волнообразностью течения. Это отражает, с одной стороны, проявление повреждений, а с другой — восстановительные и приспособительные реакции.

По тяжести течения различают хроническую лучевую болезнь: легкой (первой) степени, средней (второй) степени, тяжелой (третьей) степени.

Хроническая лучевая болезнь легкой степени характеризуется слабовыраженными сдвигами в морфологическом составе крови, обратимыми функциональными нарушениями сердечно-сосудистой системы и желудочно-кишечного тракта. Количество клеток в крови остается на нижней границе нормы. Встречаются пикноз ядер, фрагментализация. Количество эритроцитов изменяется незначительно. Иногда можно отметить тромбоцитопению, лабильность кровяного давления. В последующие сроки происходит раннее старение организма.

Хроническая лучевая болезнь средней степени проявляется более выраженным угнетением функции органов кроветворения, чем при легкой степени. Наблюдаются геморрагические явления. В результате снижения количества лимфоцитов и нейтрофилов число лейкоцитов в крови постепенно уменьшается. Развиваются тромбоцитопения, умеренная

эритроцитопения. Артериальное давление стойко понижается. Выявляются признаки дистрофических изменений миокарда. Нарастают диспепсические расстройства, сопровождающиеся поносом и снижением массы животного. Нарушаются обмен веществ, функции желез внутренней секреции; развиваются гипопротеинемия, гипогликемия.

Лучевая болезнь может осложняться различными инфекционными болезнями, в результате чего возможен смертельный исход.

Хроническая лучевая болезнь тяжелой степени характеризуется возникновением необратимых изменений в организме, прогрессирующим ухудшением общего состояния, проявляются все синдромы, характерные для лучевой болезни: панцитопенический, желудочно-кишечный, геморрагический. У животных выпадает шерсть. В результате иммунобиологического синдрома развиваются осложнения инфекционной природы, обуславливающие гибель животного.

ВИДОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ

Течение острой лучевой болезни от внешнего воздействия ионизирующего излучения у разных видов животных отличается своеобразием. Это вызывается анатомическими и физиологическими особенностями центральной нервной системы, органов пищеварения, кроветворения и т. д. Более того, у одного и того же вида животных, облученных в одинаковых дозах, степень выраженности определенных симптомов болезни может быть неодинаковой, у отдельных животных некоторые клинические признаки могут отсутствовать. Все это обусловлено индивидуальными особенностями функций различных систем организма.

Своеобразие болезни наиболее ярко проявляется у животных, подвергшихся воздействию ионизирующего излучения в дозах, приводящих к гибели половины облученных особей в течение 30 сут ($ЛД_{50/30}$). Такими дозами являются для лошадей и взрослого крупного рогатого скота 5,5 Гр, собак — 3,5 Гр, овец — 4 Гр, взрослых свиней — 6 Гр, кур — 9 Гр. При этом у животных (птиц) лучевая болезнь характеризуется следующими особенностями.

У крупного рогатого скота первичная реакция характеризуется нарушением функции центральной нервной системы, что проявляется необычной пугливостью и легкой возбудимостью. Животные ведут себя тревожно, у многих отмечается дрожь, напряжение мышц, тремор отдельных мышечных групп. Температура тела вначале повышается на 1°C, затем снижается в течение суток у большинства животных до нормы. Уже к концу первых — началу вторых суток после облучения количество лимфоцитов уменьшается до 300...500 клеток в 1 мкл крови, на 3...4-е сут число лейкоцитов снижается до 2000...3000, а нейтрофилов до 1500...2000 клеток в 1 мкл крови.

В течение последующих 7...10 сут (скрытый период) клинических признаков не наблюдается, лишь иногда возможен незначительный понос с кровянистыми выделениями. Нарушения деятельности желудочно-кишечного тракта обычно развиваются у большинства пораженных животных в течение первых 10...16 сут.

В период разгара болезни развивается общее угнетение, адинамия, отказ от корма, но отмечается жажда. Появляется понос, иногда с большой примесью крови в кале. Животные быстро худеют (на 10% и более). Температурная реакция различная. У одних животных температура тела повышается до 40...41°C, а у других остается на уровне субфебрильной лихорадки или даже нормальная. У многих животных температура тела повышается с 14...15-х сут после облучения и через несколько дней достигает 41,5...42°C. У выживших животных температура повышается не так значительно и к концу третьей недели обычно колеблется в пределах 39...39,6°C. Нередко наблюдаются слабость крупа, ненормально согнутое положение скакательных суставов и отеки тазовых конечностей.

У всех облученных животных нарушается дыхание, оно становится принужденным, с хрипами, появляется кашель. Из носовых отверстий отмечаются тягучие, прозрачные или светло-желтые выделения, позднее они приобретают красный цвет. Развивается отек легких, гортани и глотки. Отмечается повышенная саливация, при осмотре ротовой полости на слизистой можно обнаружить кровоизлияния. Эпиляция выражена слабо.

Наряду с продолжающимся уменьшением числа лейкоцитов, лимфоцитов и нейтрофилов начинает уменьшаться количество тромбоцитов, а примерно с третьей недели — эритроцитов.

Если животные выживают, выздоровление начинается через 3...4 недели. Животные начинают принимать корм, улучшается их общее состояние, восстанавливается функция органов дыхания. Морфологический состав крови приходит к начальному медленно, в течение 3...5 мес., причем количество форменных элементов колеблется то в сторону уменьшения, то в сторону увеличения. Позже всего восстанавливается реактивность организма.

У лошадей первичная реакция появляется сразу же после облучения. У животных наблюдается беспокойство, повышение реакции на раздражители, которые усиливаются, и через час наступает мышечная дрожь всего тела. Животные оглядываются, часто переступают, двигаются по кругу, валяются. Пульс учащается в 1,5...2 раза, дыхание — в 5 раз и более, появляется понос, запальный желоб. В первые же сутки возбуждение сменяется угнетением. Животные больше лежат, вытягивают шею, оглядываются на живот, встают с трудом. Тремор скелетных мышц сохраняется, температура тела повышается на 0,5...1°C. Через сутки появляется отек препуция. Позывы на корм и воду слабые, дефекация редкая, кал жидкий или слабо оформлен. К концу вторых суток признаки первичной реакции на облучение мало изменяются. Животные передвигаются с трудом, наблюдаются подергивания головы, хвоста, конечностей.

По клиническому состоянию с 3...5-х сут наступает скрытый период. Состояние животных улучшается, уменьшается угнетение, температура становится нормальной, снижается частота пульса и дыхания. Количество лейкоцитов снижается до 50% от исходных данных, а лимфоцитов незначительно повышается.

Через 7...9 сут наступает разгар болезни, продолжительность которого 10...25 сут. Наиболее часто он начинается сильным возбуждением. Животные бьют передними и задними конечностями, беспричинно лягаются, при легком прикосновении к шерстному покрову вздрагивают. Постепенно

общее состояние ухудшается, упитанность снижается, на слизистых оболочках и коже появляются множественные кровоизлияния. Температура тела удерживается на верхнем уровне физиологической нормы, пульс учащен, отмечается аритмия. Часто наблюдаются симптомы, характерные для энцефаломиелита: манежные движения, неуправляемое стремление вперед. В тяжелых случаях поражаются глаза, в результате сильного отека конъюнктивы иногда веки выворачиваются. Часто развивается выраженный отек легких. Язвенно-некротическое воспаление различных отделов пищеварительного тракта сопровождается кровотечением из прямой кишки. Эпиляция выражена слабо. По сравнению с показателями здоровых животных количество лейкоцитов составляет 20...40%, тромбоцитов — 20...30%, эритроцитов — 60...70%. Смерть часто наступает при длительной, до 4 ч, агонии. Животное, как правило, лежит на боку, бьет ногами, головой, производит беговые, галопные движения, отмечаются сильная дрожь и потоотделение. Иногда смерть наступает внезапно: животное падает, и через 1...2 мин сердце прекращает работу.

У выживших животных возможны случаи возникновения через 3...5 лет после облучения острого течения лучевой болезни с летальным исходом.

У овец в первые 2...3 сут наблюдаются раздражительность, отказ от корма, редко — нарушение функции желудочно-кишечного тракта. У половины пораженных животных температура тела повышается до 41...42°C. Скрытый период продолжается 10...12 сут.

В начале разгара болезни общее состояние животных ухудшается, нарушается координация движений, отмечаются снижение или отсутствие рефлексов и общая заторможенность. Овцы больше лежат, слабо реагируют на окружающую обстановку. У большинства животных температура тела достигает 40...42°C, при повышении температуры тела учащается частота дыхания. Появляется серозный ринит. У большинства животных появляется понос, кал часто с примесью крови. На 7...10-е сут появляется эпиляция, она резко выражена: у отдельных особей руно снимается почти полностью. Кожа вначале болезненная, затем теряет эластичность и становится шероховатой. На пораженной коже иногда можно

обнаружить точечные кровоизлияния. Масса тела уменьшается на 15...20%.

В значительно ранние сроки проявляется лейко- и лимфопения. Общее количество лейкоцитов уменьшается до 1000 клеток в 1 мкл крови и ниже, количество лимфоцитов достигает 300...500 клеток в 1 мкл. Отмечается сгущение крови.

В связи с нарушением иммунобиологической реактивности организма могут быть различные осложнения, чаще всего пневмония, приводящая большое животное к гибели.

У выживших животных постепенно исчезают внешние клинические признаки болезни, в течение 2...3 мес. нормализуется морфологический состав крови. При этом нередко количество лейкоцитов, особенно лимфоцитов, то увеличивается, то уменьшается.

У свиней в начальный период быстро развиваются признаки нарушения деятельности центральной нервной системы. Наблюдается отказ от корма, частая рвота, сильная жажда, повышенная чувствительность, пугливость. Слизистые оболочки бледные, кал разжижен.

Через 2...3 сут после облучения наступает короткий скрытый период. Общее состояние становится удовлетворительным, животные охотно принимают корм. Однако содержание лейкоцитов снижается на 50% и более.

Обычно к 10-м сут после облучения начинается разгар болезни. Появляется кровотечение изо рта, носа, ануса, развивается конъюнктивит, сопровождающийся кровоизлияниями в слизистую оболочку глаз. Развиваются судороги, на второй неделе после облучения повышается температура тела; появляются отеки конечностей, отмечаются атаксия, шаткая походка, слабость зада, хромота. Животные быстро теряют массу тела. На коже появляются пятна от красного до пурпурного цвета. Часто наблюдаются пневмония, плеврит, язвенно-некротическое поражение тонкого отдела кишечника. Лейкопения прогрессирует. При таком течении болезни свиньи через 15 сут погибают.

Восстановление нормальных функций органов и систем у выживших животных протекает медленно, возможны частые осложнения и рецидивы болезни.

Домашняя птица более устойчива к ионизирующему излучению, нежели животные. При тяжелом поражении наблюдается подергивание головы, глубокое угнетение. Птица припадает к земле, вытягивает шею, как при приеме корма и воды. Гребешок и сережки отекают. Дыхание затрудненное, сопящее, появляется серозное истечение из носовых отверстий. Помет приобретает зеленый цвет. Погибает птица через 8...35 суток после облучения.

ПАТОЛОГОАНАТОМИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ОСТРОЙ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ

Характер патологоанатомических изменений трупов животных, павших от острой лучевой болезни, зависит от тяжести и длительности течения болезни. В целом они будут характеризоваться наличием множественных кровоизлияний разной локализации и характера, отеками и воспалительно-некротическими очагами, особенно на слизистых оболочках органов пищеварения и дыхания, деструктивными и дистрофическими изменениями кроветворной ткани и других органов.

Если животное погибло в разгар острой лучевой болезни, то при внешнем осмотре трупа устанавливают: резкое общее истощение и плохую свертываемость крови; бесшерстные участки на кожном покрове, а также легкое выдергивание волос; множественные кровоизлияния, наличие воспалительных и язвенно-некротических изменений на слизистых оболочках рта, глаз, носа, прямой кишки и влагалища, а также на кожном покрове.

При вскрытии трупов животных различные патологоанатомические изменения обнаруживаются практически во всех органах.

В коже — множественные кровоизлияния. Отек собственно кожи и подкожной клетчатки.

В брюшной полости — скопление серозного, серозно-фибринозного или геморрагического экссудата; на диафрагме, костальной плевре — кровоизлияния, особенно по ходу межреберных кровеносных сосудов.

В сердце — кровоизлияния под эпикардом, особенно по ходу кровеносных сосудов в толще сердечной мышцы и реже — в эндокарде (см. рис. 50).

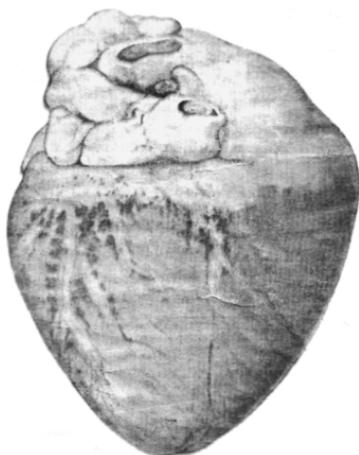


Рис. 50
Сердце. Кровоизлияния
в эпикард

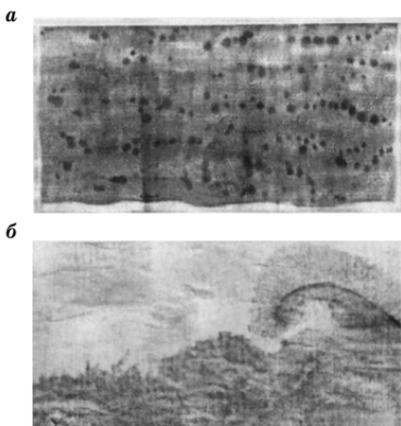


Рис. 51
Кишечник:

а — кровоизлияния в слизистую тонкой кишки; б — язва толстой кишки.



Рис. 52
Почка, множественные
точечные кровоизлияния
в корковый слой

В органах дыхания, в слизистой оболочке дыхательных путей и в легких — кровоизлияния. Воспалительно-некротические очаги и явления пневмонийного характера. У крупного рогатого скота и свиней часто обнаруживают лобулярную двустороннюю пневмонию, которая у большинства животных бывает геморрагического характера. Явления отека легких устанавливают у лошадей, ослов и свиней.

В брюшной полости — скопление кровянистой жидкости.

В органах пищеварения — на серозной и слизистой оболочках желудка и кишечника — различного характера и величины кровоизлияния (рис. 51). У жвачных — сильные кровоизлияния в слизистой оболочке книжки и сычуга. Стенки

желудка и кишечника отечны, а в слизистой оболочке — очаговые некрозы и язвы, окруженные кровоизлияниями с отеком. На слизистой кишечника — фибринозный налет, а в его просвете — жидкое, часто с примесью крови, содержимое.

В печени — полнокровие, иногда кровоизлияния и очаговые некрозы без клеточной реакции вокруг.

В почках — кровоизлияния в корковом слое, околопочечной клетчатке и в слизистой оболочке мочевых путей, скопление кровянистых сгустков в почечной лоханке (рис. 52).

В надпочечниках — отечность соединительной стромы и капсулы, кровоизлияния в кору, ее истончение и обеднение липоидами.

В мочевом пузыре — наличие кровянистой мочи, сгустков крови и фибрина. Различного рода кровоизлияния в слизистую оболочку. Иногда обнаруживается диффузное пропитывание всей стенки мочевого пузыря кровью.

Селезенка уменьшена в размере, морщинистая, фолликулы исчезают, а соединительнотканые перегородки резко выражены. С поверхности разреза стекает кровь, но пульпа сухая и не соскабливается, в пульпе кровоизлияния, она темно-красного или коричневого цвета.

Лимфатические узлы отечны и с кровоизлияниями, увеличены, темно-красного цвета, сочны и влажны на разрезе; наибольшие изменения устанавливают в шейных, средостенных, аортальных и брыжеечных узлах.

Костный мозг имеет вид кровянистой, студневидной или слизистой массы и выдавливается с поверхности распила трубчатых костей в виде кашицы или растекающейся кровянистой жидкости.

В головном мозге — точечные кровоизлияния в мозг и его оболочки, а иногда в субарахноидальное пространство. При гибели животного в начале заболевания отмечается резкое полнокровие головного мозга, а в период разгара болезни мозг может быть бледным. Иногда обнаруживаются абсцессы, явления менингита и очаги размягчения в местах кровоизлияний. При тяжелых поражениях наблюдается отек мозга и его оболочек.

В спинном мозге — кровоизлияния в вещество мозга и его оболочки. Иногда явления отека мозга.

ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗ ОСТРОЙ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ

Поскольку специфических клинических признаков при лучевой болезни у животных не развивается, то диагноз ставится с учетом комплекса имеющихся данных. Ими являются сведения о радиационной обстановке, длительность нахождения на зараженной территории и условия содержания животных, совокупность проявляемых клинических признаков заболевания, гематологических показателей. При диагностике лучевой болезни животных учитываются время начала облучения, характер источника излучения и его вид, суммарная мощность дозы, условия облучения животных и т. д. Наряду с этим важным моментом в диагностике острой лучевой болезни является своевременное выявление клинических признаков заболевания, установление времени их появления, а также продолжительность и степень выраженности. Неоценимую помощь не только в постановке диагноза, но и в определении степени поражения животных дают лабораторные исследования клинического материала, и в первую очередь результаты гематологического анализа.

Выявление и оценка радиационной обстановки проводятся путем сбора сведений о районе и времени применения противником ядерного оружия, условиях размещения животных в момент взрыва и в последующем, уровнях радиации на местности и времени пребывания животных на следе радиоактивного облака, характере кормления и водопоя их на зараженной территории. Полученные сведения позволяют, не обследуя самих животных, сделать ориентировочный вывод о возможной дозе общего облучения и предвидеть тяжесть поражения.

Дозы облучения ионизирующей радиацией незащищенных животных зависят от уровня радиации и времени пребывания на зараженной территории. Наибольшую дозу облучения животные получают в течение первых 24 ч с момента выпадения радиоактивной пыли.

Доза облучения, полученная на зараженной территории в течение первых 4 сут, имеет решающее значение и фактически определяет степень острой лучевой болезни.

Степень тяжести лучевого поражения животных по отдельным клиническим признакам оценить довольно сложно.

Для этого используется весь комплекс патолого-физиологических показателей, прежде всего таких, как общее состояние, координация движений, реакция на раздражители, отказ от приема корма, состояние жвачки, моторной функции желудка (рубца), уровень лактации для дойных животных и др. Однако к развитию болезни у пораженных животных следует подходить творчески, так как возможны различные осложнения, атипичное проявление отдельных признаков.

Пораженные животные могут поступать к ветеринарным специалистам в то время, когда видимые клинические признаки заболевания отсутствуют (скрытый период) или, наоборот, с явными симптомами лучевой болезни (период разгара). В этих случаях прежде всего оцениваются по времени появления и степени проявления те патолого-физиологические показатели, которые определяют неблагоприятный исход болезни. Такими показателями являются:

- в начальный период — появление первичной общей реакции в течение первого часа после облучения; резкое общее угнетение, переходящее в протрацию; упорный отказ от корма; повышение температуры тела в первые же часы после облучения; отечность кожного покрова, особенно в области дистальных отделов конечностей; появление клонико-тонических судорог скелетных мышц;
- в скрытый период — чем короче его длительность, тем тяжелее будет протекать болезнь, а при очень сильных поражениях он может вообще отсутствовать;
- в период разгара болезни — резко выраженная адинамия; лихорадка постоянного типа, сочетающаяся с тяжелым общим состоянием; значительная потеря массы тела; не останавливающиеся кровотечения; выраженная анемия; нарастающая дыхательная, сердечно-сосудистая и легочно-сердечная недостаточность; множественные некрозы видимых слизистых оболочек, кожных покровов и др.; плохо поддающиеся лечению различные осложнения (пневмония, абсцесс, гангрена легких).

Гематологические исследования представляют объективные данные для уточнения степени тяжести лучевого поражения, но при массовом поражении животных, вследствие

трудоемкости и определенной громоздкости методик, проведение их в полевых условиях ограничено. Поэтому при отсутствии возможностей поголовного гематологического исследования выборочно проводятся анализы крови отдельных животных, по результатам которых характеризуется в целом вся группа пораженных животных, находящихся примерно в одинаковых условиях облучения. Из гематологических показателей наиболее надежным является резкое уменьшение количества лейкоцитов, особенно лимфоцитов. Развивающаяся лейкопения — ранний и типичный симптом, который указывает на лучевое поражение организма и характеризует его тяжесть. Уменьшение количества лейкоцитов до 1000 клеток и менее в 1 мкл крови считается весьма неблагоприятным признаком для жизни животного.

Комплексный анализ клинических признаков и гематологических сдвигов, наблюдаемых у облученных животных, позволяет ветеринарному специалисту диагностировать лучевую болезнь. При этом используется максимальное количество как клинических, так и гематологических показателей, которые получают при выборочном обследовании 5...10 животных из каждых 100. Для установления тяжести лучевой болезни полученные результаты обобщаются и сравниваются с показателями, приведенными в табл. 28. Таким способом проводится групповая биологическая дозиметрия лучевого поражения, на основании которой прогнозируется возможный исход болезни у животных.

Таблица 28

Определение тяжести острого лучевого поражения по клинико-гематологическим показателям (по В. М. Караваеву)

Показатели	Легкая степень	Средняя степень	Тяжелая степень	Крайне тяжелая степень
Продолжение первичных реакций	Обычно нет	До 1 сут	До 2...3 сут	Переходит в выраженную клинику
Общее состояние	Незначительное кратковременное угнетение	Заметное угнетение	Угнетение, общая слабость	Сильное угнетение, общая слабость

Продолжение табл. 28

Показатели	Легкая степень	Средняя степень	Тяжелая степень	Крайне тяжелая степень
Температура тела	Без изменений или повышается на 0,3...0,5°C	Без изменений или повышается на 0,3...0,7°C	Повышается на 0,3...1°C	Повышается на 0,3...1,5°C
Координация движений	Не нарушена	Не нарушена	Незначительно нарушена	Заметно нарушена
Реакции на раздражители	Не изменены	Слабо угнетены	Значительно угнетены	Сильно угнетены
Уменьшение удоя коров в разгар болезни, %	Без изменения	На 20...50	На 50...80	На 100
Желудочно-кишечные расстройства	Отсутствуют	Фекалии разжижены	Понос, в фекалиях слизь и может быть кровь	Профузный понос, в фекалиях кровь
Шерстный покров	Без заметных изменений	Волос легко выдергивается, у овец выпадает	Самопроизвольное выпадение волос, облысение	Самопроизвольное выпадение волос, у овец подрунивание шерсти
Уменьшение количества клеток крови, %:				
лейкоцитов	30...40	50...60	50...75	75...90
лимфоцитов	30...40	30...50	50...80	70...90
тромбоцитов	5...15	5...25	40...50	40...60
эритроцитов	нет	10...20	15...20	20...30
Угнетение холинэстеразы, %	5...10	10...30	30...40	60...100
Прогноз	Выздоровление	Гибель до 20% на 20...45-е сутки, при лечении — выздоровление	Гибель 20...60%	Гибель до 100%

Основным показателем при прогнозировании является исход болезни: чем раньше он определен, тем лучше. Это имеет большое значение не только для своевременного проведения лечения, но и для решения вопроса о целесообразности лечения вообще.

Раннее установление неблагоприятного прогноза позволяет в значительной мере сократить затраты на лечение, уход и содержание некурабельных животных, то есть снизить материальный ущерб в случае их гибели, а главное, дает возможность определить дальнейшее содержание и использование пораженных животных (рациональное кормление, улучшение ухода и содержания, установление ветеринарного наблюдения, проведение квалифицированного лечения, освобождение от работы, ограничение эксплуатации, определение очередности убоя).

В зависимости от прогнозируемого исхода болезни животные сортируются на четыре группы. При этом учитывается, что различия между животными, включенными в ту или иную группу, весьма условны и не всегда точно определяются. Первую составляют животные, имеющие легкую степень лучевой болезни, их выздоровление гарантировано. Во вторую группу направляются животные со средней степенью лучевой болезни, выздоровление которых вероятно. Животные, имеющие тяжелую степень лучевой болезни, выделяются в третью группу, их выздоровление маловероятно. В четвертую группу отсортировываются животные с крайне тяжелой степенью лучевой болезни, которые, как правило, гибнут.

Животные первой группы в серьезных терапевтических мероприятиях не нуждаются, но за ними организуется ветеринарное наблюдение. Животные второй группы подвергаются лечению, им предоставляются наилучшие по возможности условия кормления и содержания. Продовольственные животные третьей и четвертой групп используются на мясо, причем чем сильнее тяжесть поражения, тем в более короткое время после облучения животные должны подвергаться убою.

Диагностирование хронической лучевой болезни и оценка ее тяжести затруднительны. Трудность диагностики, особенно на ранней стадии болезни, заключается в том, что ни один из

обнаруживаемых симптомов не является специфическим для лучевого поражения. При диагностике используют анамнестические данные, комплекс клинических проявлений болезни, патологоанатомические изменения у павших животных.

При содержании животных в зоне радиоактивного загрязнения следует осуществлять систему плановых лечебно-профилактических мероприятий (диспансеризацию) с целью сохранения здоровья животных, продуктивности и получения нормативно чистой продукции животноводства. Она включает в себя клинические и лабораторные исследования по общепринятым методам с учетом результатов радиометрических и дозиметрических исследований.

Для обследования радиационно-пораженного крупного рогатого скота разработаны дополнения к методике диспансеризации.

1. При изучении состояния органов дыхания использовать функциональную нагрузку — прогон животных в течение 1–3 мин. После нагрузки выявлять животных с хриплым, везикулярным и затруднительным дыханием, кашлем.

2. Определять толщину кожной складки в области шеи с помощью кутиметра или штангенциркуля. Измерять длину волоса на холке линейкой. Учитывать курчавость и другие отклонения в состоянии волосяного покрова.

3. Проводить выборочные определения титров аутоантител в сыворотке крови к тканям щитовидной железы методом Уанье (по Н. Н. Клемпарской) и концентрации тиреоидных гормонов в сыворотке или плазме крови радиоиммунным методом.

4. При контрольных убоях определять массу щитовидной железы, оценивать состояние околопочечной и перикардальной жировой ткани.

5. При сортировке выявлять животных со следующими изменениями:

- нарушением органов дыхания;
- с ректальной температурой ниже 37°C;
- содержанием общего числа лейкоцитов в крови менее 5,0 тыс. в 1 мм³;
- толщиной кожной складки в области шеи более 12 мм;
- длиной волос на холке более 80 мм и курчавостью.

У таких животных выборочно исследовать титры аутоантител к тканям щитовидной железы и определять концентрацию тиреоидных гормонов в сыворотке или плазме крови, производить контрольный убой (5% от общего числа животных в стаде с подозрением на неблагополучное состояние).

6. При повышении титров аутоантител в сыворотке крови к тканям щитовидной железы более 2,5 баллов, уменьшении концентрации тироксина в сыворотке крови менее 1 мкг/100 мл и массы щитовидной железы ниже 4,0 г, наличии слизистого перерождения окологпочечной и перикардальной ткани, а также с учетом комплекса вышеприведенных показателей животных выбраковывают (О. А. Булычев, В. А. Бударков, Н. И. Архипов, А. В. Васильев, И. Я. Василенко, А. С. Зенкин, Р. М. Юнусова, А. И. Бурцев, Р. Г. Ильязов).

ПРОФИЛАКТИКА И ЛЕЧЕНИЕ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ

Профилактика лучевых поражений. Профилактика лучевых поражений заключается в защите животных от воздействия ионизирующих излучений. Различают физическую защиту, фармакохимическую и биологическую защиту.

Физический способ защиты наиболее радикален и надежен. Он заключается в укрытии животных в помещениях. В зависимости от плотности материалов постройки уровень радиационного воздействия на организм снижается в 10 раз и более. Можно защитить органы и ткани локально, т. е. местно. Для этого к отдельным участкам тела прикладывают свинцовые пластинки или другие плотные материалы. В первую очередь необходимо экранировать живот, селезенку, печень, грудь, таз. Выживаемость животных при использовании местной защиты может увеличиваться на 50% и более.

Однако этот способ защиты не всегда можно применять, так как иногда нет возможности разместить весь скот в животноводческих помещениях с коэффициентом ослабления, равным хотя бы 10, а тем более нет возможности осуществить местную защиту органов и тканей большому поголовью.

Фармакохимическая защита заключается в существенном уменьшении поражающего действия облучения с помощью так называемых радиопротекторов.

Радиопротекторы — это вещества, которые при введении животным за 10...60 мин до облучения на 50...100% защищают их от доз, вызывающих 100% -ную гибель в контроле. Существует много теорий, объясняющих механизм защиты. Но поскольку патогенез лучевой болезни очень сложен и причиной смерти животных служат многочисленные патологические изменения, не может быть однозначного объяснения механизма защитного действия различных химических веществ. В основе этого механизма может быть и временное снижение концентрации кислорода в тканях и клетках, и взаимодействие молекул радиопротекторов с биологическими молекулами с образованием комплексов, устойчивых к повреждающему действию радикалов или перекисей, и миграция избытка энергии с биомолекулы на радиопротектор и др. Таким образом, радиозащитный эффект обусловлен действием радиопротекторов на течение первичных радиационно-химических процессов, возникающих в момент облучения.

Известные радиопротекторы обладают защитным действием при кратковременном облучении. Необходимо изыскивать препараты, обладающие защитным эффектом при пролонгированном облучении. Многие радиопротекторы эффективны в дозах, близких к токсическим. Они неэффективны после облучения. Все это заставляет изыскивать новые защитные препараты.

Биологическая защита заключается в использовании адаптогенов, т. е. веществ, повышающих общую сопротивляемость организма к радиации. К их числу относят элеутерококк, прополис, женьшень, мумие, китайский лимонник, микроэлементы и др.

Механизм действия адаптогенов: ослабление морфологических и биохимических проявлений стрессовой реакции; положительное влияние на кору надпочечников; препятствие появлению кровотокающих изъязвлений в желудке; увеличение пролиферации кроветворных клеток; повышение иммунологической реактивности и пр.

Лечение лучевой болезни. Лечение животных, больных острой лучевой болезнью, должно быть комплексным, патогенетическим, направленным на нормализацию нарушений функций организма, на предупреждение развития

инфекционных осложнений, некробиотических процессов с учетом периода и тяжести поражения.

Основная задача патогенетической терапии — замещение в критических системах утраченной способности клеточного обновления. Известно, что критической системой клеточного обновления является система кроветворения. Поэтому восполнение клеточной убыли этой системы составляет первостепенную задачу заместительной терапии. Основная ее цель — ослабление первичных и вторичных пострадиационных нарушений, непосредственно угрожающих жизни. При этом под первичными нарушениями понимают аплазию костного мозга и связанное с ней обеднение форменными элементами (в первую очередь гранулоцитами и тромбоцитами) периферической крови, а под вторичными — обусловленные этим инфекционные осложнения и кровоточивость.

К заместительной терапии относится пересадка костного мозга и переливание крови. Для выживания 10...100% мышей (в зависимости от дозы) необходимо сохранить жизнеспособными (экранировать во время облучения или ввести извне) 200...400 стволовых клеток, что составляет 0,05...0,1% их общего числа в организме интактных животных. Повышение выживаемости реципиентов является непосредственным результатом ускорения регенерации костного мозга, которая сопровождается быстрым восполнением форменными элементами периферической крови.

Замещение периферической крови — парабиоз, переливание гранулоцитов. Для борьбы с инфекцией в период лейкопении — антибиотики.

Мероприятия по заместительной терапии могут быть отнесены и к функциональному лечению, особенно это касается антибиотиков. Другие виды функциональной терапии представляют собой арсенал симптоматических средств, направленных на поддержание и улучшение деятельности всех органов и систем, в той или иной степени пораженных в каждом конкретном случае.

В первую очередь оказывают помощь животным, вылечить которых можно при минимальных затратах времени, сил и средств. Лечение тяжело больных животных экономически нецелесообразно. Это связано с длительностью лече-

ния, затратами больших количеств лекарственных средств, необходимостью постоянного ухода за больными животными, частым проведением лечебных процедур. При работе с такими животными будет отвлекаться значительное число ветеринарных специалистов и обслуживающего персонала от других, более важных работ. Поэтому животные, имеющие тяжелую, тем более крайне тяжелую степень лучевого поражения, как правило, подлежат убою на мясо до развития клинических признаков заболевания.

Животные с легкой степенью поражения в лечении не нуждаются, им создаются хорошие условия ухода и содержания, улучшается кормление. Первое время, на 1,5...2 недели, за этими животными устанавливается ветеринарное наблюдение с периодическими клиническими обследованиями. При появлении у них признаков какого-либо заболевания проводится соответствующее лечение.

Животные со средней степенью поражения подвергаются комплексному лечению, которое начинается как можно раньше. Кроме того, улучшаются условия содержания и кормления больных животных, так как недостаточное и несвоевременное кормление, беспокойство, перегревание и переохлаждение их, а также плохие условия содержания отягощают течение лучевой болезни.

В связи с поражением слизистой желудочно-кишечного тракта особое внимание уделяется режиму кормления. Диета должна быть щадящей, а рацион — полноценным по питательности (белки, витамины, углеводы, минеральные вещества). Рекомендуется скармливать больным животным траву бобово-злаковых культур (викоовсяная смесь) или разнотравья, а зимой хорошее сено, доброкачественный силос, дробленое зерно, корнеклубнеплоды, сенную муку, отруби, минеральные добавки. Грубые корма предварительно обрабатывают — дробят, запаривают и скармливают вместе с отрубями, комбикормами. Корм задается небольшими порциями 3...4 раза в сутки. Особо ценен доброкачественный сенаж из зеленой массы клевера и люцерны. Воду больным животным не ограничивают. В связи с тем, что у молодых животных, больных лучевой болезнью, происходит обеднение организма хлоридами, вода дается слегка подсоленной.

В комплекс лекарственных препаратов, применяемых при лучевой болезни животных, включаются: средства, нормализующие функцию центральной нервной системы (стрихнин, секуринин и др.), оказывающие десенсибилизирующее действие (димедрол), ослабляющие кровоточивость и другие геморрагические явления (экстракты крапивы, глюконат кальция, хлористый кальций, витамины С, Р, К), стимулирующие кроветворение (витамин В₁₂, углекислый натрий, фолиевая кислота), антиоксидантные препараты (глюкоза с аскорбиновой кислотой, тиосульфит натрия). Для профилактики и лечения инфекционных осложнений, особенно со стороны желудочно-кишечного тракта и легких, применяются антибиотики (пенициллин, бициллин, тетрациклин, стрептомицин и др.) и сульфаниламиды (норсульфазол, фталазол и др.). Проводится также симптоматическое лечение, для чего по показаниям используются сердечные, мочегонные и другие лекарственные средства.

Лекарственные препараты назначаются в соответствии с периодами течения лучевой болезни и с учетом общего состояния больного животного. В процессе лечения учитывается измененная реактивность облученного организма на лекарственные вещества, обусловленная существенными нарушениями приспособительно-регуляторных функций нервной и эндокринной систем. Так, в начальный период лучевой болезни эфирный, хлороформный наркоз у животных протекает глубже и продолжительнее, чем обычно. В скрытый период лучевой болезни эфир и хлороформ угнетают дыхание и понижают артериальное давление. Кюразол и камфора в разгар лучевой болезни часто угнетают дыхание и сердечную деятельность. Диуретин и каломель при лучевой болезни оказывают менее выраженное диуретическое действие, а при увеличенном потреблении животными жидкости диуретический эффект вообще не проявляется.

В начальный и скрытый периоды лучевой болезни тяжелой и крайне тяжелой степени пентоксил, антианемин, фолиевая кислота, витамины В₁₂, В₆, В₂ и С не оказывают положительного эффекта на гемопоэз.

В разгар лучевой болезни повышается чувствительность животных к жаропонижающим средствам, поэтому дозы

уменьшаются на 25...50%. Аспирин и амидопирин в этот период болезни отягощают ее течение, усиливая геморрагический синдром, пирамидон вызывает более глубокую лейкопению.

Сосудосуживающий эффект адреналина в разгар болезни и после выздоровления резко повышен. Введение его под кожу в местах со слабо развитой подкожной клетчаткой может вызвать некроз.

Стрихнин в начальный и скрытый периоды благоприятно влияет на течение и исход болезни, а в разгаре ее отягощает течение радиационного поражения, чувствительность к нему в этот период повышается в 1,5...2 раза. Левомецетин иногда угнетает кроветворение.

Все это указывает на то, что, применяя те или иные лекарственные препараты как при лучевой болезни, так и при других радиационных поражениях, следует обязательно учитывать особенности их действия. Лекарства, применение которых при других заболеваниях позволяет получить положительный терапевтический эффект, при лучевой болезни могут дать совершенно противоположный результат.

В качестве показателя необходимости начала применения антибиотиков условно принято считать снижение количества лейкоцитов до 1000 клеток в 1 мкл. При соблюдении этого правила исключается длительное применение антибиотиков, которое может привести к образованию устойчивых форм бактерий. При отсутствии лабораторного контроля (данных гематологических показателей) критерием для назначения антибиотиков являются сведения о возможной дозе облучения животных. При тяжелой степени лучевого поражения антибиотики назначают с 8-х суток, а при средней степени — с 20-х суток после облучения. Если дозиметрические данные радиоактивного облучения и сведения о составе крови отсутствуют, то антибиотики назначают при повышении температуры тела.

Если в процессе лечения состояние животного улучшается и исчезают признаки болезни, лечение постепенно прекращается. В период восстановления проводится симптоматическое лечение по показателям, применяются средства, стимулирующие кроветворение, а также контролируется кормление и содержание животных.

ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ПОРАЖЕНИИ

Реакции организма на действие радиоактивных веществ зависят от целого ряда условий. К условиям, определяющим действие радиоактивных веществ, следует отнести: агрегатное состояние радиоактивного вещества и носителя, физико-химические факторы, рН среды и носителя, период полураспада T , энергию частиц, характер распределения и выведения радиоактивных веществ. Кроме того, большое значение имеет количество радиоактивного вещества.

Отличие от внешнего облучения, которое не бывает длительным и может быть ослаблено увеличением расстояния от источника, внутреннее облучение продолжается длительно и непрерывно, до тех пор пока не иссякнет источник облучения. Последнее наступает в результате двух не связанных между собой процессов — распада и выведения.

При внутреннем облучении поражающее действие ионизирующего излучения прямо пропорционально энергии частиц или квантов, образующихся в результате распада радиоактивного вещества. В то же время чем выше энергия частиц и короче пробег, тем выше плотность ионизации. Плотность ионизации велика у альфа-частиц, меньше у бета-частиц и мала у гамма-квантов. Если эффективность гамма-квантов принять за 1, то эффективность бета-частиц примерно в 100, альфа-частиц — в 10 тысяч раз больше. При прочих равных условиях повреждения, вызванные инкорпорированными альфа-излучателями, хуже восстанавливаются, чем бета-повреждения. Действие инкорпорированных альфа- и бета-излучателей в зависимости от распределения может ограничиться одним или несколькими органами.

Химические свойства радионуклидов обуславливают дисперсность, агрегатность, растворимость, а следовательно, скорость всасывания радиоактивных продуктов деления в организме, особенности его депонирования, кумуляции и выведения. Например, аэрозоли стронция-90, цезия-137 и бария-140 быстро окисляются на воздухе, а их окислы могут дать с водой гидроокиси. Но в кишечнике стронций и цезий не образуют труднорастворимых гидроокисей, поэтому здесь

легко и быстро всасываются. Наоборот, церий, иттрий, плутоний в кишечнике почти не всасываются, так как дают плохо растворимые продукты гидролиза.

Наличие носителя также сказывается на токсичности радионуклида. Носителем называется весомое количество стабильного изотопа того же элемента (изотопный носитель), в котором радиоактивный изотоп того же элемента содержится в «невесомом» количестве, в крайне ничтожной концентрации, или же весомое количество другого элемента, химически родственного радионуклиду (не изотопный носитель).

Чем больше концентрация радионуклида в носителе (т. е. меньше носителя), тем сильнее токсичность радиоактивного вещества вследствие большей его сорбции организмом. Например, при кормовом поступлении стронция-90 и цезия-137 из глобальных выпадений своеобразным неизотопным носителем первого является стабильный кальций, а второго — стабильный калий. Оба эти элемента содержатся в кормах в макроколичествах. В каждой паре элементов (стронций — кальций и цезий — калий) и, особенно между обоими партнерами первой пары, существуют своеобразные «конкурентные» отношения, т. е. организм избирательно сорбирует носитель в ущерб радионуклиду (дискриминация).

Наибольшую опасность при попадании внутрь организма представляют короткоживущие радионуклиды, так как при прочих равных условиях создают более интенсивное излучение, чем долгоживущие.

Характер распределения радионуклида в значительной степени определяет специфику поражения радиоактивными веществами. При накоплении в организме равномерно распределяющихся радионуклидов наблюдается относительно диффузная картина поражения, для которой типичны выраженная атрофия селезенки и семенников, сильное подавление лимфоидного кроветворения. Воздействие радионуклидов, концентрирующихся избирательно в печени (церий-144, лантан-140, празеодим-147), приводит к возникновению некротически-язвенных изменений в слизистой оболочке кишечника, некрозов в пищеводе, желудке, 12-перстной кишке, к развитию циррозов и опухолей печени. Депонированные остеотропные радионуклиды вызывают характерные

нарушения костномозгового кроветворения и изменения костной ткани.

Картина лучевого поражения при воздействии плохо резорбирующихся радионуклидов зависит от путей поступления с преобладанием местных повреждений. В период выведения радиоактивных веществ из организма ионизирующее излучение воздействует на выделительную систему, интенсивность облучения которой зависит от количества удаляемых излучателей.

В зависимости от тяжести поражений, обусловленных радиоактивными веществами, условно различают дозы, вызывающие острое, подострое и хроническое течение процесса и «малые дозы».

Острая лучевая болезнь тяжелой степени у коров развивается при поступлении с кормом в течение 4 суток растворимой смеси молодых продуктов деления в возрасте до 10 суток в количестве 1,2...1,4 ГБк/кг.

В клинике острого внутреннего поражения животных радиоактивными продуктами ядерного деления в возрасте от 3 до 10 суток выделяют три периода: первый скрытый период (латентный), второй — период разгара и третий — период разрешения.

При тяжелых поражениях *скрытый период* длится в течение 3...5 суток. В это время у животных наблюдается понижение аппетита (в конце периода), лабильный пульс, в отдельных случаях лейкоцитоз или тенденция к лейкопении. Отмечается увеличение моноцитов и гистиоцитов в периферической крови, а также незначительный сдвиг лейкоцитарной формулы влево. Абсолютное количество лимфоцитов при этом не уменьшается.

Период разгара длится в среднем 2...4 недели, иногда 1,5...2 месяца и более. Этот период начинается с нарастания общей слабости, резкого снижения аппетита, появления рвоты, поноса и уменьшения диуреза. В последующем аппетит исчезает полностью, а рвота и понос усиливаются. Иногда возникает анурия. Отсутствие аппетита, изнуряющий понос и рвота приводят к обезвоживанию и истощению организма, что обуславливает значительное уменьшение массы тела. Температура тела остается нормальной. Тоны сердца становятся

приглушенными, а пульс мягким и малого наполнения. Вследствие снижения иммунобиологической реактивности организма у животных развиваются различные осложнения — ринит, бронхит, пневмония и др.

С первых дней разгара болезни в периферической крови животных значительно повышается количество лейкоцитов. Оно может увеличиваться в 3...4 раза по сравнению с исходными данными. Лейкоцитоз носит нейтрофильный характер с резким сдвигом формулы влево. Абсолютная лимфопения не развивается. Количество моноцитов и гистиоцитов в крови увеличивается в 3...4 раза. Число тромбоцитов и эритроцитов, а также процентное содержание гемоглобина при этом чаще всего остаются на исходном уровне. Только при затяжном течении поражения иногда развивается тромбоцитопения, эритропения и гемоглобинемия. Реакция оседания эритроцитов несколько ускоряется. В костно-мозговом пунктате выявляется повышенное содержание молодых лейкобластических элементов.

Период разгара при тяжелой степени поражения постепенно переходит в *период разрешения*, который длится от 3...4 недель до 2...2,5 месяцев, заканчиваясь в большинстве случаев клиническим выздоровлением животных.

При крайне тяжелой степени поражения все симптомы болезни особенно резко выражены. У животных сравнительно быстро развивается кахексия, а через 2...3 месяца после поступления радиоактивных веществ внутрь наступает смерть.

При средней степени поражения скрытый период длится в течение 3...5 дней, а период разгара 1,5...2 недели. Тяжелого состояния у животных обычно не наблюдается. Аппетит, как правило, у них полностью не исчезает. Рвота отмечается только в первые дни разгара болезни, понос бывает у всех пораженных, но без примеси крови в фекальных массах. Масса тела снижается. Количество лейкоцитов у животных увеличивается в 1,5...2 раза по сравнению с нормой. Сдвиг лейкоцитарной формулы незначителен. Число эритроцитов, тромбоцитов, процентное содержание гемоглобина, а также реакция оседания эритроцитов не изменяются. Период разрешения протекает в течение 2...3 недель и заканчивается клиническим выздоровлением животных.

При легкой степени поражения периоды в развитии болезни разграничить не удается. Указанные периоды неодинаково проявляются при попадании радиоактивных веществ внутрь организма через пищеварительный тракт и органы дыхания. При пероральном поражении у животных больше проявляются нарушения желудочно-кишечного тракта, а при ингаляционном поражении — органов дыхания (ринит, трахеит, бронхит).

При действии малых доз в основном повреждения устраняются компенсаторно-приспособительными механизмами организма. Иногда в отдаленные сроки вследствие истощения физиологических систем возможно проявление токсического действия инкорпорированных радионуклидов, обладающих значительной энергией.

Как видно из приведенных данных, клиника острого лучевого поражения продуктами ядерного деления в возрасте от 3 до 10 суток, в отличие от лучевой болезни, вызванной внешним гамма-излучением, характеризуется следующими особенностями:

- отсутствием первичной общей реакции;
- отсутствием явлений подавления кроветворения;
- отсутствием геморрагического синдрома;
- отсутствием выпадения волос;
- резким расстройством функции желудочно-кишечного тракта (потеря аппетита, рвота, понос) с последующим развитием язвенно-некротического гастроэнтероколита;
- резким нарушением деятельности щитовидной железы.

При попадании радиоактивных веществ внутрь организма, который одновременно подвергается внешнему гамма-облучению, у животных развиваются сочетанные поражения. Эти сочетанные поражения, в отличие от лучевой болезни, вызванной внешним гамма-облучением, характеризуются:

- более ранним и значительно более резким проявлением функциональных нарушений пищеварительного тракта;
- более глубоким подавлением функции кроветворения;
- более резким снижением массы тела;
- выраженным нарушением функции щитовидной железы;
- относительно более медленным выздоровлением животных.

Особенности патологоанатомической картины при внутреннем поражении. Патологоанатомические изменения при внутреннем поражении продуктами ядерного деления в возрасте от 3 до 10 суток складываются главным образом из изменений, обусловленных непосредственным воздействием радиоактивных веществ на слизистые оболочки пищеварительного тракта и органов дыхания. В подобных случаях при внешнем осмотре трупов павших животных наблюдается:

- сильное общее истощение;
- катарально-гнойные и язвенно-некротические изменения в слизистых оболочках рта, глаз, дыхательных путей. При вскрытии трупов животных обнаруживается:
- в желудке и кишечнике — катарально-воспалительные и фибринозно-язвенные изменения (особенно в толстом отделе кишечника). В случаях изъязвления стенка желудка и кишечника может быть перфорирована, что обычно сопровождается воспалительными изменениями в брюшине;
- в легких — распространенные острые и хронические бронхопневмонические изменения с большим количеством лейкоцитов в экссудате. При длительной задержке радиоактивных веществ в легких возможны интерстициальные пневмонии и склероз легочной ткани;
- разрушение, атрофия и склероз щитовидной железы. При этом костный мозг бывает вполне нормальным.

При поражении кожного покрова бета-активными продуктами ядерного деления обнаруживается выпадение волос и воспалительные изменения, трещины и язвы кожного покрова.

Диагностика лучевой болезни при внутреннем поражении. Ранняя диагностика (в первые 3...5 суток) осуществляется путем:

- сбора сведений о районе и времени аварии или применении ядерного оружия, месте и условиях размещения животных в момент аварии или взрыва, уровне радиации на местности и времени пребывания животных на следе радиоактивного облака, характере кормления и водопоя животных на зараженном участке. Получение указанных сведений позволяет, не обследуя животных, ориентировочно

судить о возможности и примерной тяжести их радиационного поражения;

- дозиметрического и клинико-гематологического обследования животных. Дозиметрический контроль проводят при помощи проверенных полевых приборов. Вначале проводится дозиметрическое обследование кожного покрова. Выявление радиоактивной зараженности кожного покрова говорит о возможности внешнего радиационного поражения животных. Затем производится тщательная полная противорадиационная обработка кожного покрова и слизистых оболочек. После этого проверяются наличие и интенсивность гамма-излучения от всего тела (в первые сутки после заражения) или от щитовидной железы (в период от 2 до 10 суток после заражения) с помощью бета-гамма-радиометра. При этом датчик прибора устанавливают на расстоянии 0,5 м от тела на уровне брюшной стенки или в непосредственной близости к передней поверхности в области щитовидной железы. Выявление выраженного гамма-излучения от указанных участков тела говорит о внутреннем радиационном поражении животных. Кроме того, в первые 2...3 суток факт внутреннего радиационного поражения может быть определен путем дозиметрического контроля фекальных масс из прямой кишки.

После дозиметрического контроля животные подвергаются клинико-гематологическому обследованию. *Выявление* нейтрофильного лейкоцитоза с выраженной лимфоцитопенией, и особенно лейкопении с лимфоцитопенией, указывает на развитие у животных лучевой болезни от внешнего воздействия радиоактивных излучений. *Обнаружение* нейтрофильного лейкоцитоза с выраженным моноцитозом и гистиоцитозом, а также нормальным количеством лимфоцитов указывает на развитие внутреннего лучевого поражения продуктами ядерного деления.

Первая помощь и лечение при внутреннем поражении. При внутреннем поражении животных радиоактивными веществами срочно проводятся мероприятия, обеспечивающие ускоренное выведение их из организма. *При попадании радиоактивных веществ в желудочно-кишечный тракт:*

- *перорально* вводят водную смесь костной муки или сернокислого бария с йодистым калием. Костная мука или сернокислый барий применяют в дозе 500 г для крупных животных и 50 г для мелких, а йодистый калий в дозе 2,5 г для крупных и 0,25 для мелких животных. Их смешивают с йодистым калием и задают с двойным количеством воды;
- *через 30...60 минут* после дачи адсорбента дают слабительные (глауберову соль 200...500 г для лошадей, 400...600 г для крупного рогатого скота, 40...100 г для овец, 10...25 г для собак). Через 12, 24 и 48 часов дачу слабительных повторяют;
- при возможности у животных через 10...20 минут после дачи адсорбента может быть проведено промывание желудка.

При ингаляционном поражении дают отхаркивающее — хлористый аммоний 8...15 г для лошадей, 10...15 для крупного рогатого скота, 2...5 г для овец. Рвотный корень — 0,5...3 г для лошадей, 2...5 г для крупного рогатого скота. После этого проводят вышеуказанные мероприятия по выведению радиоактивных веществ из желудочно-кишечного тракта.

Для ускорения выведения радиоактивных веществ из крови животным дают мочегонные — диуретин и др. (внутри) 1...10 г для лошадей и крупного рогатого скота. В подобных случаях после депонирования радиоактивных веществ применяют комплексоны — химические соединения, способные реагировать в организме с радиоактивными веществами с образованием устойчивых растворимых комплексов, выделяющихся без разложения через почечный барьер. В качестве комплексонов применяют ЭДТА (кальцийдинатриевая соль этилендиаминотетрауксусной кислоты) в виде 10% -ного раствора 100...200 мл для крупных животных и 10...20 мл для мелких животных в течение 3...4 дней. Унитол применяют 5% -ный раствор по 50 мл крупным животным и 5 мл мелким 2 раза в сутки в течение 3...4 суток. Кроме того, применяют фосфорнокислый натрий, фосфорнокислый калий, сернокислый магний. Но если сорбент введен через 10 минут после поступления стронция-90, то он теряет свою эффективность.

После оказания первой помощи животные с признаками лучевой болезни подвергаются лечению, которое должно быть комплексным и предупредительным. В комплекс лекарственных препаратов, применяемых при внутреннем поражении животных, включаются средства, нормализующие функцию центральной нервной системы (стрихнин, секурин и др.), оказывающие десенсибилизирующее действие (димедрол), ослабляющие кровоточивость и другие геморрагические явления (хлористый кальций, глюкоза, аскорбиновая кислота), стимулирующие функции кроветворения (переливание крови, витамин В₁₂ и др.). Для профилактики и лечения инфекционных осложнений применяют антибиотики (пенициллин, бициллин, тетрациклин, стрептомицин и др.). Проводится также симптоматическое лечение. Животным обеспечивают хорошее содержание и кормление.

ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ КОЖНЫХ ПОКРОВОВ

Одно из возможных последствий воздействия ионизирующей радиации на животных — разнообразные поражения кожи, в частности лучевые ожоги, которые могут комбинироваться с лучевой болезнью.

Лучевые ожоги у животных возникают при воздействии больших количеств радиоактивных веществ, оседающих после ядерных взрывов. Подобные ожоги кожных покровов наблюдали вблизи атомных полигонов в штате Невада (США) в 1945 г. у сельскохозяйственных животных, оказавшихся на пути движения радиоактивного облака наземного атомного взрыва. За 11 коровами наблюдения велись 15 лет, а за одной — почти 20 лет. Общее состояние коров оставалось удовлетворительным, они ежегодно давали здоровых телят; гематологические исследования, начатые через 5 мес. после взрыва, не выявили отклонений, и только у старых коров впоследствии появилась незначительная лейкопения. Кожа спины от выйной области до крестца была депигментирована, сухая (атрофия сальных желез), покрыта редкими седыми волосами или оголена, лишена упругости и подвижности. Здесь развился гиперкератоз в форме плоских или бородав-

чатых выростов, выступающих до 3...4 см над измененной кожей. В подлежащей подкожной клетчатке и мышцах, а также во внутренних органах изменений не было. Через 14 лет у 15-летней коровы герефордской породы развился плоскоклеточный рак кожи височной области, распространившийся за год на орбиту глаза и смежные пазухи. Правда, этот случай еще нельзя расценивать как отдаленные последствия бета-ожогов, так как такая локализация рака у герефордов регистрируется не так уж редко, да и бета-ожогов в этой области не было. Однако среди одиннадцати старых коров рак кожи спины был отмечен у трех.

При равных условиях наибольшие поражения кожи возникают у животных с коротким и редким волосяным покровом (например, у свиней), и, наоборот, у животных с густым и длинным шерстным покровом (овцы) радиоактивные вещества не контактируют непосредственно с кожей, в результате повреждающий эффект альфа- и бета-излучений проявляется крайне слабо и то только в поверхностных слоях кожи (эпидермальном и эпидермопиллярном) за счет бета-излучений.

При облучении всего кожного покрова поражения развиваются раньше и протекают более тяжело в местах нежной и слабо защищенной волосяным покровом кожи — в области вымени, половых органов, сгибаемой поверхности суставов, межкопытцевой щели и др. Бета-ожоги со стойкими трофическими изменениями чаще бывают в области головы и вдоль позвоночника, а на участках тела со слаборазвитой подкожной клетчаткой (ушные раковины, хвост и т. д.) обычно развиваются некрозы (Жоржевенко, 1967). Степень поражения различных участков кожи зависит от условий, при которых животное подвергается бета-облучению. Так, при наличии радиоактивного облака радиоактивные вещества, оседая, попадают в основном на спину, поясницу, круп и голову, где преимущественно развиваются бета-поражения кожи. Когда же радиоактивные осадки выпали, то при прогоне животных по данной местности или пастьбе пыль попадает на нижние части конечностей, живот, слизистую оболочку рта, носовых отверстий и конъюнктиву.

Бета-излучения вызывают специфическое поражение кожи и слизистых оболочек, которые принято называть

бета-ожогами. Однако надо отметить, что, в отличие от истинных термических и химических травм, бета-ожоги менее болезненны, патоморфологические изменения в пораженной коже развиваются постепенно, а процессы репарации (восстановления) протекают вяло.

При смешанном бета- и гамма-облучении местные радиоактивные поражения могут протекать на фоне лучевой болезни.

В течении бета-ожогов клинически различают четыре периода: первичной реакции, скрытый, острой воспалительной реакции и восстановления, а по тяжести поражения, которая зависит от дозы поглощенной энергии, — четыре степени: легкая (при дозе 5 Гр), средняя (5...10 Гр), тяжелая (10...30 Гр), крайне тяжелая (более 30 Гр).

Первый период (первичной реакции) проявляется, в зависимости от дозы бета-облучения, через несколько часов или суток после воздействия и продолжается до 2...3 суток. Наиболее ярко он выражен у слабо защищенных волосным покровом (свиньи) и с депигментированной кожей животных в виде гиперемии и отека пораженных участков. Места поражения болезненны и зудят, поэтому нередко животные их расчесывают, кусают зубами.

Второй период — скрытый. Продолжается в зависимости от дозы облучения от нескольких часов до 2...3 недель. Он характеризуется повышенной потливостью и зудом пораженных участков.

Третий период — выраженной воспалительной реакции кожи.

Легкая степень поражения проявляется умеренной эритемой, а затем незначительной эпиляцией и шелушением поверхностных слоев эпидермиса. При облучении слизистых оболочек развиваются гиперемия и отек.

При средней степени острое воспаление бета-ожога длится 3...4 нед.; оно характеризуется выраженной болезненностью, гиперемией, отеком поврежденной кожи и развитием эрозий. Повышается температура тела. Поврежденные ткани восстанавливаются медленно; длительное время сохраняются болевая реакция и атрофия кожи пораженных участков.

Тяжелая степень поражения в третий период проявляется резко выраженной болевой и воспалительной реакцией (ги-

перемия, отек кожи). В ряде случаев образуются пузыри, по внешнему виду сходные с пузырями термических ожогов. Быстро появляются эрозии и язвы. Одновременно развиваются общие клинические изменения — повышается температура тела, увеличиваются региональные лимфоузлы, ухудшается или пропадает аппетит. В крови выявляются нейтрофильный лейкоцитоз, моноцитоз, эозинофилия, тромбоцитоз, ретикулоцитоз, ускоряется РОЭ. В сыворотке крови уменьшается количество белков, липидов и повышается содержание калия и воды. Часто развиваются признаки общей интоксикации.

При крайне тяжелой степени бета-ожога все признаки острого воспаления и общей реакции организма выражены очень сильно; скрытый период составляет 1...3 дня. Развиваются глубокие гнойно-некротические процессы, которые служат причиной постоянной патологической импульсации в центральной нервной системе; отмечается длительная интоксикация.

Четвертый период — восстановление. При легкой степени процесс заканчивается полным выздоровлением через 1...2 мес., при средней — через 3...4 мес., однако у последних еще длительное время наблюдаются атрофия кожи и повышенная болевая реакция. При тяжелых поражениях язвы заживают медленно — от нескольких месяцев до нескольких лет — по типу трофических язв с разрастанием рубцовой ткани (келоидов) и гиперкератоза. Образовавшийся эпителиальный покров часто изъязвляется; появляются рецидивирующие некрозы. Возможны злокачественные перерождения тканей.

Диагностика при лучевых ожогах. Основывается преимущественно на анализе данных анамнеза (величина и характер загрязненности территории радиоактивными веществами, время пребывания на ней животных), степени загрязнения кожного покрова радиоактивными веществами и характерных клинических признаков. Лучевые ожоги имеют определенные циклы развития с латентным периодом (в отличие от термических ожогов), а также периодами острых деструктивно-воспалительных изменений и длительно не заживающих трофических язв.

По сравнению с обычными термическими ожогами при лучевых поражениях кожи сроки появления реакции и заживления увеличиваются примерно в 4...7 раз. Для лучевых ожогов характерно не только длительное, но и рецидивирующее течение.

Прогноз при бета-ожогах зависит от степени поражения и общей площади пораженной кожи. Прогноз благоприятный при ожогах легкой и средней степени с поражением до 5% поверхности тела, неблагоприятный — при глубоких и обширных поражениях (более 10% поверхности тела). Лечить животных с такими ожогами экономически нецелесообразно.

Лечение. Оказание помощи пораженным животным складывается организационно из двух моментов: ветеринарно-санитарной обработки кожных покровов, направленной на удаление радиоактивных веществ в целях снижения степени поражения, и лечебных мероприятий. Кожные покровы и видимые слизистые оболочки необходимо обработать как можно раньше после попадания на животное радиоактивной пыли для быстрого ее удаления.

Обработка может быть сухой и влажной. Сухая обработка — это механическое удаление с шерстного покрова и кожи радиоактивных веществ при помощи веников, щеток, пылесосов. Это мероприятие легко выполнимо, однако эффективность его невелика. Максимально удастся снизить загрязненность отдельных участков тела до 25% (спина, круп), тогда как радиоактивность других частей (бока, конечности) снижается меньше за счет повторного оседания очищаемой радиоактивной пыли.

При сильном радиоактивном загрязнении шерстного покрова животные становятся источником загрязнения внешней среды, поэтому обработку их нужно проводить очень осторожно. Персонал обеспечивают средствами противохимической защиты (противогаз, комбинезон, резиновые сапоги и перчатки); щетки и веники должны иметь удлиненные рукоятки. Для обработки животных выделяют специальную площадку, на которой делают стоки и ямы для сбора стекающей воды при влажной обработке.

Влажная обработка с применением моющих средств считается более эффективной. При массовой обработке живот-

ных нужно учитывать не только эффективность удаления радиоактивных веществ, но и доступность способов мойки и моющих средств. Самым практичным и доступным способом является обмывание животных водой с мылом при помощи щетки-душа. Водой удаётся удалить с кожного покрова животных бóльшую часть радиоактивных веществ. Правда, жирующие мыла имеют недостаток: при их применении наибольший эффект дезактивации достигается при высокой температуре воды.

Из синтетических моющих средств используют 0,3% -ный водный раствор препаратов СФ-2 или СФ-2У, смесь водных растворов — 0,3% -ный раствор ОП-7 или ОП-10 и 0,7% -ный раствор гексамета-фосфата натрия, сапонины, зеленое мыло и др. Для мытья животных можно взять любые емкости: баки, бачки, ведра и т. п. Однако для подачи и подогрева воды и растворов под давлением лучше применять специальные машины типа ДУК, ЛСД.

Важнейшим профилактическим мероприятием радиационных ожогов служит возможно ранняя ветеринарная обработка животных, зараженных радиоактивными веществами.

Лечение животных с поражением кожи бета-излучением должно быть по возможности ранним и направлено на снятие боли, снижение воспалительных явлений, ускорение регенеративных процессов и предупреждение развития инфекции. Поскольку при лучевых ожогах на первый план выступают трофические расстройства и повышенная болезненность, особое значение среди лечебных мероприятий приобретает применение нейролептических и ганглиоблокирующих средств.

Ожоги первой степени, как правило, лечатся консервативно, с использованием различных мазевых повязок.

Ожоги второй степени требуют хирургической обработки, которая заключается в иссечении пораженных некротизированных участков. При стихании острых воспалительных явлений применяются биостимуляторы. При показаниях проводится детоксицирующая терапия и назначаются антибиотики.

При сочетании лучевых ожогов с общим радиационным поражением проводится лечение лучевой болезни.

КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

При атомном взрыве наблюдается большое количество так называемых комбинированных поражений, т. е. различных сочетаний механических, термических и лучевых повреждений.

Анализ данных взрыва атомных бомб в Японии показывает, что на долю чистых форм лучевых поражений приходится около 15%, остальную же часть составляют комбинированные повреждения. Это связано с большой совокупностью поражающего действия ядерного взрыва — ударная волна, световое излучение, проникающая радиация и радиоактивное загрязнение, которые создают массовые и самые разнообразные сочетания.

Иногда подобные поражения могут возникать и при аварийных ситуациях на атомных предприятиях (ядерные реакторы, атомные электростанции, лаборатории). При этом продукты деления урана, плутония и других элементов могут быть выброшены в окружающую среду. В таком случае возможно поражение сельскохозяйственных животных.

Комбинированные лучевые поражения обычно протекают тяжело. Механическая травма или ожог при комбинированном лучевом поражении усиливают тяжесть течения лучевой болезни. Укорачивается время скрытого периода и значительно удлиняется период разгара лучевой болезни; ярче проявляется геморрагический синдром; возрастает процент осложнений. Лучевая болезнь, в свою очередь, отягощает и ухудшает заживление ран, ожогов, переломов костей и т. п. Комбинированные лучевые поражения сопровождаются часто развитием шока. Он быстро возникает даже при умеренной кровопотере. В данном случае летальность при комбинированных лучевых поражениях в 1,5...3 раза больше, чем только у облученных животных. В основе развития такого состояния лежит особенность биологического действия ионизирующих излучений и патогенеза лучевой болезни, при которой изменяется функциональное состояние центральной нервной системы и нарушаются ее регуляторные функции. Это незамедлительно отражается на деятельности органов и систем, и в частности ведет к падению кровяного давления.

Быстрая послелучевая гипотония предрасполагает к более тяжелому течению шока.

При лучевой болезни резко возрастает содержание гистаминаподобных и других токсических веществ в крови (особенно в первые сроки), понижается общая и местная сопротивляемость организма к инфекции вследствие развития токсемии, анемии и лейкопении, подавления деятельности костного мозга и элементов лимфатической системы, уменьшения фагоцитарной активности лейкоцитов, снижения иммунологических защитных механизмов, ослабления барьерных свойств тканей, увеличения их проницаемости, уменьшения антитоксической функции различных органов и тканей, ослабления или извращения воспалительной реакции, снижения бактерицидных свойств кожи и др. В результате этих изменений повышается восприимчивость облученного организма к разнообразным патогенным и условнопатогенным микробам и их токсинам как экзогенного, так и эндогенного характера (кишечная аутоинфекция). Возникающие в данных условиях инфекционные процессы не только отягощают течение лучевой болезни, но и становятся главной причиной гибели животных.

Развитию инфекции при комбинированных поражениях (раны, ожоги и т. д.), помимо вышеперечисленных причин, способствует и то очень важное обстоятельство, что вследствие понижения регенеративной способности клеток и тканей в связи с подавлением митотической активности и биосинтеза белков в них в области раневой поверхности на длительное время задерживается формирование грануляционной ткани, являющейся надежным барьером для проникновения и развития возбудителей инфекции. Снижают защитные тканевые барьеры также повышение в организме активности гиалуронидазы (фермента проницаемости), кровоточивость, которая является характерной чертой лучевой болезни. Она возникает в результате увеличения проницаемости и ломкости стенки мелких сосудов и капилляров, наличия тромбоцитопении, замедления свертываемости крови и присутствия в крови антикоагулирующих веществ.

При комбинированных радиационных поражениях кровоизлияния и кровотечения наблюдаются, как правило, у большинства пораженных животных. При этом в наибольшей

степени они предрасполагают к возникновению вторичных и поздних кровотечений.

Диагностика и лечение комбинированных лучевых поражений. *Диагностика* радиационно-механических и радиационно-термических поражений направлена на выявление и установление степени тяжести лучевых и нелучевых компонентов. Она осуществляется на основании учета данных анамнеза о мощности и виде ядерного взрыва, условиях размещения животных, расстоянии от эпицентра взрыва, на котором находились животные, а также учитывается клиническая картина поражений и время, прошедшее после воздействия. Эти данные дают возможность ориентировочно судить о наличии, характере и тяжести комбинированных радиационных поражений.

Если же данные об условиях поражения животных отсутствуют, диагноз ставится на основании клинико-лабораторного исследования. При обследовании животных обращается внимание на их общее состояние и поведение, состояние нервной системы, кожных покровов (рана, ожог) и количество форменных элементов в периферической крови.

Диагностика ран не вызывает каких-либо затруднений. При диагностике переломов костей принимается во внимание: укорочение или деформация конечностей, ненормальная подвижность на месте травмы, костная крепитация и др.

Степень тяжести термической травмы оценивается в результате определения глубины и площади ожога с учетом поражения верхних дыхательных путей, значительно отягчающего течение и прогноз ожоговой болезни.

Распознавание радиационного поражения у раненых и обожженных животных связано с большими трудностями, чем при изолированной лучевой травме, особенно в начальном периоде, когда некоторые симптомы, характерные для первичной реакции на облучение, обуславливаются воздействием нерадиационного фактора. Учитывая, что изолированные термические и механические поражения сопровождаются быстро проходящей лимфопенией, для оценки степени облучения при комбинированных радиационных поражениях следует определять абсолютное число лимфоцитов не только в первые двое-трое суток, но и в более поздние сроки после пора-

жения (5...7 сут). В разгар лучевой болезни диагностика не встречает особых затруднений.

Лечение комбинированных лучевых поражений должно быть комплексным. Основным принципом лечения является совмещение терапии лучевой болезни и нелучевых травм.

В случае поражения большого количества животных следует предусматривать не индивидуальное лечение, а методы массового оказания помощи, которые должны включать противошоковые мероприятия, профилактику раневой инфекции и кровотечений, возможно раннее лечение лучевого поражения.

Противошоковые мероприятия должны быть направлены на устранение источника болевого раздражения, нормализацию сердечной деятельности и функции нервной системы, восстановление гемодинамики и борьбу с токсемией и нарушениями обмена веществ.

Для профилактики шока необходимо устранить причину возбуждения и улучшить сердечную деятельность. С этой целью осуществляют тщательное местное обезболивание, а также новокаиновые блокады симпатической нервной системы с учетом локализации патологического процесса и регионарной вегетативной иннервации. При ранениях в области головы делают новокаиновую блокаду краниального симпатического узла, при локализации в области грудных конечностей, грудной клетки — нижнего шейного или звездчатого узла, брюшной полости, половых органов — чревных нервов и пограничных симпатических стволов (по В. В. Мосину) или паранефральную блокаду.

Для однократной эпиплевральной или паранефральной блокады количество 0,25...0,5% -ного раствора новокаина определяют из расчета 1 мл на 1 кг массы животного. Можно рекомендовать внутривенные введения растворов новокаина.

В целях профилактики вторичного шока, дезинтоксикации, выведения токсинов из организма и уменьшения проницаемости капилляров и клеточных мембран целесообразно вводить внутривенно гексаметилентетрамин с хлоридом кальция и кофеином. Одновременно обеспечивают хорошее дренирование и по возможности полностью удаляют мертвые ткани из раны.

Первичную хирургическую обработку ран и все необходимые хирургические вмешательства следует осуществлять как можно раньше, т. е. до разгара лучевой болезни. Хирургическую обработку проводят по общим правилам, но при этом тщательно удаляют некротизированные ткани, инородные тела, останавливают кровотечение, затем накладывают швы. В тех случаях, когда наложение первичного шва невозможно, полноценная первичная хирургическая обработка способствует быстрейшему очищению и заживлению раны.

В целях профилактики раневой инфекции следует применять антибиотики (биомицин, стрептомицин, пенициллин и др.) местно и вводить их в организм.

Что касается применения сульфаниламидных препаратов для профилактики инфекции при комбинированных лучевых поражениях, то, по данным ряда авторов, рекомендовать их следует лишь в особых случаях, так как они угнетающе действуют на лейкоцитоз. Между тем имеются отдельные исследования, которые показывают не только возможность, но и необходимость их применения при некоторых формах лучевых поражений.

Последующее лечение ран и осложнений проводят по общим правилам хирургии.

Ввиду замедленного сращения тканей и во избежание расхождения краев раны швы снимают не ранее 12...15-го дня.

В разгар лучевой болезни оперативное вмешательство можно осуществлять только при крайней необходимости: вторичные кровотечения, распространенные некрозы, гнойные затеки, флегмоны и т. д. Общий наркоз в этих случаях противопоказан.

В период первичной реакции организма на лучевую травму назначают внутривенно 40% -ный раствор гексаметилентетрамина 3...4 раза в сутки из расчета сухого вещества 5...10 г для крупного рогатого скота и лошадей, 2,5 г для овец и свиней и 0,5...1 г для собак.

Чтобы повысить защитные функции организма и ограничить кровоточивость из поврежденных сосудов, переливают кровь малыми дозами и внутривенно вводят хлорид кальция.

В разгар лучевой болезни лечебные мероприятия должны быть направлены на стимуляцию гемопоэза. Для этого

рекомендуют применять витамин В₁₂ в комбинации с фолиевой кислотой, камполон, лейкоген, антианемин. Терапевтический эффект достигается тем выше, чем раньше после облучения произведено лечение.

Наряду с повышением степени тяжести лучевой болезни при комбинированном поражении отмечается также и осложнение течения местного процесса.

В ожоговых ранах значительно замедлены процессы демаркации и отторжения некротических тканей. В период разгара лучевой болезни на обожженных участках наблюдаются обширные кровоизлияния, вторичные некрозы, процессы очищения ран приостанавливаются.

В период разрешения лучевой болезни заживление ожоговых ран протекает медленнее.

Сопоставление изменений в ожоговых ранах с периодами течения лучевой болезни показывает, что в скрытом ее периоде течение раневого процесса не отличается от развития обычных термических ожогов. В период разгара лучевой болезни проявляется угнетение репаративных процессов в ожоговой ране, развиваются осложнения, возрастает зараженность микробами. В период восстановления постепенно нормализуются репаративные процессы.

При нахождении раненых и обожженных животных в зоне радиоактивного заражения возможно попадание продуктов деления непосредственно на раневую и ожоговую поверхность. Часть продуктов деления при этом фиксируется на ней и воздействует на окружающие ткани бета-излучением. При малой плотности заражения раны и ожоги заживают без осложнений. С возрастанием плотности заражения усиливаются явления некроза, бурно развивается гнойное воспаление, замедляются процессы очищения раны. В конечном счете сроки заживления таких ран и ожогов увеличиваются.

Общее действие на организм всосавшихся через рану или ожоговую поверхность продуктов деления маловероятно, так как для этого требуется чрезвычайно сильное заражение раны или ожога.

При сочетании лучевой болезни и воздействия на рану или ожог продуктов деления нарушения раневого процесса выражены особенно отчетливо.

При открытых переломах костей попадание продуктов деления в рану отрицательного влияния на процессы регенерации костной ткани не оказывает.

При попадании радиоактивных веществ внутрь организма они депонируются в области перелома и оказывают отрицательное влияние на регенерацию кости. Особенно сильно нарушается регенерация при одновременном воздействии внешнего и внутреннего облучения.

ОТДАЛЕННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИИ

Расширение сферы использования ядерной энергии в жизнедеятельности человека поставило биологическую науку перед необходимостью выяснения отдаленных последствий лучевых поражений. Особенностью заболеваний, относящихся к отдаленным последствиям, является то, что они возникают как после местного, так и после общего внутреннего и внешнего облучения спустя длительное время. Продолжительность латентного периода отдаленных последствий зависит от характера лучевого воздействия, вида животных, их естественной продолжительности жизни, состояния защитно-компенсаторных процессов.

По мере истощения компенсаторных механизмов развиваются те или иные формы отдаленных последствий.

Различают неопухолевые и опухолевые формы отдаленных последствий (В. Н. Стрельцова, Ю. И. Москалев).

Неопухолевые формы. Включают три вида патологических процессов: гипопластические состояния, склеротические процессы и дисгормональные состояния.

Гипопластические состояния развиваются главным образом в кроветворной ткани, слизистых оболочках органов пищеварения, дыхательных путей, в коже и других органах. Указанные нарушения возникают при длительном накоплении достаточно высоких доз излучения (3...10 Гр) как при внешнем гамма-облучении, так и поражении инкорпорированными радионуклидами. Гипопластические состояния могут проявиться гипо- или гиперхромной анемией, лейкопенией, атрофией слизистой оболочки желудка, кишечника,

гипо- или аноцидным гастритом, атрофией половых желез и бесплодием. Эти состояния трудно поддаются лечению и плохо восстанавливаются.

Склеротические процессы. Для этой формы отдаленных последствий характерны обширное и раннее повреждение сосудистой сети облученных органов, развитие очаговых или диффузных разрастаний соединительной ткани на месте погибших паренхиматозных клеток, полиморфизм и атипизм восстановительных процессов с появлением полиплоидных клеток. Морфологически они проявляются такими процессами, как цирроз печени, нефросклероз, хронические лучевые дерматиты, атеросклероз, лучевые катаракты, некрозы костной ткани, поражения нервной системы, и другими изменениями.

Дисгормональные состояния наблюдаются у 50...100% облученных животных. Этот вид отдаленных последствий возникает без выраженной дозовой зависимости. По-видимому, они развиваются в основном по опосредованному пути лучевого воздействия. В экспериментальных условиях у облученных лабораторных животных наиболее часто дисгормональные состояния проявляются в форме ожирения и реже истощения, в виде гипофизарной кахексии и несахарного мочеизнурения. У самок могут развиваться кистозные изменения яичников, нарушения секреторной и гормональной функций, приводящие к патологическим сдвигам в половых циклах, к стойким пролиферативным изменениям (гиперплазии) слизистой оболочки матки, паренхимы молочных желез, что может привести к развитию опухолей.

Одной из форм дисгормональных состояний является альдостеронизм, который развивается вследствие гиперплазии клубочкового и сетчатого слоев коры надпочечников, приводящей к повышенной секреции альдостерона. Повышенное содержание альдостерона в крови приводит к развитию сосудистого нефросклероза. Паратиреокаринный синдром характеризуется появлением гиперплазии или новообразований в паращитовидной железе, нарушениями метаболизма в костной ткани (фиброзная остеодистрофия) и нефрозами. К числу дисгормональных состояний относится также поражение щитовидной железы (гипотиреозидизм, новообразования) и поджелудочной (сахарный диабет).

Опухолевые формы. Как результат отдаленных последствий лучевых поражений опухоли возникают чаще при облучении инкорпорированными альфа- и бета-излучателями. При этом они обычно развиваются в критических органах. Большое значение в развитии отдаленной патологии при действии радиации имеет влияние нелучевых факторов — химических веществ, механических повреждений. Сочетание действий радиационных и других болезнетворных факторов увеличивает частоту появления опухолей у животных.

Профилактика и лечение отдаленных последствий основываются на использовании неспецифических средств, так как специфических методов пока не разработано. В данных случаях применяют общетонизирующие средства, антибиотики, витамины и различные процедуры.

Генетическое действие ионизирующих излучений. Открыли его Г. А. Надсон и Г. С. Филиппов, опубликовавшие в 1925 г. свои исследования, выполненные на дрожжах и плесневых грибах. Тремя годами позже их результаты были подтверждены на растениях и мушке дрозофиле. В 1927 г. американский ученый Меллер предложил методику количественной оценки частоты наследственных изменений, разработанную на дрозофиле. Затем эти исследования были перенесены на мышей и другие организмы. В последующем, в связи с развитием атомной энергетики и внедрением источников излучения в промышленность, сельское хозяйство и другие отрасли производства, вопросы действия ионизирующих излучений на наследственность приобрели громадное значение. В настоящее время исследованием их занимается специальный раздел науки — радиационная генетика.

Известно, что элементарной единицей наследственности является ген, который имеет строго определенную структуру и функцию. Все гены клетки организма создают общий генотип индивидуума и этим обеспечивают жизнедеятельность организма как целого.

По химической характеристике ген представляет собой участок молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Порядок сочетания в гене азотистых оснований — аденина, тимина, цитозина и гуанина — определяет его специфичность и код. При помощи кода ген передает строго определенную

информацию для развития той или иной функции или структуры клетки и организма в целом. Гены заложены в структуре хромосом. Каждая хромосома несет десятки и сотни генов. Число хромосом в клетках животных каждого вида постоянно. Так, у собак их насчитывается 78, у лошадей — 66, у коров — 60, у овец — 54, у свиней — 40, у человека — 46. Все хромосомы находятся в двух подобных, но неидентичных наборах, например у лошади по 33 хромосомы в наборе. Один из этих наборов наследуется от матери, другой — от отца. В процессе оплодотворения половые клетки сливаются в одну, ядро которой уже имеет два набора хромосом. Перед последующим делением каждая хромосома всегда образует свою точную копию. Поэтому дочерние клетки будут иметь совершенно одинаковые количества и структуры хромосом и генов, т. е. дочерние клетки будут копиями материнских, и это может повторяться в громадном числе поколений. Однако под действием различных внешних и внутренних факторов (ионизирующее излучение, химические вещества и др.) молекулярная структура хромосомы или гена может изменяться. В результате образуется ген с новыми признаками; он уже не будет являться абсолютным подобием старому, т. е. произойдет мутация.

Мутацией называют изменения в гене или хромосоме. Перед последующим делением клетки измененная хромосома воспроизводит копию самой себя, т. е. происшедшие в ней изменения передаются хромосомам последующих поколений клеток. Таким путем наследуется мутировавший ген; он приобретает постоянный характер. Организм, в котором проявляются признаки мутировавшего гена, принято называть мутантом. Если же мутация произошла в половой клетке, то развивающийся организм будет иметь новые наследственные признаки. Огромное количество генов, имеющих у организмов каждого вида, — результат мутаций, многие из которых произошли под влиянием естественного радиоактивного фона.

Различают генные, хромосомные и геномные мутации. Генные мутации — это мутации, возникающие в результате изменения лишь одного гена, их еще называют точковыми. Хромосомные мутации — это изменения в структуре

хромосом. Данные мутации возникают путем: транслокации — перемещения участка хромосомы; дубликации — удвоения, утроения и т. д. отдельных участков хромосом; нехватки, или делеции, — потери участка хромосомы; инверсии — когда оторвавшийся участок хромосомы включается в ту же хромосому, но в перевернутом виде. Все виды хромосомных мутаций, связанных с нарушением структуры хромосом, называют хромосомными абберациями. Геномные мутации, или мутации кариотипа, — это мутации, связанные с изменением числа хромосом.

Характер мутаций, вызываемых ионизирующим излучением, тот же, что и при действии других факторов, например химических веществ, ультрафиолетового облучения, и они не отличаются от самопроизвольных естественных мутаций. Под действием ионизирующего излучения возникают в основном два вида мутаций: генные (точковые) и хромосомные (хромосомные абберации). В некоторых случаях при хромосомных перестройках может произойти восстановление хромосомы, например при разрыве отделившиеся концы могут соединиться и восстановить целостность хромосомы. Частота мутаций при воздействии радиации имеет зависимость от видовой и индивидуальной радиочувствительности объекта и вида ионизирующего излучения, главным образом от величины линейной потери энергии (ЛПЭ).

При инкорпорации радионуклидов наиболее опасными в генетическом отношении считаются ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{14}C .

В результате мутаций могут появляться доминантные (господствующие) и рецессивные (подавленные) гены. Если ген доминантный, то соответствующий признак, носителем которого он является, будет проявляться у потомства первого поколения независимо от того, присутствует данный ген у половой клетки одного или обоих родителей. Если ген рецессивный, то соответствующий признак, который несет этот ген, передаваясь из поколения в поколение, может проявиться первый раз только у правнуков, и то в том случае, когда он имеется в половых клетках и отца, и матери.

При появлении хромосомных аббераций в одной половой клетке оплодотворенное яйцо обычно погибает при первых делениях. Это явление называется доминантной летально-

стью. В случаях же, когда летальность вызывается рецессивными летальными генами и выявляется в ряду последующих поколений, говорят о рецессивной летальности.

Появление мутаций в соматических клетках ведет к возникновению соматических эффектов радиации. Одно из проявлений соматических мутаций — злокачественный рост клеток. Мутации соматических клеток по наследству не передаются. Установление канцерогенного действия радиации побудило создать мутагенную теорию канцерогенеза.

Мутации в соматических клетках под действием радиации приводят к нарушениям иммуногенеза. В частности, после облучения животного в лимфоидной ткани обнаруживаются клетки с хромосомными аберрациями, т. е. они уже являются мутантами и могут вырабатывать антитела против нормальных антигенов хозяина. При появлении большого количества клеток-мутантов может наступить смерть организма.

В настоящее время не установлен дозовый порог, ниже которого излучение не вызывает мутаций. Одной из важных проблем является вопрос об удваивающей дозе радиации. Он имеет существенное значение, ибо дает возможность сопоставить относительный эффект.

Контрольные вопросы

1. Какие вы знаете синдромы острой лучевой болезни?
2. В чем суть патогенеза лучевой болезни?
3. Какие степени лучевой болезни вы знаете в зависимости от величины дозы облучения?
4. Какие периоды в развитии лучевой болезни при внешнем облучении?
5. Какие основные патологоанатомические изменения наблюдаются при острой лучевой болезни тяжелой степени?
6. Особенности течения лучевой болезни при внутреннем облучении?
7. Какие общие принципы лечения острой лучевой болезни?
8. На чем основана диагностика лучевой болезни?
9. Охарактеризуйте основные комбинированные радиационные поражения сельскохозяйственных животных.



ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ВЕТЕРИНАРНО-САНИТАРНАЯ ОЦЕНКА ПРОДУКТОВ ЖИВОТНОВОДСТВА ПРИ РАДИАЦИОННЫХ ПОРАЖЕНИЯХ

При ядерных взрывах или крупномасштабных авариях на предприятиях атомной промышленности, особенно АЭС, происходит радиоактивное загрязнение обширных территорий и массовое радиационное поражение сельскохозяйственных животных.

Радиоактивные вещества поражают животных путем внешнего облучения гамма-лучами и в очень небольшой степени (местно на коже) бета-частицами, а при попадании внутрь организма — альфа-, бета-частицами и гамма-лучами. Во всех случаях происходит ионизация в тканях животного организма, которая служит начальным пусковым механизмом сложного патологического процесса, в результате которого при соответствующих дозах облучения (внешнего или внутреннего) у животных развивается радиационное поражение — лучевая болезнь.

При радиационных поражениях возникает необходимость решения очень важных в практическом отношении вопросов о возможности использования продуктов животноводства, полученных от пораженных животных. Существенное значение в решении проблемы будет иметь ветеринарно-санитарная экспертиза продуктов животноводства, особенно при внутреннем заражении радиоактивными веществами.

Одним из факторов радиационного поражения, влияющих на сортировку животных и послеубойную ветеринарно-санитарную оценку продуктов животноводства, является токсичность радиоактивных веществ. Она различна при внеш-

нем или внутреннем поражении животных и определяется видом излучения, удельной ионизацией, активностью, резорбцией, периодом полураспада и периодом биологического полувыведения из организма.

Наиболее токсичными при внутреннем заражении являются альфа-излучатели, которые в 10000 раз токсичнее гамма-лучей; бета-частицы в 100 раз токсичнее гамма-лучей. Причина неодинаковой радиотоксичности станет понятной, если мы вкратце рассмотрим природу и некоторые данные о свойствах ионизирующих излучений.

Альфа-частицы — это ядра атомов гелия. Они состоят из двух протонов и двух нейтронов. Отсюда они положительно заряжены. Энергия их колеблется от 4 до 10 МэВ, скорость движения — $2 \cdot 10^9$ см/сек (0,8 скорости света). Пробег в воздухе достигает 2...11 см с образованием на этом коротком пути от 116 до 250 тыс. пар ионов. В тканях организма пробег (т. е. глубина проникновения) не более 0,1 мм.

Бета-частицы — это поток электронов или позитронов ядерного происхождения. Их заряд соответственно может быть отрицательным или положительным. Энергия их колеблется от 0,3 до 2,2 МэВ, скорость почти равна скорости света. Пробег в воздухе достигает 25 м, с образованием на своем пути от 1 тыс. до 25 тыс. пар ионов. В тканях организма пробег 0,5...1,0 см.

Гамма-лучи — это поток квантов, т. е. определенных порций электромагнитных колебаний большой частоты, испускаемых возбужденными ядрами атомов. Происходит это в тех случаях, когда при распаде ядра не вся высвободившаяся энергия захватывается альфа- или бета-частицами, вылетевшими из ядра. Оставшаяся избыточная энергия высвечивается в виде гамма-квантов. Дочернее ядро после такого высвобождения избытка энергии переходит из возбужденного в основное устойчивое состояние.

Гамма-лучи являются электрически нейтральными. Энергия их колеблется от 1 до 3 МэВ, скорость равна $3 \cdot 10^{10}$ см/сек. Пробег в воздухе равен 100...150 м с образованием на этом большом пути лишь 10...250 пар ионов. В тканях организма пробег гамма-лучей достигает 15...20 см и более.

Если сопоставить показатели энергии, пути пробега, на которые эта энергия расходуется, и количество образуемых

пар ионов за время пробега, то мы убедимся в обоснованности приведенного выше вывода о степени токсичности альфа-, бета-частиц и гамма-лучей.

Альфа-частицы, имея энергию в 4...10 МэВ, расходуют ее по пути проникновения в ткани на глубину 0,1 мм; бета-частицы энергию в 0,3...2,2 МэВ расходуют, проникая на глубину 0,5...1 см; гамма-лучи энергию в 1...3 МэВ расходуют на пути проникновения в ткани в несколько десятков сантиметров. Отсюда удельная ионизация (количество пар ионов, образовавшихся на единице пути) будет у альфа-частиц наибольшая. Таково действие радиоактивных веществ при попадании их внутрь организма.

При воздействии ионизирующих излучений на организм человека и животных извне (попадание радиоактивных веществ на кожный покров, излучения с грунта, с окружающих предметов, из воздуха и другими путями) мы будем иметь другую оценку токсичности источников ионизирующих излучений.

Гамма-лучи, имея очень малую длину волны и энергию в 1...3 МэВ, обладают большой проникающей способностью. Поэтому они являются наиболее опасными при внешнем воздействии.

Гамма-лучи легко преодолевают кожный и волосяной покровы, лишь частично расходуя на это энергию, а затем, достигая жизненно важных органов и вызывая в них ионизацию, приводят к тяжелым патологическим процессам. При достаточно сильных гамма-источниках зона воздействия гамма-лучей распространяется на всю толщу тканей тела животных.

Бета-частицы, имея проникающую способность в тканях 5...10 мм и до 25 м в воздухе, могут вызвать ионизацию только в поверхностных слоях кожи, попав непосредственно на волосяной или кожный покров животных. Воздействовать на жизненно важные органы и ткани организма при внешнем заражении они не могут.

Альфа-частицы, имея значительную массу (в 7200 раз больше массы электрона или бета-частицы), способны проникать в ткани организма лишь на 0,1 мм, и поэтому их действие в случае попадания альфа-излучателей на поверхность тела животных ограничивается только волосяным покровом животных.

ПРЕДУБОЙНЫЙ ОСМОТР, СОРТИРОВКА И УБОЙ ЖИВОТНЫХ

При решении вопроса о возможности использования продуктов животноводства, полученных от пораженных животных (мяса, молока, яиц), особую сложность представляет наиболее полное использование мяса пораженных животных. Решение проблемы во многом зависит от правильной организации содержания пораженных животных, ветеринарного осмотра, дозиметрического контроля радиоактивного загрязнения и сортировки большого числа пораженных животных, а также строгого соблюдения очередности и своевременности их уоя. Важным этапом в проведении сортировки пораженных животных является их ветеринарно-радиационное обследование.

На первом этапе необходимо получить исходные данные о радиационной обстановке района поражения животных (характер радиоактивных выпадений, уровень радиоактивности территории в месте нахождения животных, время пребывания животных на загрязненной территории, характер кормления и водопоя, тип содержания животных), желательно иметь данные об изотопном составе радиоактивных выпадений. На основании этих данных оценивают вид поражения (внешнее или сочетанное) и прогнозируют степень его тяжести.

На следующем этапе производится общий осмотр всех пораженных животных, при этом ветеринарный врач ориентировочно определяет степень воздействия, оказывает неотложную помощь нуждающимся животным, выборочно определяет животных, у которых необходимо провести дозиметрию кожного покрова (особенно области щитовидной железы), термометрию, взять пробы кала, мочи, молока для радиометрического исследования и кровь для гематологического исследования.

Для сортировки пораженных животных проводят диспансеризацию, которую дополняют дозиметрическими, радиометрическими, радиохимическими исследованиями. По результатам этих исследований делают основные выводы о степени радиационного поражения и определяют пути дальнейшего хозяйственного использования животных.

Важное значение будет иметь также ветеринарно-санитарная экспертиза мяса животных, особенно при внутреннем заражении радиоактивными веществами, так как в этом случае одним из определяющих факторов оценки продукта является уровень его радиоактивной загрязненности.

Животных, поступивших на мясоперерабатывающее предприятие из загрязненной радиоактивными веществами местности, подвергают дозиметрическому контролю и делят на две группы. *Первая группа* — животные, у которых радиоактивное загрязнение кожных покровов выше допустимого уровня. *Вторая группа* — животные, у которых радиоактивное загрязнение кожных покровов отсутствует, ниже или равно допустимому уровню. Животных каждой группы содержат раздельно.

Животные первой группы не подлежат убою, их подвергают ветеринарной обработке (деактивация кожных покровов) и повторному дозиметрическому контролю. Ветеринарную обработку необходимо проводить для обеспечения радиационной безопасности персонала, выполняющего технологические операции уоя и разделки туш, а также для предотвращения дальнейшего поражения животных и предупреждения загрязнения туш радиоактивными веществами.

Если после ветеринарной обработки остаточное радиоактивное загрязнение выше допустимого уровня, то животных подвергают повторной ветеринарной обработке и повторной дозиметрии и в случае ее недостаточной эффективности животных направляют на выдержку для спада радиоактивного загрязнения до допустимого уровня. При снижении радиоактивной загрязненности кожных покровов до предельно допустимого уровня животных переводят во вторую группу и подвергают ветеринарному осмотру по общепринятым методам. Если в результате осмотра выявлены животные с клиническими признаками заболевания (угнетение, дрожь, шаткость походки, повышение температуры), их выделяют, изолируют для уточнения диагноза.

При обнаружении больных инфекционными и инвазионными болезнями, а также животных с незаразными болезнями их назначают на убой и проводят ветеринарно-санитар-

ную экспертизу туш и органов в соответствии с действующими правилами ветеринарно-санитарной экспертизы.

Животных, пораженных радиацией, лечат и по выздоровлении назначают на убой. Однако упитанность таких животных плохая, и получаемая от них продукция низкого качества.

Многочисленные наблюдения за клиническим течением лучевых поражений свидетельствуют, что животных, больных острой лучевой болезнью легкой, средней, тяжелой и крайне тяжелой степени, развивающейся после однократного внешнего радиационного поражения, можно убивать на мясо для хозяйственного использования во все периоды развития болезни (В. М. Караваев, В. Л. Коляков, Г. Н. Коржевенко, 1967).

Туши и органы вынужденно убитых животных, облученных в высоких дозах и убитых в тяжелом состоянии, направляют на бактериологическое исследование и используют в зависимости от данных бактериологического анализа.

Оставшихся животных второй группы, после удаления явно больных, назначают на убой, учитывая количество животных, подвергшихся радиационному поражению, а также вид и тяжесть радиационного поражения. Если количество пораженных животных, подлежащих убою, не превышает суточной потребности в мясе, их всех убивают, в случае превышения — устанавливают очередность и сроки убоя. Сортировку проводят на основании оценки общего состояния животных и результатов прогнозирования тяжести поражения по имеющимся в сопроводительных документах анамнестическим данным о поражающих радиационных факторах (уровень радиации, продолжительность воздействия ионизирующих излучений и др.), дающим возможность установить ориентировочную дозу облучения. Значительную помощь в определении тяжести поражения окажут также лабораторные исследования периферической крови (количество лейкоцитов, лейкоцитарная формула), которые производят выборочно.

Сортировку во всех случаях следует проводить так, чтобы обеспечить убой животных в оптимальные сроки, то есть до наступления признаков лучевой болезни. Животных целесообразно направлять на убой в скрытый период по принципу:

чем быстрее, тем лучше. При необходимости соблюдают очередность убоя.

В первую очередь убивают животных с комбинированными поражениями — острая лучевая болезнь с травмами, местными поражениями, а также животных, у которых прогнозируется крайне тяжелая (доза облучения свыше 6 Гр) степень лучевой болезни, молодняк в возрасте до 8 месяцев, облученный в дозе более 3 Гр, птицу, облученную в дозе более 7 Гр. Этих животных целесообразно убивать на мясо в первые 2...4 дня после воздействия радиации. Затем проводится убой животных, у которых прогнозируется развитие лучевой болезни тяжелой степени: взрослые животные, облученные в дозе 4...6 Гр, молодняк — в дозе 2...3 Гр, птицу — в дозе 5...7 Гр. Убой этой группы следует проводить в первые пять суток после радиационного поражения.

Допустим убой животных и в период разрешения лучевой болезни. Однако с экономической точки зрения этот срок менее выгоден, так как животные будут сильно истощены, большинство животных погибнет в период разгара болезни (на 9...21-й день после облучения), поэтому несвоевременное назначение на убой может привести к значительным потерям.

Убой животных, у которых суммарная доза внешнего и внутреннего облучения, согласно прогнозу, вызывает легкое лучевое поражение, проводят в любое время. Учитывая, что в первые две недели после прекращения поступления радиоактивных веществ происходит наиболее интенсивное выведение из организма и естественный распад депонированных радионуклидов, убой таких животных целесообразнее проводить через 14 дней, при этом радиоактивность мягких тканей снижается в 5...10 и более раз.

В день убоя животных еще раз подвергают дозиметрическому контролю с целью прижизненного определения содержания радионуклидов в мышечной ткани животных и клиническому осмотру с поголовной термометрией, при повышенной температуре их к убою не допускают и изолируют.

Животных, радиоактивная загрязненность кожных покровов которых равна или ниже предельно допустимой величины, перед убоем желательно подвергать гигиеническому обмыванию водой с применением моющих средств, причем

моют очень тщательно, и желательны, чтобы животные обсохли до убоя.

Вынужденный убой животных, подвергшихся радиационному воздействию, проводят отдельными группами на санитарной бойне мясокомбината либо в общем зале, но после убоя здоровых животных, а также на специальных убойных пунктах, обеспечивающих соблюдение мер радиационной безопасности для персонала и окружающей среды.

Для предупреждения загрязнения туш радиоактивными веществами снятие шкур и нутровку производят только в подвешенном вертикальном положении. Желудок и кишечник удалять раздельно не разрешается, на прямую кишку и пищевод накладывают лигатуры. Снятые шкуры и извлеченный кишечник после проведения ветеринарно-санитарной экспертизы немедленно удаляют из убойно-разделочного отделения. Шкуры консервируют в специально отведенном помещении, желудки и кишечники используют в зависимости от концентрации в них радиоактивных веществ и наличия патологоанатомических изменений. Если содержимое желудочно-кишечного тракта либо какой-то другой орган имеют высокий уровень радиоактивности, то их уничтожают путем захоронения в специально отведенных местах на глубину не менее 2 м.

Люди, осуществляющие убой скота и разделку туш, должны иметь спецодежду, средства защиты, соблюдать меры личной профилактики, по окончании работы помещения, инструменты, одежду и прочее подвергают дезактивации и дезинфекции с последующим дозиметрическим контролем.

ВЕТЕРИНАРНО-САНИТАРНАЯ ОЦЕНКА МЯСА ПРИ ВНЕШНЕМ ГАММА-ОБЛУЧЕНИИ

При радиационных поражениях животных резко подавляются защитно-барьерные функции организма: ослабляется естественный и приобретенный иммунитет, снижаются бактерицидные свойства крови и лимфы, понижается антитоксическая функция печени, угнетается макрофагальная защита, продукция антител, увеличивается проницаемость слизистых оболочек, снижаются их бактерицидные свойства.

Микроорганизмы, обитающие в кишечнике и дыхательных путях (сапрофиты), резко повышают свою активность и патогенность и вызывают лучевую бактериемию, которая служит причиной различных инфекционных осложнений. Повышение проницаемости и ломкости капилляров в ходе развития лучевого поражения приводит к появлению множественных кровоизлияний различной локализации и размеров.

Эти два фактора определяют характер патологоанатомических изменений, обнаруживаемых при проведении ветеринарно-санитарной экспертизы туш и органов.

Уже в скрытый период лучевой болезни (первые 3...5 дней после облучения ЛД_{50/30}) обнаруживаются точечные кровоизлияния под эпикардом, в почках, на слизистой желудка и кишечника. Костный мозг через 2...3 дня приобретает желтоватый цвет в результате гибели кроветворных элементов и замены их жировыми и плазматическими клетками. Подобные изменения встречаются в скрытый период, когда убой животных возможен и необходим, но при наличии даже таких патологоанатомических изменений следует проводить бактериологическое исследование туш и органов.

В период разгара лучевой болезни нарастают признаки геморрагического синдрома, когда наблюдаются обширные кровоизлияния в подкожной клетчатке и коже, в слизистой оболочке ротовой полости, глотки, желудочно-кишечного тракта, почках, лимфатических узлах, мочевом пузыре, отек легких.

У животных, убитых в период разрешения лучевой болезни, можно обнаружить следы бывших кровоизлияний в виде скоплений гемосидерина в слизистой оболочке кишечника, а также гемосидероз лимфатических узлов, придающий им ярко ржавую окраску. Костный мозг имеет нормальный вид, но по цвету он может отличаться, так как его окраска бывает либо бурой (при скоплении гемосидерина), либо более бледной (при выраженной анемии), чем обычно.

Санитарная оценка. Ветеринарно-санитарную оценку туш и органов при внешнем облучении гамма-лучами проводят обычным способом с учетом радиоактивной загрязненности. Чтобы исключить наличие радиоактивных веществ в органах и тканях облученных животных, необходимо опре-

делять степень радиоактивной загрязненности мяса и субпродуктов не только при внутреннем поражении радиоактивными веществами, но и при внешнем облучении.

Туши и органы животных, облученных только внешним гамма-излучением и убитых в начальный и латентный (скрытый) период и период выздоровления, при использовании в пищу безвредны. Если при осмотре туш и органов обнаружены патологоанатомические изменения, то их в обязательном порядке направляют на бактериологическое исследование. При этом удельная радиоактивность, по данным радиометрии, должна быть равна или ниже предельно допустимого уровня. Желудок и кишечник таких животных многократно промывают водой и после радиометрического исследования принимают решение об их промышленном использовании. Санитарно-гигиеническая оценка производится с учетом результатов исследования.

При обнаружении патологоанатомических изменений, характерных для разгара лучевой болезни, необходимо провести бактериологическое исследование. Чтобы исключить сочетанное поражение, проводится радиометрия. Санитарная оценка при этом зависит от результатов бактериологического и радиометрического исследования. Внутренние органы уничтожают.

Следует иметь в виду, что мясо пораженных животных портится быстрее мяса здоровых животных, поэтому его нужно использовать в первую очередь. Глубина и сроки созревания мяса облученных животных зависят от тяжести радиационного поражения и времени убоя с момента облучения. Созревание мяса животных с легкой степенью лучевой болезни и убитых в любые сроки после облучения идет обычным порядком. Созревание мяса животных с одинаковой степенью лучевой болезни и убитых через 2 дня после поражения примерно соответствует показателям созревания мяса здоровых животных, тогда как мясо животных, убитых на пятый день после поражения, практически не созревает. Мясо животных с тяжелыми поражениями и убитых на 5...7-й день менее стойко при хранении и признаки его недоброкачества появляются на 2...3 дня раньше, чем в мясе здоровых животных.

Если товарное мясо и мясопродукты находятся в зоне действия облучения (гамма и нейтронного), в них появляется наведенная (искусственная) радиоактивность, так как элементы натрия, фосфор, калий, кальций, хлор, сера, углерод и другие под влиянием нейтронов становятся радиоактивными. В костях она обусловлена фосфором, в мышцах — натрием, калием, фосфором, железом. Через 5 дней эта радиоактивность снижается на 98...99%. Поэтому в таких ситуациях следует обеспечить условия для хранения мяса и мясопродуктов для спада радиоактивности до предельно допустимого уровня (деактивация распадом).

ВЕТЕРИНАРНО-САНИТАРНАЯ ОЦЕНКА МЯСА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ЗАРАЖЕНИИ РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

При ветеринарно-санитарной экспертизе туш и органов, полученных от животных с внутренним заражением радиоактивными веществами, необходимо знать основные закономерности всасывания, распределения, накопления и выведения радионуклидов из организма. В зависимости от агрегатного состояния, физико-химических и других свойств одни радионуклиды почти полностью всасываются, другие лишь в пределах сотых долей процента.

После всасывания радионуклиды распределяются в органах и тканях неравномерно, проявляя выраженную тропность. При поступлении плохо резорбирующихся радионуклидов обычно наблюдается местная картина поражения в зависимости от путей поступления и выделения. В таких случаях загрязнение продукции животноводства будет незначительным. При поступлении в организм хорошо всасывающихся радионуклидов загрязнение продукции животноводства будет зависеть от характера распределения и накопления радионуклидов.

Большая часть молодых продуктов ядерного деления (ПЯД) концентрируется в щитовидной железе, удельная радиоактивность которой в несколько тысяч раз выше, чем в других органах и тканях. На втором месте по степени концентрирования радиоактивных веществ стоят лимфатические

узлы. Среди остальных органов и тканей наибольшая удельная радиоактивность обнаружена в печени (лантан, церий), почках (висмут, селен, мышьяк), костях (стронций). Среднее место занимают мышцы, удельная радиоактивность которых ниже, чем костей.

Наименьшую концентрацию радиоактивных веществ отмечают во внутреннем жире и шпиге, удельная радиоактивность которых при убое в ранние сроки (до 14 дней) в 3...5 раз ниже, чем в мышечной ткани.

Со временем абсолютное содержание радиоактивных веществ, депонированных в организме, уменьшается вследствие их выведения и естественного распада. Особенно интенсивен спад радиоактивности в организме в течение ближайших двух недель после прекращения загрязнения. При этом концентрация радиоактивных веществ в щитовидной железе, печени, почках, мышцах убывает быстрее, чем в костях. Если удельную радиоактивность тканей животных, убитых в первые дни после поступления радиоактивных веществ, принять за исходную, то при убое животных спустя 2...3 недели щитовидная железа, паренхиматозные органы и мышцы имеют загрязненность меньше первоначальной в десятки, а кости — лишь в несколько раз. Наиболее резко удельная радиоактивность убывает в почках и печени. В жире загрязненность уменьшается менее интенсивно, чем в печени и мышцах, но быстрее, нежели в костях. В это время органы и ткани животных по удельной радиоактивности (в убывающем порядке) можно расположить следующим образом: щитовидная железа, кости, печень, почки, селезенка, мышцы, жир.

По мере отдаления срока убоя животных одновременно с уменьшением абсолютного количества инкорпорированных радиоактивных веществ происходит их заметное перераспределение в организме. Так, на протяжении первого месяца после окончания загрязнения отмечается снижение процентного содержания радиоактивных веществ в щитовидной железе, паренхиматозных органах и мышцах. Доля радиоактивности в скелетных мышцах уменьшается особенно заметно в период между месяцем и годом. Вместе с тем наблюдается последовательный рост относительной загрязненности скелета,

прекращающийся к концу месяца. Процентная доля радиоактивных веществ, депонированных в туше, в течение первого месяца возрастает. При убое овец в первые дни и спустя месяц после окончания поступления радиоактивных веществ в туше содержится соответственно 50 и 75% радиоактивности, находящейся в организме. У овец, убитых по истечении года и более, относительная загрязненность туш находится примерно на одном уровне и составляет 50...60%.

При значительном внутреннем заражении радиоактивными веществами патологоанатомические изменения в организме пораженных животных в основном напоминают изменения при внешнем облучении. Однако имеются и некоторые особенности. Эти особенности зависят от путей поступления радиоактивных веществ в организм и их непосредственного местного воздействия на клетки и ткани органов. Степень поражения органов и тканей зависит также и от длительности контакта радионуклидов с клетками тканей. Так, при поступлении радионуклидов через желудочно-кишечный тракт в нем обнаруживают катарально-воспалительные и фибринозно-язвенные изменения, глубина которых может вызывать в отдельных случаях перфорацию стенки и перитонит. Вокруг участков изъязвления и некроза наблюдается лейкоцитарная реакция в виде нагноения (чего не бывает при внешнем облучении вследствие лейкопении). Изменения в кишечнике более выражены в толстом отделе, что связано с длительным пребыванием здесь радионуклидов. В этом отделе концентрируются радионуклиды, не резорбированные кишечником, и те, которые выделяются из организма через него.

При поступлении радиоактивных веществ через органы дыхания наблюдаются риниты, бронхиты, бронхопневмонии как остро, так и хронического течения с большим количеством лейкоцитов в экссудате.

Существенные изменения наблюдаются в критических органах и тканях. При заражении молодыми продуктами ядерного деления в возрасте от 3 до 10 суток (в основном радионуклиды йода и ксенона) таким критическим органом будет щитовидная железа. Удельная радиоактивность щитовидной железы в 1000...10000 раз больше, чем в других органах. В результате воздействия радионуклидов в ней проис-

ходят большие разрушения. Она уменьшается в объеме, наблюдается спадение фолликулов, набухание и дистрофические изменения клеток с распадом и слущиванием в просвет фолликулов. В отдельных случаях ткань щитовидной железы может исчезнуть как при хирургической экстирпации щитовидной железы.

При заражении животных стронцием-90 критическим органом будет костная ткань. Кроме высокой удельной радиоактивности, в костной ткани встречаются опухолевые изменения (особенно в хронических случаях заражения). Они развиваются сначала в костномозговой полости, а затем проникают в окружающие мягкие ткани.

Поражения других паренхиматозных органов имеют более выраженный характер, чем при внешнем облучении вследствие накопления в них радионуклидов, поражающих орган и создающих его радиоактивность.

После щитовидной железы наибольшая удельная радиоактивность обнаруживается в лимфатических узлах. Их радиоактивность сохраняется в течение 1...2 лет и может служить диагностическим показателем при ветсанэкспертизе, свидетельствующем о давних радиационных поражениях.

При общем осмотре мясной туши пораженных животных бывает резко выражена потеря подкожной жировой клетчатки, бледность мышц, а иногда наблюдается и общее истощение. Радиоактивность туши при убое животных через 3...4 дня после заражения будет составлять около 55% общей радиоактивности организма (скелет — 15%, мышцы — 40%), а при убое через 25 дней после заражения — около 75% (из них скелет — 45%, мышцы — 30%).

В отличие от патологоанатомических изменений, вызванных внешним облучением, при данной форме лучевой болезни не наблюдается резко выраженной картины геморрагического синдрома, макроскопически почти не обнаруживаются изменений в костном мозгу, на кожном покрове нет бесшерстных оголенных участков (волосы не выпадают).

При ветеринарно-санитарной экспертизе туш и органов, полученных от животных с внутренним заражением или подозрительных в заражении радиоактивными веществами, обязательно проводится радиометрическое исследование.

Для радиационно-гигиенической оценки туш и органов в ветеринарную лабораторию направляют пробу мышц, отбираемую у зареза, весом 100 грамм, ребро целиком, почку целиком и часть печени (кусочек весом до 100 грамм).

Санитарная оценка. По данным предубойного осмотра, послеубойной ветеринарно-санитарной экспертизы и радиометрического исследования проводится радиационно-гигиеническая оценка мясной туши и внутренних органов.

Туши и внутренние органы, полученные от животных с внутренним заражением радиоактивными веществами и убитых в скрытый период лучевой болезни или в период выздоровления, выпускаются без ограничений, если в них не обнаружено патологоанатомических изменений, а удельная радиоактивность не выше допустимого уровня.

Туши и органы, в которых не обнаружены патологоанатомические изменения, но установлена радиоактивная загрязненность выше допустимого уровня, в зависимости от имеющихся условий либо направляют на хранение в отдельные камеры холодильника до спада радиоактивности ниже предельно допустимого значения, либо подвергают технологической обработке с использованием различных методов, способствующих снижению радиоактивной загрязненности (посол, обвалка и др.).

При обнаружении в туше и органах патологоанатомических изменений, кроме радиометрического исследования, пробы направляют для бактериологического исследования.

Туши и органы с удельной радиоактивностью выше допустимого уровня подвергают дезактивации, а внутренние органы уничтожают.

Если в органах, лимфоузлах или мышцах обнаружены бактерии группы паратифа, кишечной палочки, кокковая микрофлора, гнилостные микробы (особенно группы протей), то органы уничтожают, а туши обезвреживают проваркой при условии, что радиоактивная загрязненность мяса превышает допустимый уровень не более чем в 2 раза. В случае недостаточного снижения радиоактивности при этом способе дезактивации мясо дополнительно дезактивируют другими способами.

В случае убоя животных, пораженных радиоактивными веществами, в ранние сроки после загрязнения необходимо

при разделке туш конфисковать щитовидную железу и крупные пакеты лимфатических узлов, не проводя их радиометрии.

Если при поражении кожного покрова животных только альфа-, бета-излучателями мясная туша и внутренние органы не имеют патологоанатомических изменений и отсутствует радиоактивное загрязнение, то их выпускают без ограничений.

При выпадении радиоактивных аэрозолей из радиоактивного облака возможно загрязнение туш, если они хранились или транспортировались неукрытыми или были недостаточно защищены. Степень загрязнения мяса будет зависеть от способа и длительности его хранения, а также от интенсивности местных радиоактивных выпадений.

Возможен также контактный путь загрязнения радиоактивными веществами туш и органов в случае их перевозки на загрязненном транспорте, обработки на загрязненном оборудовании и т. д.

В отличие от структурного загрязнения туш, происходящего биологическим путем, аэрозольное и контактное загрязнение носит поверхностный характер, вследствие чего создаются благоприятные возможности для дезактивации загрязненного мяса механическими способами.

Определение загрязнения радиоактивными веществами поверхности может быть проведено путем измерения мощности дозы гамма-излучения мяса с помощью дозиметрических приборов. Для радиоактивных продуктов ядерного деления возрастом до 30 суток предельно допустимая величина загрязнения мяса по гамма-излучению составляет для говяжьей полутуши, туш свиных и бараньих 4 мр/час.

После дозиметрического контроля радиоактивного загрязнения отбирают пробы для радиометрического исследования (при небольшой партии мяса от каждой туши, если крупная партия, то лишь от туш, заметно отличающихся уровнями загрязнения). Для этого срезают поверхностный слой мяса 0,5 см с наиболее загрязненных участков туши, два среза складывают один с другим загрязненными сторонами, помещают в стеклянную тару с плотно пригнанными крышками, опечатывают и пробу направляют в лабораторию.

При радиоактивной загрязненности туш выше предельно допустимых величин их подвергают дезактивации путем многократного обмывания водой. Если таким образом радиоактивность не удастся снизить до допустимого уровня, то срезают верхний слой мяса около 0,5 см. Если и после этого радиоактивность выше допустимой величины, то, в зависимости от условий, туши хранят в холодильнике (отдельная камера) до спада радиоактивности или засаливают. Заключение о возможности использования такого мяса дают после радиометрического исследования.

Ветеринарно-санитарную оценку тушек и органов домашней птицы, находившейся на загрязненной радиоактивными веществами местности, проводят в соответствии с действующими правилами экспертизы и учетом результатов радиометрических исследований. Желудок и кишечник конфискуют.

Если радиоактивная загрязненность тушек и органов превышает предельно допустимый уровень, то внутренние органы уничтожают, а тушки выдерживают до спада радиоактивности ниже допустимого значения.

Скорость и величина уменьшения удельной радиоактивности туш и органов при хранении зависит от возраста радиоактивных продуктов деления. Чем меньше возраст смеси радиоактивных веществ, то есть чем раньше после деления они поступили в организм животного, тем быстрее и больше происходит спад радиоактивности.

Это объясняется тем, что при загрязнении животных молодыми продуктами деления, содержащими значительное количество короткоживущих радионуклидов, в туше и органах задерживается, естественно, больше радиоактивных веществ с относительно малым периодом полураспада по сравнению с долгоживущими радионуклидами. При поступлении в организм старых продуктов деления, наоборот, в туше и органах фиксируется больше долгоживущих радионуклидов.

При периодической радиометрии хранимых туш и органов животных, пораженных молодыми радиоактивными продуктами деления, установлен различный уровень спада удельной радиоактивности в разных тканях и органах. Наиболее быстро распадаются радиоактивные вещества, содержащиеся в почках. В печени и мышцах удельная радиоактивность убы-

вает медленнее. С наименьшей скоростью происходит распад радиоактивных веществ, депонированных в костной ткани.

В первый месяц хранения (особенно в ближайшие дни) уменьшение радиоактивной загрязненности туш и органов животных, пораженных молодыми продуктами деления, происходит относительно быстро, но затем замедляется.

Кроме хранения, для снижения радиоактивной загрязненности туш может быть использована технологическая обработка их с применением различных методов: обвалка, посол, варка. Многократное вымачивание ее солонины снижает ее удельную радиоактивность.

Ввиду того что мышцы всегда имеют значительно меньшую удельную радиоактивность по сравнению с костями, одним из способов понижения радиоактивной загрязненности туш является обвалка (отделение костей от мяса). Значительная часть радионуклидов накапливается в костной ткани (стронций-90), поэтому отделение мяса от костей значительно снизит радиоактивность мясной туши. Обвалка производится по общепринятой методике. Кости закапывают в землю на глубину 2 м. Сжигать кости запрещается.

Простейшая кулинарная обработка — варка мяса кусками по 2 кг в открытых котлах в течение 1 часа способствует снижению его радиоактивности, так как в бульон переходит более половины (до 60%) депонированных в говядине, баранине и мясе птиц радиоактивных веществ. При этом изменение продолжительности варки мяса в пределах от 1 до 4 часов и кислотности воды при рН от 4 до 7,2 не оказывает существенного влияния на количественный переход радиоактивных веществ из продукта в бульон. После проварки мясо промывают чистой водой. Если радиоактивная загрязненность мяса снизилась до предельно допустимого уровня, то мясо выпускают для дальнейшей кулинарной обработки.

Хорошие результаты дает засолка мяса, при которой, кроме естественного распада, значительные количества депонированных радионуклидов переходят в рассол. Засолка производится по обычной методике мокрого посола. Снижение радиоактивности мяса происходит за счет физического распада радионуклидов в процессе посола и за счет перехода радионуклидов в рассол по законам диффузии. Предложен ускоренный

метод дезактивации мяса в полевых условиях, который основан на обработке мяса хлоридом натрия в количестве 2% к массе мяса (дважды с интервалом в 1 час), в результате отмечалось активное сокоотделение. После каждой обработки хлористым натрием мясо обсыпали ржаной мукой для сорбции мясного сока, после этого мясо промывали чистой водой. Отмечалось снижение концентрации радионуклидов в 3,2...3,5 раза.

Замораживание. Мясо, находясь в замороженном состоянии в холодильных камерах, постепенно снижает свою радиоактивность за счет процесса естественного распада радиоактивных веществ. Длительность дезактивации этим способом зависит от периода полураспада радионуклидов, находящихся в мясе.

Разбавление. При наличии радиоактивных веществ выше допустимых величин тушу и органы, имеющие пищевое значение, перерабатывают на колбасы либо на сухой корм и кормовой технический жир. В процессе такой переработки загрязненные мясо и другие продукты убоя разбавляют чистыми мясопродуктами до допустимых величин.

При аэрозольном, пылевом или контактном загрязнении мяса и других продуктов наиболее доступными способами дезактивации являются механическое удаление радионуклидов с поверхности или продуктов путем смывания водой или срезания верхнего слоя.

Смывание радиоактивных веществ струей воды. Тушу или полутушу подвешивают в вертикальном положении и с помощью щеток-душ под умеренным напором воды проводят тщательное обмывание. При ограниченном загрязнении радиоактивные вещества удаляют ветошью, щеткой или пылесосом с последующим обмыванием водой.

Срезание поверхностного слоя. Этот способ дезактивации заключается в механическом удалении верхнего слоя мышц толщиной 0,5...1,0 см путем срезания ножом. Способ очень трудоемкий, к нему прибегают лишь в том случае, если не удастся удалить радиоактивные вещества водой. Разбавление чистыми продуктами.

После дезактивации мясо и все продукты направляют на контрольное радиометрическое исследование и ветеринарно-санитарную экспертизу.

ВЕТЕРИНАРНО-САНИТАРНАЯ ОЦЕНКА МОЛОКА

При внешнем облучении коров гамма-лучами в дозе 650 Р животные погибают через 15...19 суток. Лактация прекращается только за 1...2 дня до гибели. В молоке облученных коров наблюдается сильно прогрессирующее увеличение хлоридов. При острой лучевой болезни тяжелой степени удои резко снижаются и молоко коров как продукт питания ценности не представляет. Если молоко получено до проявления клинических признаков лучевой болезни, его выпускают без ограничений. При наличии клинических признаков заболевания молоко подвергают микробиологическому и санитарно-гигиеническому исследованию.

Молоко от коров с легкой и средней степенью 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. По органолептическим и биохимическим показателям, а также по содержанию жира, белка, лактозы, минеральных веществ и витаминов оно не отличается от молока здоровых животных.

При внутреннем заражении животных уже через час радиоактивные вещества появляются в молоке. При однократном поступлении максимальная концентрация радионуклидов в молоке отмечается в первые сутки. В случае длительного поступления радионуклидов в организм их концентрация в молоке возрастает примерно в течение 9 дней после начала поражения. В последующие дни количество радиоактивных веществ в молоке снижается, несмотря на то что коровы остаются на загрязненном пастбище. После прекращения поступления радиоактивных веществ в организм выделение их с молоком резко уменьшается, особенно в первые 3...4 дня. Через месяц удельная радиоактивность молока снижается против максимальных концентраций в 1000 раз. Всего с молоком выделяется до 1,5% поступивших в организм радионуклидов воздушного атомного взрыва и почти в 10 раз меньше радиоактивных веществ наземного атомного взрыва. Различие в интенсивности выделения молочной железой

отдельных радионуклидов обусловлено в основном их различной всасываемостью в желудочно-кишечном тракте.

В молоке в первые 5 дней после загрязнения пастбищ присутствуют радионуклиды йода, теллура, бария и стронция-89, причем около 80% суммарной радиоактивности молока создают радионуклиды йода. Поэтому при употреблении в пищу свежего молока они будут представлять основную биологическую опасность, главным образом йод-131 с периодом полураспада 8,1 дня. Остальные радионуклиды йода весьма короткоживущие и через 4 дня в молоке их почти нет (йод-132, -134, -135).

В последующие 10...15 дней наряду с уменьшением содержания радионуклидов йода в молоке повышается количество бария, лантана, стронция и церия. Выделение молочной железой в этот период цезия-137 находится примерно на прежнем уровне.

Через 2 месяца после выпадения радиоактивных осадков радионуклидов йода в молоке практически нет. Вслед за радионуклидами йода из молока исчезает барий-140, он выделяется с молоком в 10 раз меньшем количестве, чем стронций-89. Последний не обнаруживают в молоке через 10 месяцев после загрязнения пастбищ. За этот период в молоке неуклонно нарастает количество стронция-90 и цезия-137, причем концентрация цезия всегда выше концентрации стронция. Это превышение связывают с большим выходом цезия-137, чем стронция-90, при делении плутония-239 или урана-235, лучшей всасываемостью цезия в желудочно-кишечном тракте и более интенсивным выведением цезия-137 с молоком.

При однократном пероральном поступлении коровам смеси радиоактивных веществ в течение месяца с молоком выделяется цезия-137 — 7,47%, стронция-90 — 0,88% поступившего количества. Радионуклиды редкоземельных элементов — цирконий-95, ниобий-95, рутений-106 — в молоке не обнаруживаются, причиной чего являются как малый выход этих радиоактивных веществ при делении ядерного горючего, так и их ничтожная всасываемость из желудочно-кишечного тракта.

Основным источником поступления радионуклидов в организм животных в пастбищный период является трава. При пастбищном содержании животных в организм коров посту-

пают значительное количество почвы из верхних, наиболее загрязненных слоев. В организм коровы за пастбищный сезон может поступать до 600 кг почвы. Поэтому в летний пастбищный сезон с молоком выделяется больше радионуклидов, чем в стойловый. Кроме того, более интенсивное выделение радиоактивных веществ с молоком в пастбищный сезон связано с повышением уровня обмена веществ у коров вследствие усиления активных движений животных и преобладания в рационе сочных кормов.

Количество радионуклидов, выводимых с молоком, зависит от кратности поступления. При длительном поступлении радионуклидов в организм коровы с молоком выводится в пять раз меньше радионуклидов, чем при однократном поступлении. От кратности поступления радионуклидов меняется и характер процесса их экскреции с молоком.

При разовом поступлении интенсивность выведения радиоактивных веществ с молоком постепенно снижается. Это происходит потому, что в первую очередь выводятся из организма радионуклиды, которые еще не вошли в прочную связь с тканевыми структурами и находятся в крови. В последующем удаляются главным образом радиоактивные вещества, депонированные органами и тканями и освобождающиеся из них в процессе обмена веществ.

При длительном поступлении радиоактивных веществ, наоборот, в первые дни отмечают не снижение, а возрастание концентрации радиоизотопов в молоке, затем интенсивность их выделения остается на относительно постоянном уровне. После вывода животных с загрязненного пастбища удельная радиоактивность молока начинает заметно уменьшаться.

Выделение радионуклидов с молоком зависит от величины суточного удоя, т. е. от уровня обмена веществ. Чем больше суточный удой, тем выше суммарное количество радиоактивных веществ, выделяемых с молоком. У коров при удое 1...2 л с молоком выделяется — 1,75% йода-131. При удое 3...5 л — 2,35% поступившего количества радионуклида. У высокомолочных коров с суточным удоем выводится на 70...80% больше стронция-90, чем у низкоудойных.

В опытах на коровах установлено, что выведение стронция-90 с молоком при прочих равных условиях зависит от

содержания кальция в корме. При низком содержании кальция (30 г/сутки, при кормлении зеленым овсом) с молоком выделялось 3%, а при высоком содержании кальция (70 г/сутки, при кормлении зеленой викой) лишь 1,76% от ежедневно вводимой дозы.

Несмотря на то что с повышением продуктивности животных увеличивается суммарное количество радиоактивных веществ, выводимых с суточным удоем, их концентрация в 1 л молока уменьшается. Поэтому удельная радиоактивность молока высокоудойных животных всегда ниже активности молока низкопродуктивных коров. Так, при скармливании животным сочных кормов, загрязненных стронцием-90, за сутки с молоком высокоудойных коров выводится на 70...80% больше стронция-90, чем у низкоудойных, но концентрация стронция-90 в 1 л молока низкоудойных коров на 20...30% выше, чем у высокопродуктивных животных.

Видовые различия в выведении радиоактивных веществ с молоком, по-видимому, связаны с величиной суточного удоя. Концентрация радионуклидов, в том числе таких, как йод-131, стронций-90 и цезий-137, в козьем молоке примерно в 10 раз выше, чем в коровьем.

Существенное влияние на экскрецию радиоактивных веществ молочной железой оказывает стадия лактации. Суммарное выведение радиоактивных веществ с суточным удоем, начиная от молозивной стадии, где оно является наибольшим, на протяжении всего лактационного периода постепенно снижается и достигает наименьшего значения в последний месяц лактации.

Уровень выделения радионуклидов молочной железой у стельных коров в несколько раз меньше, чем у яловых. Отмечена связь экскреции радиоактивных веществ со стадией стельности: чем меньше срок стельности, тем относительно больше радионуклидов выделяется с молоком. Это объясняется тем, что в последнюю треть стельности происходит постепенное снижение функциональной деятельности молочной железы. В то же время наблюдается интенсивный рост плода, вследствие чего большая часть питательных веществ (а с ними и радиоактивных веществ), ранее использовавшихся для продуцирования молока, направляется на развитие эмбриона.

Таким образом, молоко, как и мясо, может стать источником поступления радионуклидов в организм людей. Особенно опасно употребление в пищу молока в первые дни после выпадения радиоактивных осадков. Основным радиационный фактор, определяющий характер защитных мероприятий, связан с наличием в выпадениях радионуклидов йода (период йодной опасности).

Ветеринарно-санитарная оценка молока животных, находившихся на загрязненной радионуклидами местности, производится не только по общепринятым санитарно-гигиеническим показателям и действующим правилам ветеринарно-санитарной экспертизы, но и по результатам радиометрического исследования молока.

Молоко животных, подвергшихся воздействию радиоактивных веществ, но не имеющих клинических признаков радиационного поражения, используют без ограничений, если оно удовлетворяет общепринятым санитарно-гигиеническим требованиям и его удельная радиоактивность, по данным радиометрии, равна или ниже допустимого уровня.

Если удельная радиоактивность молока превышает допустимый уровень, то молоко консервируют или направляют на промышленную переработку, после чего консервированное молоко (замороженное, сухое, сгущенное) и молочные продукты (при необходимости) хранят.

Эффективным способом дезактивации цельного молока при загрязнении долгоживущими радионуклидами является его очистка ионообменными смолами и другими ионитами или изготовление продуктов, подлежащих длительному хранению (масло, сыры и т. п.).

В случае развития клинических признаков радиационного поражения молочная продуктивность животных снижается, и вследствие ослабления резистентности организма возможно более сильное, чем обычно, обсеменение молока условно патогенной микрофлорой, в том числе бактериями паратифозной группы и даже патогенными микробами. Поэтому ветеринарно-санитарную экспертизу молока больных лучевой болезнью животных производят с учетом данных радиометрического, микробиологического и санитарно-гигиенического исследований.

Если молоко имеет санитарно-гигиенические показатели, удовлетворяющие стандартам и правилам ветеринарно-санитарной экспертизы, а его удельная радиоактивность равна или ниже допустимого уровня, вопрос об его использовании решают в зависимости от результатов микробиологического исследования.

Если радиоактивная загрязненность молока выше допустимого уровня, то молоко консервируют с последующим хранением для спада радиоактивности или направляют на переработку, после чего молочные продукты, в зависимости от результатов радиометрии, либо используют по назначению, либо хранят. При обнаружении в молоке патогенных микробов и бактерий паратифозной группы его в пищу не допускают, а подвергают обезвреживанию и промышленной переработке в соответствии с порядком, предусмотренным ветеринарно-санитарной экспертизой при данном возбудителе.

При структурном загрязнении молока стронцием-90 и -89, цезием-137, йодом-131 лучшим способом дезактивации молока является его сепарирование. При заводском способе переработки коровьего молока, сдвоенного в ближайшие сроки после радиоактивного загрязнения пастбищ, радиоактивные вещества переходят в молочные продукты по-разному: в масло сливочное — 2%, пахту — 12%, творог — 21% и сыворотку — 64% радиоактивности, содержащейся в молоке.

При хранении консервированного молока и молочных продуктов удельная радиоактивность снижается по-разному. Наиболее быстрое уменьшение радиоактивности отмечают в молоке и молочных продуктах удоев первых дней после выпадения местных осадков, когда в молоке содержится большое количество короткоживущих радионуклидов йода (в первую очередь йода-132).

Загрязнение цельного молока и молочных продуктов радиоактивными аэрозолями при транспортировке и хранении, а также при использовании загрязненной радиоактивными веществами тары и оборудования (контактный способ) маловероятно, но не исключается.

В этом случае ветеринарно-санитарную оценку загрязненных радиоактивными веществами молока и молочных про-

дуктов проводят обычным способом, с учетом данных радиометрии.

Отбору проб молока, сливок, сметаны, находящихся в крупных емкостях (цистернах), должно предшествовать измерение уровней их радиоактивного загрязнения путем погружения в предварительно перемешанные жидкие продукты датчика дозиметрического прибора. Объем пробы должен быть не менее 0,2 л.

Сливочное масло (без тары и в таре, не обеспечившей достаточную герметичность), а также сыры, подвергшиеся радиоактивному аэрозольному загрязнению, подлежат предварительному дозиметрическому контролю. После этого отбирают пробы для радиометрии из поверхностного слоя наиболее загрязненных участков продукта в количестве 100 г.

Отбор проб сливочного масла и сыров, полученных из исходных продуктов со значительной удельной радиоактивностью или загрязненных радиоактивными веществами при изготовлении, проводят из различных мест и слоев продукта, весом 100...150 г.

При удовлетворительных санитарно-гигиенических показателях молоко, сливки, сметану, в зависимости от степени радиоактивной загрязненности, выпускают без ограничений или запрещают к употреблению и направляют на консервирование, переработку, хранение.

При аэрозольном загрязнении радиоактивными веществами выше допустимого уровня сливочное масло и сыры дезактивируют, снимая наружный слой загрязненной поверхности продукта на 2...3 мм.

Если удельная радиоактивность сливочного масла и сыров, изготовленных из загрязненных исходных продуктов, выше допустимого уровня, их к использованию запрещают и хранят до спада радиоактивности до допустимого уровня.

ВЕТЕРИНАРНО-САНИТАРНАЯ ОЦЕНКА ЯИЦ КУР

При внешнем облучении кур ветеринарно-санитарную оценку яиц проводят по общепринятым методам. При поступлении внутрь суммарное количество радиоактивных веществ, выводимых из организма птицы с яйцами, весьма

невелико (сотые доли процента от дозы, поступившей в организм курицы). Распределяются радиоактивные вещества среди отдельных частей яйца неравномерно. Независимо от возраста радиоактивных продуктов деления основная радиоактивность сосредоточена в скорлупе (иттрий, церий, лантан), в белок наиболее интенсивно включается цезий. В желтке наиболее интенсивно накапливается йод-131, концентрация его в 20...50 раз больше, чем в белке и скорлупе. Кроме того, желток содержит небольшое количество стронция и цезия.

Как показали радиометрические исследования различных продуктов животного происхождения после аварии ядерного реактора в Уиндскейле (Англия, 1957), когда в окружающую среду попало 20000 Ки йода-131, 600 Ки цезия-137, 80 Ки стронция-89 и 9 Ки стронция-90, яйца (после молока) были одним из главных источников поступления йода-131 в организм людей.

Установлено, что при длительном введении курицам-несушкам с кормом йода-131 радиоактивность яиц увеличивается в течение 7 дней и, достигнув максимального содержания (8% ежедневной дозы), остается на одном уровне. Наибольшая часть радиоактивного йода содержится в желтке.

В яйцах, снесенных курами после однократной затравки цезием-137, его концентрация в белке выше, чем в желтке, в 2...3 раза.

Стронций-90 накапливается в различных частях яйца неодинаково. Концентрация его в скорлупе зависит от степени загрязненности корма стронцием-90 и периода яйцекладки. При хронической затравке кур в яйцо переходит 40...60% стронция-90 от суточного поступления, причем больше его переходит при меньшей яйцекладке. Основное количество стронция-90 находится в скорлупе (97%) и лишь около 3% в меланже. В последнем стронций-90 распределяется неравномерно (90% в желтке и 10% в белке).

При продолжительном поступлении в организм кур стронция-90 концентрация его в скорлупе яиц была в 445 раз, а в желтке только в 3 раза больше, чем в белке.

Наблюдается прямая зависимость удельной радиоактивности скорлупы от концентрации стронция-90 в кормах: чем

выше в них количество радиоизотопа, тем больше он включается в скорлупу.

Изменение удельной радиоактивности скорлупы обуславливается также периодом яйцекладки: при интенсивной яйценоскости в весенне-летний период концентрация стронция в скорлупе повышается, а затем медленно снижается. Это связывают с тем, что в период интенсивной яйцекладки, с одной стороны, происходит усиленная отдача кальция (а с ним и стронция) из костей, а с другой — поступающий с кормом радионуклид переходит сразу в скорлупу, не задерживаясь в организме кур.

Ветеринарно-санитарную экспертизу яиц кур, подвергшихся воздействию радиоактивных веществ, проводят в соответствии с действующими правилами (органолептическое исследование, овоскопия), но обязательно учитывают результаты радиометрического исследования.

При радиометрии яиц скорлупу исследуют отдельно от съедобной части. Радиационно-гигиеническую оценку яиц дают после сравнения удельной радиоактивности смеси желтка и белка с допустимым уровнем.

Свежие, бездефектные яйца кур, подвергшихся воздействию радиоактивных веществ, выпускают беспрепятственно, если они получены из благополучной по заразным болезням птиц местности, удовлетворяют требованиям стандарта и правилам ветеринарно-санитарной экспертизы яиц, а их удельная радиоактивность равна или ниже допустимого уровня.

Если яйца имеют удельную радиоактивность, равную или ниже допустимого уровня, но получены из неблагополучных по инфекционным болезням птиц хозяйств или признаны неполноценными (с дефектами), то их разрешают к использованию, руководствуясь действующими правилами ветеринарно-санитарной экспертизы яиц.

Яйца с удельной радиоактивностью выше допустимого уровня хранят, учитывая, что спад радиоактивности белка, и особенно желтка, происходит значительно быстрее, чем скорлупы.

Вместе со структурным радиоактивным загрязнением яиц отмечают значительную наружную загрязненность скорлупы. Это вполне закономерно, так как основная масса

радиоактивных веществ, поступивших внутрь, выводится у кур-несушек через желудочно-кишечный тракт и с яйцом, которое, проходя клоаку, безусловно, снаружи загрязняется. Наружная радиоактивная загрязненность скорлупы, превышающая в несколько раз радиоактивность яйца, относительно легко удаляется при гигиенической мойке горячей водой с мылом, которую надо проводить под дозиметрическим контролем.

Контрольные вопросы

1. Какой порядок предубойного осмотра и сортировки животных при радиационных поражениях?
2. В какие сроки после радиационного поражения животных наиболее целесообразно проводить их убой?
3. Какова причина неодинаковой радиотоксичности радионуклидов при внешнем и внутреннем поражении животных?
4. Порядок ветеринарно-санитарной оценки мяса при внешнем и внутреннем радиационном поражении животных.
5. Какие методы дезактивации мяса и молока применяют при радиационных поражениях животных?
6. Порядок ветеринарно-санитарной оценки молока при радиационных поражениях животных.
7. Какие патологоанатомические изменения наиболее характерны при ветсаноценке туш и органов животных, убитых в начальный и скрытый период лучевой болезни?
8. По каким основным показателям проводится ветсаноценка яиц кур при внешнем и внутреннем радиационном поражении?



ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ И РАДИАЦИОННОЙ БИОТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И ВЕТЕРИНАРИИ

Использование в сельском хозяйстве достижений атомной науки и техники, радиобиологии является одним из новых, но уже ставших реальностью факторов интенсификации сельскохозяйственного производства. Достаточно сказать, что развитие фундаментальных радиобиологических исследований практически способствовало созданию научных основ управления жизнедеятельностью растительного и животного организма с помощью ионизирующего излучения; это, в свою очередь, явилось фундаментом для развития принципиально нового вида технологии — радиационно-биологической технологии, которая используется в медицине, сельском и рыбном хозяйстве, соответствующих отраслях промышленности, при охране окружающей среды.

Применение современных достижений атомной науки и техники в животноводстве и ветеринарии, а также в других отраслях сельского хозяйства развивается в следующих направлениях.

1. Радионуклиды применяют как индикаторы (меченые атомы) в исследовательских работах в области физиологии и биохимии животных и растений, а также в разработке методов диагностики и лечения заболевших животных.

2. Ионизирующее излучение используют как процесс радиационно-биологической технологии (РБТ), в том числе:

а) мутагенное действие ионизирующего излучения применяют в селекционно-генетических исследованиях в области растениеводства, животноводства, микробиологии и вирусологии;

б) стимулирующее действие радиации используют для радиационной стимуляции растений с целью ускорения их развития и повышения урожайности, повышения хозяйственно полезных качеств птиц, радиационной стимуляции животных с целью повышения их выживаемости, ускорения роста, увеличения массы тела и улучшения качества продукции;

в) ионизирующее излучение используют при производстве кормов и кормовых добавок для сельскохозяйственных животных;

г) бактерицидное или летальное действие ионизирующих излучений применяют для радиационной стерилизации ветеринарных принадлежностей, бактериальных препаратов, получения радиовакцин, радиационного обеззараживания навоза и навозных стоков животноводческих, птицеводческих и звероводческих комплексов, а также сырья животного происхождения при инфекционных заболеваниях, радиационной стерилизации сельскохозяйственных животных и насекомых-вредителей, продления сроков хранения продукции животноводства и растениеводства.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В КАЧЕСТВЕ ИНДИКАТОРОВ (МЕЧЕННЫХ АТОМОВ)

В биологии, биохимии и физиологии при проведении исследований на молекулярном уровне широко используют радиоактивные изотопы. С их помощью изучают перемещения тел субмикроскопически малых размеров, а также отдельных молекул, атомов, ионов среди себе подобных в организме без нарушения его нормальной жизнедеятельности. Предложено несколько методов исследования.

Радиоиндикационный метод (метод меченых атомов). Основан на использовании химических соединений, в структуру которых включены в качестве метки радиоактивные элементы. В биологических исследованиях обычно применяют радиоактивные изотопы элементов, входящих в состав организма и участвующих в обмене веществ: ^3H , ^{14}C , ^{24}Na , ^{32}P , ^{35}S , ^{42}K , ^{45}Ca , ^{51}Cr , ^{59}Fe , ^{125}I , ^{131}I и др. Введенные в организм радионуклиды ведут себя в биологических системах так

же, как их стабильные изотопы. Это обстоятельство позволяет проследить судьбу не только радиоактивных изотопов, но и различных меченых органических и неорганических соединений и контролировать превращение их в процессе обмена. Радионуклидный метод принадлежит к числу самых мощных инструментов научного исследования. Без преувеличения можно сказать, что применение радионуклидов сделало революцию в науке.

Особая чувствительность и сравнительная простота измерений радиоактивности позволяют обнаруживать чрезвычайно малые количества меченого соединения в пробе. Например, одна миллионная миллиграмма натрия в организме может быть обнаружена.

Применение метода радиоактивных индикаторов в изучении различных биохимических и физиологических процессов позволило описывать их на языке формул и математических уравнений, т. е. перейти от качественного описания процессов к их точному количественному выражению.

Контроль за распределением и депонированием радионуклидов в различных органах может осуществляться внешней радиометрией подопытных животных (например, регистрация гамма-излучения в щитовидной железе) или соответственно подготовленных биоматериалов (кровь, ткань органов, моча, кал и др.). Широко применяют для этих целей метод автордиографии.

Автордиография (радиоавтография) — метод получения фотографических изображений в результате действия на фотоэмульсию излучений радиоактивных элементов, находящихся в исследуемом объекте. Впервые для изучения животных организмов автордиографию применил В. С. Лондон в 1904 г. К настоящему времени методика автордиографии значительно усовершенствована, и с ее помощью достигнуты большие успехи в изучении обменных процессов, а также в исследовании распределения и локализации радиоактивных веществ в клетках и тканях животных и растений.

Автордиографию делят на макроавтордиографию и микроавтордиографию. Макроавтордиография (контактная, контрастная) дает картину распределения радиоактивных изотопов в макроструктурах биологического объекта

(количественную оценку концентрации радиоизотопа), по которой можно судить о характере обмена и органотропности радионуклида. Микроавторадиография (гисто-авторадиография) позволяет изучать внутриклеточную локализацию радиоактивного вещества, а также клеточные структуры и сложные биохимические процессы в них (синтез белков, ферментов и т. д.).

Сущность метода авторадиографических исследований сводится к следующему: предварительному введению подопытному животному того или иного количества радиоактивного изотопа; взятию у него тех или иных органов и изготовлению из них препаратов (гистосрезы, шлифы, мазки крови и т. д.) для авторадиографии; созданию в течение определенного времени тесного контакта между изготовленным препаратом, содержащим радиоактивный элемент, и фотоэмульсией; проявлению и фиксации фотоматериала, как это делается в обычной фотографии.

В качестве фотоматериала для макрорадиоавтографии используют высокочувствительные рентгеновские и фотографические пленки, для гисторадиографии — специальные жидкие и съёмные ядерные эмульсии (типа Р, К, МР и др.), которыми покрывают исследуемые гистологические препараты.

Радиоавтографы представляют собой скопление черных зерен восстановленного серебра фотоэмульсии, указывающее на местоположение радиоактивного вещества в исследуемом материале.

Макрорадиоавтографы анализируют визуально, а при количественной оценке на радиоактивность проводят денситометрию оптической плотности почернения фотоэмульсии радиоавтограмм в сравнении с плотностью почернения фотоэмульсии от эталонного источника излучения известной радиоактивности.

Гисторадиоавтографы изучают под микроскопом одновременно с гистологическим препаратом. При количественной оценке их подсчитывают зерна восстановленного серебра или треки альфа- или бета-частиц в эмульсии под большим увеличением микроскопа с помощью окуляра-микромера с сеткой.

Радиоавтографический метод в биологических исследованиях имеет ряд преимуществ перед другими в том, что фо-

тографическая эмульсия, сохраняя постоянные свойства в течение нескольких месяцев, способна непрерывно регистрировать радиоактивные распады очень малых количеств радиоактивного вещества, улавливая суммарное число распадов за время экспозиции. Это позволяет уменьшить дозы вводимых радионуклидов в исследуемый организм и тем самым не нарушать естественный ход биохимических и обменных процессов в нем. Кроме того, радиоавтографы, подобно рентгенограммам, служат наглядным объективным документом проводимых исследований.

А. Д. Белов разработал методику «двойных радиоавтографов», которая, в отличие от существующих методик, позволяет получить отдельно радиоавтограммы от двух радиоактивных изотопов, одновременно находящихся в одном и том же исследуемом объекте. Эта методика основана на учете различия энергии излучения и продолжительности «жизни» изотопов. Так, при изучении фосфорно-кальциевого обмена в костях с помощью ^{32}P и ^{45}Ca можно получить отдельно радиоавтографы на указанные изотопы при одновременном их введении подопытному животному. Учитывая сравнительно высокую энергию излучения и малый период полураспада ^{32}P , получают вначале радиоавтограф на данный элемент. Для этого между исследуемым объектом и фотоэмульсией помещают фильтр, поглощающий мягкое бета-излучение ^{45}Ca . Радиоавтограф на ^{45}Ca получают после распада ^{32}P .

Методика «двойных радиоавтографов» позволяет не только вдвое экономнее использовать подопытных животных, но и получать более достоверные данные, так как появляется возможность сравнивать на одном и том же животном накопление и распределение сразу двух меченых веществ и избегать затруднений, возникающих при сопоставлении таких показателей, полученных от разных животных. С помощью методики «двойной радиоавтографии» изучена динамика белково-минерального обмена в костной ткани животных разных видов (собаки, овцы, свиньи, телята) в норме, при заживлении переломов, при различных способах остеосинтеза и стимуляции остеогенеза в сопоставлении с рентгеноморфологической картиной и гистохимической активностью щелочной и кислой фосфатаз в костях. Установлено, что белковый

и фосфорно-кальциевый обмена в костях в норме и при переломах находятся в прямой зависимости между собой и с ферментативной активностью щелочной и кислой фосфатаз. С наибольшей интенсивностью белковый и фосфорно-кальциевый обмена протекают в тех участках костного органа (периост, эндоост, костный мозг, стенки гаверсовых каналов и губчатая часть эпифизов, а также тканей костной мозоли), где сильнее проявляются энзиматическая активность фосфатаз, рост, развитие и перестройка костной ткани.

С помощью гамма-излучающих радиоизотопов ^{24}Na , ^{131}I , ^{42}K и др., введенных в организм путем наружной прижизненной радиометрии, получены принципиально новые данные измерения скорости кровотока, массы крови, функционального состояния щитовидной железы и других органов и систем животных.

Для прижизненного изучения обмена веществ в различных органах и тканях с помощью бета-излучающих изотопов, обладающих слабой проникающей способностью, А. Д. Белов (1968) предложил методику экспериментальных исследований с предварительным вживлением малогабаритных радиометрических датчиков СБИ-9. В последующем эта методика была дополнена одновременным вживлением терморегистрирующих датчиков (микротермистеров) для синхронного прижизненного изучения обмена веществ и температурной реакции в условиях хронического опыта. Применение радиотермометрического метода исследования позволило установить скорость течения обменной и температурной реакций в печени, костях, мышцах и других органах, а также выявить коррелятивные их изменения в норме и при костной патологии у животных разных видов. При синхронном исследовании различных физических, химических и физиологических процессов выявляются те взаимосвязи явлений, обнаруживаются те коррелятивные взаимодействия процессов, о необходимости которых говорил И. П. Павлов как о задаче «синтетической физиологии». Следовательно, метод радиоактивных индикаторов открыл необозримые перспективы для прижизненного исследования обмена веществ — своего рода витальной биохимии.

Важным достижением современной биохимии, полученным с помощью радиоактивных веществ, можно считать

представление о постоянном динамическом состоянии обменных процессов в живом организме, о взаимопревращаемости многих веществ, о непрерывном распаде и ресинтезе, непрерывном обновлении химических соединений живых клеток, происходящем даже при состоянии равновесия обменных процессов. Белки, нуклеопротеиды, хромопротеиды, жиры, углеводы, минеральные соединения находятся в состоянии постоянного распада и синтеза. Характер обмена, направленность его часто зависят от преобладания процессов синтеза или распада. Так, при изучении злокачественных опухолей было выяснено, что рост их обусловлен не усиленным синтезом, а задержкой распада белковых веществ опухоли. Благодаря радиоизотопным индикаторам удалось определить скорость обновления различных составных частей и органов. Доказано, что белки мышц заменяются медленнее других, а белки печени, плазмы крови, особенно слизистой оболочки кишечника, обладают большой скоростью обновления. Были получены также прямые доказательства обмена между белками мышц, плазмы, печени и других органов.

В сочетании с другими методами исследования радиоизотопные методы сыграли огромную роль в развитии молекулярной биологии и позволили вплотную подойти к решению многих важных проблем биологии. К ним, в частности, относятся механизмы накопления и использования энергии в живых организмах, пути биосинтеза белков, биологического фотосинтеза, сокращения мышц, нервного возбуждения, размножения и наследственности.

С помощью многих химических соединений, меченных радиоактивными изотопами (меченые аминокислоты, жирные кислоты, нуклеотиды, глюкоза, фосфатиды, минеральные соли), удалось выяснить такие важные вопросы, как влияние веществ кормового рациона на продуктивность животных, вопросы промежуточного обмена и взаимопревращаемости соединений, пути распада и синтеза химических веществ в живом организме животного, определить строение химических соединений и пр. Была доказана взаимопревращаемость пальмитиновой и стеариновой кислот, установлено превращение орнитина в аргинин, фенилаланина в тирозин, образование креатина за счет метильных групп, синтезированных

из метионина или холина, создание глицина из аргинина (при распаде белков и амидина), адреналина из фенилаланина, углеродной цепочки цистина из серина, возникновение фосфолипидов печени из фосфатов плазмы крови и пр.

Радиоиндикационный метод позволил выяснить особенности обмена и синтетической роли микрофлоры рубца и других отделов желудочно-кишечного тракта жвачных животных, которые не могли быть определены другими методами. Большой интерес представляет установление возможности синтеза аминокислот из аммиака, кето- и оксикислот в рубце жвачных и снабжение такими соединениями организма, в частности молочной железы, в связи с образованием ею молока. Наряду с этим удалось изучить еще одну интересную область обменных процессов в организме животного — роль пищеварительного тракта и пищеварительных желез в круговороте веществ в системах: кровь — стенки пищеварительного тракта, пищеварительные железы — содержимое пищеварительного канала. При определении всасывания (так называемой переваримости) были найдены пути устранения ошибок, вносимых эндогенными факторами — постоянным примешиванием к содержимому кишечника веществ, выделяемых пищеварительными железами и желчью.

Изучение обмена веществ в организме путем применения метода радиоизотопной индикации подтвердило положение об обратимости многих процессов промежуточного обмена, о возможной изменчивости путей промежуточного обмена при различных физических состояниях организма и при изменении условий внешней среды. Лабильность внутренних сред и процессов обмена служит основой приспособления организма к меняющейся внешней среде. Радиоизотопные индикаторы дают возможность улавливать приспособительные изменения обмена веществ в животном организме и открывают в этом отношении новые перспективы.

Радиоактивные изотопы позволили изучить обмен макро- и микроэлементов без введения в рацион избытка веществ, без нарушения естественного содержания изучаемых веществ в организме. В результате удалось достоверно установить быстроту накопления минеральных веществ в различных органах и тканях и выведения их из организма, а также иссле-

довать химические соединения, в которых фиксируется элемент в процессе переноса его или локализации. Другой важный результат применения радиоактивных изотопов при изучении минерального обмена — установление скорости обновления минерального состава органов и некоторых соединений костной ткани. К настоящему времени получено много данных по обмену и накоплению в тканях радиоактивных изотопов таких элементов, как кальций, фосфор, кобальт, медь, цинк, марганец, бериллий, барий, стронций, йод и др. Общий результат этих исследований подтверждает, что проникновение в отдельные ткани минеральных веществ, например микроэлементов, управляется не просто закономерностями диффузии, но прежде всего клеточным обменом, связанным со специфическими химическими процессами в клетке, зависящими от действия ферментов.

Метод радиоизотопной индикации при исследовании обмена минеральных веществ позволил проникнуть в процессы промежуточного обмена, совершающегося с участием минеральных веществ, в том числе микроэлементов (^{131}I , ^{60}Co , ^{64}Cu и др.).

Со времени внедрения в биологию и медицину электрофоретического метода для разделения белков сыворотки крови человека и животных накопилось много данных, указывающих на неспецифическую реакцию в сдвигах белковой формулы при различных состояниях организма. Однако те или иные количественные изменения в белках сыворотки крови по-разному интерпретируются различными авторами. Это обусловлено тем, что один метод электрофоретического разделения белков позволяет установить лишь количественные сдвиги в белковой формуле, но он не в состоянии вскрыть интимные стороны динамики белкового обмена, роли и значения различных белковых фракций, интенсивность их синтеза и распада при том или ином заболевании. С помощью радиоактивных изотопов стало возможным проследить указанные процессы. Для этого А. Д. Белов предложил методику количественной автордиографии белков сыворотки крови, подвергнутых электрофорезу (методика автордиоэлектрофореза), а также принцип математической обработки радиоавтограмм для определения скорости биосинтеза и распада белков и их

функциональной способности. Для определения синтеза белков применяют меченые аминокислоты (^{35}S -метионин, ^{14}C -глицин и др.), а функциональной способности — ^{32}P , ^{45}Ca и др. Эта методика позволила получить не только наглядный документ (радиоавтограмму), характеризующий интенсивность включения меченых веществ в ту или иную белковую фракцию, но и количественно оценить по показателям относительной удельной активности биосинтез, распад и функциональную способность каждой белковой фракции, расшифровать интимные стороны механизма количественных сдвигов в белковой формуле сыворотки крови у животных в норме и при костной патологии.

С помощью ^{51}Cr , включенного в молекулу гемоглобина, и ^{75}Se в составе метионина был определен срок жизни эритроцитов в периферической крови различных сельскохозяйственных животных.

Радиоактивный изотоп ^{32}P был применен для выявления темпов созревания спермиев, сроков перемещения их по половым путям самцов и изменения этих сроков при различной половой нарузке.

Самые разнообразные вопросы биологии, физиологии, динамической биохимии и экологии микроорганизмов могут быть решены методом радиоактивных индикаторов. Включение меченых соединений в микробную клетку происходит в результате активного вовлечения их в обмен веществ при культивировании микробов в питательной среде, содержащей радионуклиды. Микробы можно пометить двойной меткой, например ^{32}P и ^{35}S . Они усваивают радионуклиды и, размножаясь, передают их потомству. Меченую патогенную культуру вводят животным, которых убивают через определенные интервалы времени, и радиометрически выявляют скорость и пути распространения микробов в организме по удельной активности его органов. Таким образом можно проследить судьбу патогенных микробов и вакцин в организме подопытных животных.

Можно пометить и вирусы, вводя в тканевые культуры и другие питательные среды растворы радиоактивных изотопов ^{32}P , ^{35}S -метионин, ^{35}S -цистин, ^{14}C -глицин и др. Радиоактивная метка активно включается в компоненты вируса в

процессе его размножения. Надо заметить, что ^{32}P включается в РНК и фосфолипиды вируса, а меченые аминокислоты — в его белковую оболочку.

Метод радиоактивных индикаторов нашел применение в энтомологии при изучении путей и скорости миграции, мест резервации мух, комаров, клещей и других насекомых — переносчиков патогенных микроорганизмов и эффективности предпринимаемых мер борьбы с ними, а также при прослеживании перехода инсектицидов в насекомых. Организмы метят путем введения радиоизотопа внутрь с пищей или же путем выращивания их на соответствующих средах, содержащих радиоизотопы. Выбор радиоактивного индикатора зависит от задачи исследования.

Нейтронно-активационный анализ. Это высокочувствительный метод определения ультрамикрочисел стабильных изотопов в различных биологических материалах (кровь, лимфа, ткани различных органов и т. д.). Он заключается в том, что исследуемый материал подвергают воздействию потока нейтронов в условиях ядерного реактора. В результате образуются радиоактивные продукты (продукты активации), которые затем подвергают радиохимическому анализу и радиометрии. Данный метод заслуживает внимания для определения пестицидов в продуктах сельскохозяйственного производства и животноводства, так как допустимый уровень их настолько низок, что обычные методы исследований неприемлемы.

Методы *in vitro* радиоизотопных исследований. В последние десятилетия в биологии, медицине и ветеринарии получили развитие разработки методов *in vitro* радиоизотопных исследований и диагностики заболеваний человека и животных, при которых радионуклиды не вводят в организм и тем самым исключают лучевую нагрузку на организм обследуемого и радиоактивное загрязнение внешней среды. Это обстоятельство значительно расширило возможность применения радиоиндикационных методов в медицинской и ветеринарной лабораторно-клинической практике. Методы *in vitro* нашли широкое применение в эндокринологии и иммунологии, микробиологии, вирусологии, фармакологии и др.

Радиоиммунологический метод анализа (РИА). Метод создан Ylow, Berson в 1959 г. Позволяет быстро и надежно

определять содержание гормонов, ферментов, рецепторных белков в биологических жидкостях и тканевых экстрактах, а также лекарственных препаратов, различных органических соединений, которые прежде либо вообще не удавалось определять, либо для их анализа использовали весьма трудоемкие методы, не отличающиеся ни достаточной точностью, ни чувствительностью. Практически РИА позволяет определять любое вещество в ничтожно малых количествах (нанограммах и пикограммах), к которому могут быть получены специфические антитела или конкурирующий носитель.

В радиоиммунологическом анализе сочетается специфичность, свойственная реакциям антиген — антитело, с чувствительностью и простотой, которые дает применение радиоактивной метки. Для проведения РИА необходимо иметь соответствующие антисыворотки и меченные радиоактивной меткой антигены. Функцию метки антигенов выполняет радиоактивный изотоп — обычно ^{125}I или ^3H . Эту метку используют затем для обнаружения присутствия связанного комплекса.

Принцип РИА не ограничивается иммунными системами. Его можно применять и для других систем, в которых вместо специфического антитела будет действовать специфический реагент или связывающее вещество (специфические плазменные белки, например тиреоглобулин, кортикотропин, инсулин, связывающий белок и другие, энзим или рецепторный участок ткани).

При проведении РИА гормонов и других биологически важных соединений используют готовые стандартные коммерческие наборы реагентов (kit), выпускаемые многими зарубежными фирмами и отечественной промышленностью. Обширные исследования с применением РИА были проведены сотрудниками кафедры радиобиологии Московской ветеринарной академии (МВА) по изучению гормонального статуса у крупного рогатого скота в зависимости от физиологического состояния и продуктивности животного, сезона года и при лейкозе, а также при лучевой патологии у овец. Так, А. Д. Белов, Е. А. Нежикова (1986) установили динамику гонадотропных гормонов гипофиза — лютеинизирующего гормона (ЛГ) и фолликулостимулирующего гормона (ФСГ) в сы-

воротке крови коров по месяцам стельности и сезонам года. Выявлено влияние уровня этих гормонов на физиологическое состояние животных и на их продуктивность.

На основании комплексного определения ЛГ, эстрадиола и прогестерона в сыворотке крови коров с нормальным половым циклом установлена закономерность: максимальное содержание ЛГ и эстрадиола наблюдается в предовуляторный период, а прогестерона — во время наивысшего развития желтого тела с десятикратным превышением уровня его в фолликулиновую фазу (А. Д. Белов, И. М. Разорвина, Шанова, 1983). У бесплодных коров выявлены серьезные нарушения гормональных взаимоотношений в организме. У коров с фолликулярными кистами яичников повышалась базальная секреция ЛГ и эстрадиола и отсутствовал подъем указанных гормонов в предовуляторный период. Выявлено низкое содержание прогестерона в лютеиновой фазе цикла, что позволило сделать вывод о том, что в кистозном яичнике не происходит овуляции фолликулов.

Таким образом, периодическое исследование гормонов в крови радиоиммунологическим методом позволяет контролировать нормальное течение полового цикла, своевременно выявлять нарушения воспроизводительной способности, обоснованно применять гормональные препараты для восстановления половой функции, а также определять оптимальное время для искусственного осеменения животных.

Интересные данные были получены в той же лаборатории методом РИА по определению прогестерона в молоке и сыворотке крови коров (А. Д. Белов, Косенко, И. М. Разорвина, 1983). Установлено, что динамика прогестерона и концентрация его в молоке коррелируют с содержанием его в сыворотке крови. Концентрация прогестерона в молоке в начале полового цикла (1...3-й день) оказывается невысокой; к 12-му дню количество его постепенно возрастает и удерживается на высоком уровне до 18-го дня цикла, а затем быстро падает до начальных величин.

В случае оплодотворения уровень прогестерона остается высоким. В период беременности концентрация гормона возрастает в 2 раза по сравнению со стадией уравнивания полового цикла, достигая 14 нг/мл в крови и 30...50 нг/мл

в молоке. Следовательно, по уровню содержания прогестерона в крови или молоке можно контролировать оплодотворяемость животных в ранние сроки после осеменения, тогда как ректальным исследованием это удастся сделать лишь на 2...3-м месяце беременности.

Большие перспективы имеет использование РИА с целью прогнозирования молочной и мясной продуктивности животных. Так, И. М. Разорвина (1983) методом РИА установила динамику инсулина, тироксина и индекса эффективного тироксина в крови здоровых коров на протяжении лактации, а также выявила коррелятивные связи между уровнем этих гормонов у коров и их молочной продуктивностью. Выявлена обратная зависимость между концентрацией инсулина и тиреоидных гормонов в крови коров и уровнем их среднесуточного удоя.

Учитывая влияние гормонов на течение опухолевых процессов, представляется перспективным определение их уровня при изучении патогенеза гемобластозов крупного рогатого скота, которые наносят значительный экономический ущерб животноводству. А. Д. Беловым, Л. В. Рогожиной (1983–1986) проведены в этом направлении радиоиммунологические исследования. Они показали, что в зависимости от формы и стадии гемобластозов проявляется различный механизм нарушений эндокринной системы. Так, у коров при остром лимфолейкозе уменьшается содержание тироксина и инсулина в крови, что характеризует гипофункциональное состояние щитовидной и поджелудочной желез. В начальной стадии хронического лимфолейкоза снижается секреция тироксина, но метаболизм гормонов в тканях и процессы дейодирования (образование трийодтиронина из тироксина) не нарушаются, что отражает компенсаторные возможности организма.

На второй стадии развития лейкозного процесса усиливается функционирование щитовидной железы, вызванное самим патологическим процессом, а также возникает гипофункция поджелудочной железы. В некоторых случаях (алеийемическое течение болезни) функциональные изменения желез внутренней секреции выявляются раньше, чем выраженные поражения кроветворной системы и крови.

При лимфоцитарной лимфосаркоме наряду с изменениями в системе крови снижается уровень гормонов в лимфе, свидетельствующий о нарушении метаболизма их в тканях. Установленные изменения в секреции гормонов у больных животных могут быть использованы для оценки и прогнозирования тяжести заболевания. Радиоиммунологическое определение гормонального статуса позволит эффективно и своевременно выявлять больных животных и научно обоснованно подойти к профилактике и противолейкозным мероприятиям.

На основе РИА предложено несколько методов диагностики лейкозов животных с использованием как интактного вируса, так и структурных полипептидов.

Большого внимания заслуживает РИА в диагностике бешенства у животных (Остапчук, Белов, Ковалев, 1979). Метод основан на связывании меченных радионуклидом специфических антител рабическим антигеном в мазках-отпечатках мозга больных животных и измерении радиоактивности образовавшегося комплекса. Преимуществами этого метода в сравнении с традиционными патоморфологическими являются его высокая специфичность, чувствительность, быстрота выполнения, возможность исследования несвежего, уже разложившегося патологического материала, а также возможность количественно выражать результаты исследования.

Суть метода состоит в том, что из различных отделов головного мозга (кора больших полушарий, аммоновы рога, мозжечок и продолговатый мозг) готовят по четыре мазка-отпечатка размером 20×20 мм. Препараты высушивают на воздухе и фиксируют в течение 4 ч в охлажденном до 4°С ацетоне или пятикратным фламбированием.

В качестве специфических антител используют антирабический гамма-глобулин, меченный ^{125}I .

На фиксированные препараты наносят меченный радионуклидом антирабический гамма-глобулин, помещают их во влажную камеру (чашки Петри с увлажненным дном) и выдерживают 20...30 мин при температуре 37°С. Затем в течение 18...24 ч препараты отмывают 0,01 М фосфатным буферным раствором или проточной водой и высушивают на воздухе.

Исследуемые и контрольные препараты обрабатывают отдельно. В заключение проводят радиометрию препаратов.

Диагноз на бешенство считается положительным, если радиоактивность исследуемых препаратов в 2 раза и более превышает контрольные.

В связи с интенсивным развитием собаководства перспективно использование РИА для изучения патогенеза, ранней диагностики и оценки способов профилактики и лечения различных заболеваний у собак. А. Д. Белов, Л. В. Рогожина, М. В. Щукин (1995–1997) определили радиоиммунологическим методом содержание паратгормона, кальцитонина, инсулина и кортизола у собак различных пород при разной степени тяжести дисплазии. Они установили, что концентрация этих гормонов изменяется уже на первой стадии болезни и зависит от степени ее тяжести.

РИА весьма перспективен в вирусологии. Он позволяет с высокой надежностью диагностировать вирусные болезни.

Возможности радиоиммунологического анализа значительно расширились в дифференциальной диагностике благодаря использованию моноклональных антител, обладающих высокой специфичностью. Эти антитела способны распознавать на вирусных антителах отдельные эпитопы, что очень важно для разработки высокочувствительного радиоиммунологического анализа для диагностики.

Важное звено в изучении механизмов биологического действия ионизирующих излучений на животный организм — исследование гормональной системы при различных дозах облучения. А. Д. Белов и Н. П. Лысенко (1984, 1985) впервые провели в этом направлении обширные комплексные радиоиммунологические исследования на овцах на кафедре радиобиологии МВА. Они показали, что определение содержания кортикотропина и кортизола в крови животных позволяет оценивать функциональное состояние главного адаптивного звена — гипоталамо-гипофизонадпочечной системы в различные периоды лучевой болезни.

Тяжесть лучевого поражения четко коррелирует с продолжительностью и интенсивностью гиперкортицизма, а также уровнем кортикотропина в крови овец во время первичной реакции организма на облучение.

Благоприятное течение лучевой болезни сопровождается вторичным увеличением концентрации АКТГ и кортизола в период разгара лучевой болезни и снижением содержания этих гормонов ниже исходного уровня в период ее разрешения. При неблагоприятном течении лучевой болезни установлено постепенное, вплоть до гибели животного, повышение уровня АКТГ и кортизола в крови.

Возможность быстрого и точного выполнения массовых обследований животных с помощью РИА позволяет диагностировать тяжесть лучевого поражения до проявления клинико-гематологических изменений в облученном организме, а следовательно, своевременно проводить мероприятия по лечению и дальнейшему использованию облученных животных.

А. Д. Белов, М. И. Досталева (1985) по данным радиоиммунологического анализа установили зависимость уровня гастрин в крови от степени тяжести лучевой болезни.

Учитывая, что наиболее важные клеточные функции, охватывающие секрецию гормонов, рост клеток и их иммунный ответ, находятся у млекопитающих под влиянием циклических нуклеотидов, было определено содержание циклического аденозинмонофосфата (ЦАМФ) в плазме крови баранов, облученных в дозах 0,96 и 3,84 Гр. Установленные изменения уровня ЦАМФ в крови у облученных животных коррелируют с дозой облучения и отражают тяжесть лучевого поражения (М. В. Щукин, 1985).

Радиоиммунологический анализ открыл возможность количественного определения низких концентраций ферментов, которые были недоступны для традиционных методов исследования. При этом на анализ не влияют ни температура, ни ингибиторы, ни активаторы ферментов, ни изменения в качественном составе и количественном содержании субстрата (Dass et al., 1980).

Радиоиммунологические методы весьма перспективны в селекционной работе для характеристики генофонда селекционных групп животных, их генотипической структуры, а также выявления ее изменений в процессе совершенствования животных (кроссирования, поглотительного скрещивания, инбридирования).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БОЛЕЗНЕЙ И ЛЕЧЕНИЯ ЖИВОТНЫХ

Радионуклиды и ионизирующие излучения для диагностических и лечебных целей успешно и широко применяют в медицине. В ветеринарии эти способы пока еще малодоступны для практического использования, хотя и имеется ряд разработок, показывающих высокую их эффективность и перспективность. Например, положительные результаты радиотерапии получены при актиномикозе у коров, демодекозе у собак, обильном разрастании грануляций и злокачественных новообразованиях конъюнктивы и кожи, асептических воспалительных процессах суставов у лошадей (Carlson, 1961; Dixon и др., 1969).

А. Д. Белов (1968) создал глазной аппликатор и разработал методику его применения при заболевании глаз у животных. С помощью аппликатора, заряженного ^{32}P и ^{89}Sr , были получены положительные результаты при язвенных и инфекционных конъюнктиво-кератитах, васкуляризации роговицы у телят и собак. Разовая доза 0,5...1 Гр, на полный курс лечения — 2...20 Гр. Автор успешно применял малые дозы ($3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг массы животного) для ускорения регенерации костной ткани и нормализации минерального обмена у животных при переломах костей (радиоактивный раствор вводили в зону перелома).

Радиоактивные изотопы, используемые для диагностики, должны отвечать ряду требований: иметь малый период полураспада и малую радиотоксичность, возможность для регистрации их излучений, характерные биологические свойства (органотропность) при исследовании различных систем и органов. Так, для определения интенсивности формирования костной мозоли и выявления очагов пониженной минерализации при различных патологических состояниях используют ^{67}Ga , который участвует в минеральном обмене костной ткани; ^{85}Sr и ^{87}Sr — для диагностики первичных и вторичных опухолей скелета, остеомиелита; коллоидные растворы ^{99m}Tc ^{113m}In и другие — для сканирования печени при поражении паренхимы; ^{131}I -гиппуран — для диагностики функционального состояния почек; Na^{131}I — для оценки функционального состояния щитовидной железы.

Радиоизотопные методы можно использовать для определения скорости кровотока, объема циркулирующей крови, плазмы и эритроцитов. Радиоизотопный метод определения объема циркулирующей крови основан на внутривенном введении определенного количества меченых эритроцитов (^{32}P при ^{51}Cr) или меченого ^{131}I -альбумина. Через 10 мин из вены противоположной конечности берут шприцем 1...2 мл крови для анализа радиоактивности и по соответствующим формулам делают расчет объема циркулирующей крови.

Объем плазмы определяют с помощью трехвалентного хрома ($^{51}\text{CrCl}_3$), который, будучи введенным внутривенно, на 98% связывается с белками плазмы, осуществляя метку белков *in vitro*. Через 10 мин после введения берут из вены кровь, центрифугируют, определяют радиоактивность плазмы и рассчитывают объем плазмы.

Испытана возможность применения радиоизотопной методики для определения скорости кровотока у животных разных видов. Установлено, что у молодых коров существует зависимость между скоростью кровотока, объемом крови и молочной продуктивностью: чем выше молочная продуктивность, тем выше скорость кровотока и больше объем циркулирующей крови. При нарушении сердечно-сосудистой системы у молочных коров увеличение объема крови сопровождается замедлением скорости кровотока, вызывающим застойные явления.

Перспективен радиоактивный метод определения функционального состояния сердечно-сосудистой системы по скорости кровотока и объему циркулирующей крови у спортивных лошадей. Он неocenим в исследовании патофизиологических процессов при различных заболеваниях у животных, изыскании средств и методов профилактики и лечения. Для исследования центрального и периферического кровообращения широкое применение получил метод радиокардиографии — графический метод исследования гемодинамики с помощью радиоизотопов. Метод основан на графической регистрации перемещения меченой гамма-радиоактивной меткой крови у сердца и в различных участках сосудистого русла.

Наибольшее практическое значение получила так называемая количественная радиокардиография с использованием ^{131}I -альбумина.

Радиоизотопные методы позволяют определять минутный объем сердца, объем крови, циркулирующий в сосудах легких, тканевого и коронарного кровотоков.

С помощью радиоактивных газов определяют функциональное состояние всех компонентов внешнего дыхания — вентиляции, диффузии в легочном кровотоке.

В клинической практике апробированы многочисленные радиоизотопные тесты внешнего дыхания, в том числе такие, которые могут быть получены только с помощью радиоактивных газов, таких как этилийодит, меченный ^{131}I , кислород $^{15}\text{O}_2$, диоксид углерода, меченный по $^{15}\text{O}_2$, ксенон и др. Наиболее подходящим для клинических целей с учетом радиотоксичности периода полураспада, экономических и технических соображений является ^{133}Xe .

Изотопный метод оказался единственно эффективным при исследованиях водного обмена в норме, нарушений обмена веществ, а также инфекционной и неинфекционной патологии, сопровождающейся отеками и другими изменениями. Метод состоит в том, что в состав молекулы воды вместо обычного водорода (^1H) вводят его радиоактивный изотоп — тритий (^3H). При инъекции меченой воды в кровяное русло тритий быстро распространяется по организму и проникает во внеклеточные пространства и клетки. Там происходит обмен водорода воды с молекулами биохимических структур. Так прослеживают путь и скорость обменных реакций радиоактивного водорода, по которому определяют динамику водного обмена. Предложены математические модели скорости водного обмена в норме и при патологии (Богданов, Романовская, 1973).

При некоторых заболеваниях крови (миелофиброз с миелоидной метаплазией селезенки, эритремия в поздней стадии заболевания), а также метастазах рака в костный мозг, раковом остеосклерозе, длительной гемолитической анемии, миеломной болезни возникает необходимость исследовать функцию селезенки. Для этих целей используют радиоизотопный метод с использованием радиоактивного железа — ^{59}Fe . Радиоактивное железо, введенное в кровяное русло в виде метки в составе эритроцитов или плазмы, обычно утилизируется костным мозгом и в очень небольшой степени

поглощается остальной ретикулоэндотелиальной системой, в том числе и селезенкой. При возникновении эритропоэза в селезенке радиоактивное железо поглощается ею пропорционально интенсивности данного процесса. Поскольку железо является бета-гамма-излучателем, его можно регистрировать с помощью гамма-детектора, приложенного к области селезенки. На основании регистрации этого излучения вычерчивают кривые поглощения; анализ их дает ответ относительно наличия селезеночного гемопоэза и его интенсивности. Кривые строят после предварительной оценки данных измерения радиоактивности над селезенкой с учетом радиоактивности крови и изменения этих показателей во времени по специальной формуле. Метод характеризуется большой точностью. С помощью радиоактивного хрома ^{52}Cr исследуют гематологическую функцию селезенки.

Широкое применение в клинической практике получило сканирование исследуемых органов — селезенки, печени, почек, поджелудочной железы и т. д. При помощи этого метода можно получить «карту» распределения радиоактивного изотопа в исследуемом органе и судить о функциональном состоянии последнего. Распределение радиоизотопа обычно бывает представлено в виде штриховой записи на обычной бумаге (рентгеновской пленке). Сканирование является методом своеобразной визуализации органов, так как дает наглядное представление о его местоположении, размерах, форме и частичной структурной организации. Диффузное распределение радиоактивного вещества, как правило, свидетельствует об интактности органа. Обнаружение участков интенсивного накопления («горячие» очаги) или зон с пониженной концентрацией изотопа («холодные» зоны) позволяет заподозрить наличие патологических изменений.

Для исследования быстрых динамических процессов работаны гамма-камеры, которые позволяют «видеть» все части исследуемой области одновременно за короткий промежуток времени. В отличие от сканера, в гамма-камере используют неподвижный детектор.

Лечебное применение радиоизотопов и излучений основано на их биологическом действии. Поскольку наиболее радиопоражаемы молодые, энергично размножающиеся клетки,

то радиотерапия оказалась эффективна на злокачественных новообразованиях. Это обстоятельство позволило разработать радиотерапию больных со злокачественными и доброкачественными опухолями, болезнями кроветворных органов. В зависимости от локализации опухоли осуществляют внешнее гамма-облучение с помощью гамма-терапевтических установок. Применяют аппликации на кожу для контактного действия; вводят в толщу опухоли коллоидные растворы радиоактивных препаратов непосредственно или в виде полых игл, наполненных радиоизотопами; инъецируют внутривенно короткоживущие радионуклиды, избирательно накапливающиеся в опухолевых тканях и критических органах.

Как показали исследования и клинические наблюдения, нейтроны и другие плотноионизирующие частицы более эффективны в радиотерапии опухолей, так как они действуют одинаково как на гипоксические, так и оксигенированные опухолевые клетки. Кроме того, при действии нейтронов отсутствуют различия в радиочувствительности клеток на разных фазах клеточного цикла, что является преимуществом этого вида воздействия с точки зрения эффективности лучевой терапии. Но главное преимущество нейтронов — их высокая биохимическая эффективность по отношению к гипоксическим клеткам, повышающая надежность лучевой терапии вследствие более радикального уничтожения опухолевых клеток.

Все сказанное свидетельствует о перспективности использования нейтронов наряду с другими заряженными частицами для лечения опухолей.

Проводятся широкие клинические исследования с источниками нейтронного излучения ^{252}Cf , который более доступен, а главное — менее дорогостоящий для практического использования в сравнении с ускорительными и реакторными установками. При небольших размерах источника можно получать мощность дозы нейтронного потока, соответствующую требованиям имплантационной и аппликационной терапии.

Перспективен, но пока еще мало разработан метод лечения опухолей нейтронами (нейтронзахватная терапия), позволяющий «обстрелять» опухоль изнутри альфа-частицами. Сущность его состоит в создании альфа-источника в толще самой опухоли. Для этого предварительно в организм вводят

тумотропный нейтронзахватывающий агент в виде стабильного изотопа ^{10}B или ^6Li . Затем подвергают опухоль многопольному нейтронному облучению. Указанные изотопы, захватив нейтроны, приобретают радиоактивные свойства и испускают альфа-частицы. Обладая большой плотностью ионизации, но коротким пробегом (не более 15 мкм), альфа-частицы не вылетают за пределы опухолевых клеток, воздействуют на них, не повреждая окружающие здоровые ткани. Достоинство метода еще и в том, что альфа-излучение можно дозировать, так как оно прекращается одновременно с прекращением нейтронного облучения.

Неоценимую помощь оказывает радиоиндикационный метод в изучении фармакодинамики лекарственных препаратов, скорости и путей их проникновения и выведения из организма в норме и при различных патологических состояниях. Ценные данные были получены при испытании сильнодействующих веществ, а также препаратов, которые ранее считались безвредными. Так, в борьбе с заклещеванностью скота и с кожным оводом вполне безопасным средством считались одно время ДДТ и гексахлоран. Однако исследованиями В. М. Карташовой и П. А. Карташова (1960) с помощью меченого ^{14}C ДДТ и меченого ^{36}Cl гексахлорана было установлено, что данные химикаты при обработке коров быстро проникают через неповрежденную кожу, разносятся кровью и депонируются во всех тканях, поступают через плацентарный барьер в плод и затем медленно (4...5 мес.) выводятся из организма, при этом в значительной степени с молоком, которое становится токсичным. Употребление последнего в пищу приводит к накоплению яда в организме. Аналогичные данные с другими инсектоакарицидами: полихлорпирименом, меченым ^{36}Cl , и дикрезилом, меченым ^{14}C , показали, что эти препараты хотя и проникают через неповрежденную кожу, но полностью выделяются из организма коров не позднее недели, а в молоке исчезают через 2...4 сут и совершенно не проникают через плацентарный барьер. С помощью радиоактивных индикаторов ^{14}C и ^{32}P изучен механизм токсического действия карбаматных инсектицидов (севина, метакрезилкарбамата, паракрезилового эфира-N-Ме-тилкарбаматовой кислоты), хлорофоса и других на животных.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ БИОТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Исследование действия ионизирующей радиации на биологические объекты в зависимости от дозы, мощности облучения и состояния облучаемого объекта послужило основой разработки и внедрения в сельское хозяйство радиационно-биологической технологии (РБТ). В качестве источников излучения используют гамма-установки с радионуклидами ^{60}Co и ^{137}Cs , ускорители электронов с энергией до 10 МэВ, а также источники излучения, связанные с ядерными реакторами (радиационные контуры, частично или полностью отработанные ТвЭЛЫ — радиоактивные отходы атомной энергетики).

Наиболее широкое применение в РБТ получили источники нуклидов ^{60}Co и ^{137}Cs . Они имеют длительный период полураспада (^{60}Co — 5,27 года, ^{137}Cs — 29,6 года), сравнительно высокую проникающую способность гамма-излучения, которая не дает наведенной радиоактивности в облучаемых объектах. Физико-механические свойства источников этих нуклидов позволяют длительно эксплуатировать элементы в радиационно-биологических установках.

Использование ускорителей для РБТ имеет свои преимущества: возможность получения высокой мощности пучка, экономичность и безопасность, поскольку излучение генерируется периодически, а не постоянно, как у гамма-нуклидных установок.

Радиационные контуры и ТвЭЛЫ применяют в РБТ пока только для экспериментальных целей. Это связано с тем, что они должны быть расположены вблизи ядерных реакторов, хотя использование их как источников излучения одновременно могло бы решить вопрос утилизации отходов атомной промышленности.

В нашей стране для нужд сельского хозяйства и научных исследований в области радиационно-биологической технологии создан целый ряд передвижной и стационарной техники. Передвижные гамма-установки типа «Колос» (рис. 53), «Стебель», «Гамма-панорама» смонтированы на автомобилях или автоприцепах. Источником излучения у них служит ^{137}Cs , запаянный в двойную ампулу из нержавеющей стали и

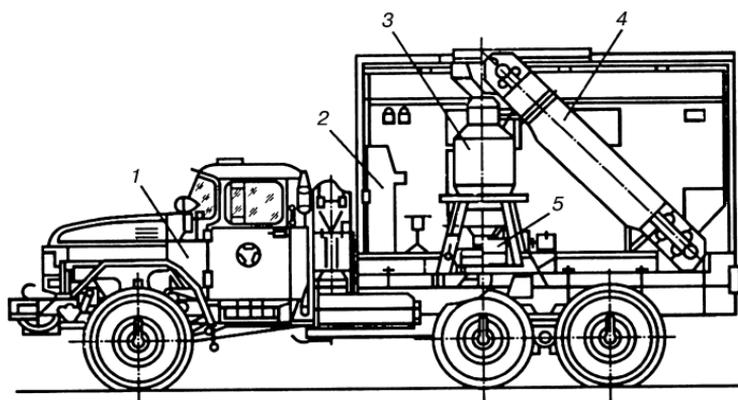


Рис. 53

Схема передвижной гамма-установки «Колос»:

1 — автомобиль ЗИЛ-131; 2 — пульт управления; 3 — блок облучения; 4 — ковше-
вый транспортер; 5 — ленточный транспортер.

находящийся за защитным экраном в нерабочем положении установки. «Колос» и «Стебель» предназначены для предпосевного облучения семян зерновых, зернобобовых, технических и других культур в условиях хозяйств, а «Гамма-панорама» — для облучения сельскохозяйственных растений и животных в целях селекции и стимуляции их роста и развития. Стационарные установки типа «Гамма-поле» и «Стерилизатор» с источником ^{60}Co предназначены соответственно для длительного и разового облучения сельскохозяйственных растений в селекционной работе и для стерилизации в промышленных масштабах ветеринарных и медицинских материалов и инструментов. Стационарная установка типа МХР используется для микробиологических и радиационно-химических исследований, «Генетик» — для стерилизации в борьбе с насекомыми-вредителями.

Радиационная техника имеется и за рубежом (Франция, Италия, США, Великобритания и др.), где успешно применяется в различных направлениях сельскохозяйственных производств.

Использование мутагенного действия ионизирующих излучений в селекционно-генетических исследованиях. Генетическое действие ионизирующих излучений наиболее глубоко было изучено на растениях и микроорганизмах. Еще в 1928 г.

Л. Н. Делоне, а в 1934 г. А. А. Сапегин применили рентгеновское излучение для получения мутаций при селекции.

Под влиянием ионизирующих излучений легко возникают хромосомные и генные, или точечные, мутации. Хромосомные мутации, как правило, приводят к летальному исходу; они имеют значение в стерилизующем эффекте радиации. Для радиационной селекции важное значение приобретают генные мутации. Известно, что вся совокупность свойств, которые характеризуют данный вид растений, животных или микроорганизмов, запрограммирована в ДНК в виде последовательности четырех нуклеотидов.

При облучении в ДНК возникают повреждения, которые непосредственно изменяют генетический код, т. е. ведут к образованию генных мутаций: окислению пиримидиновых оснований с образованием гидроперекисей и гликолей, замене одного основания другим, распаду пуриновых оснований и др. В процессе редупликации ДНК на поврежденной матрице возможны так называемые трансверсии, т. е. замена пуриновых оснований пиримидиновыми и наоборот. При этих изменениях меняется смысловое значение кодона. Это приводит к синтезу белков с нарушенной последовательностью аминокислот. Изменение первичной структуры белка отразится на его трехмерной структуре, что приведет к неправильной самосборке таких белков в морфологические структуры, к появлению уродливых форм, нарушению процессов метаболизма.

В образовании мутаций немаловажную роль играют и процессы репарации одиночных разрывов и повреждений оснований. При восстановлении поврежденных участков ДНК полимеразы могут совершать значительное число ошибок. Таким образом, причиной мутаций может быть не только прямое попадание ионизирующей частицы в ДНК, но и радиационное изменение одного из многих белков хроматина — полимеразы.

Вероятность появления мутаций в результате ошибок при репликации ДНК сильно возрастает в присутствии перекисей, хинонов, семихинонов. Эти вещества, как известно, образуются в облученной клетке и активно реагируют с местами разрывов в цепи ДНК, с нуклеотидами, которые идут на

застройку «брешей» или на синтез новой полипептидной цепи.

На основе радиационного мутагенеза в растениеводстве успешно решаются вопросы получения высокоурожайных, устойчивых к неблагоприятным условиям среды и действия патогенных вредителей новых сортов сельскохозяйственных растений. Селекционеры почти в 5 раз сократили срок выведения новых сортов ячменя и пшеницы, используя мутагенный эффект гамма-облучения. С помощью экспериментального мутагенеза в нашей стране выведены 45 сортов пшеницы, 5 из которых районированы, например сорт пшеницы Новосибирская 67, сорт ячменя Обский. В странах разных континентов зарегистрировано 412 сортов мутационной селекции, поступивших в производство, в их числе 28 сортов пшеницы с улучшенной продуктивностью, зимостойкостью, раннеспелостью, большим содержанием белка, устойчивые к полеганию, мучнистой росе, бурой и стеблевой ржавчиной, с высокими хлебопекарными и другими качествами. Доля сортов важнейших сельскохозяйственных культур составляет более 50%; из них получено с использованием радиации 93% мутантов, а с помощью химического мутагенеза — 7%.

В бывшем СССР получены хозяйственно ценные мутанты сои (Универсал 1), кукурузы, люпина (Мутант 486), гречихи (Аэлита, Лада), гороха, фасоли (Урожайный, Мутант 7), хлопчатника (АН-402, АН-403), раннеспелых томатов, раннеспелого и устойчивого к фитофторе картофеля (Рентгеновский), морозостойких яблонь, вишен и многих других.

В США внедрен устойчивый к болезням сорт арахиса, в Японии — скороспелый сорт сои (Райден) и высокоурожайный сорт риса (Рей-Мей), в Аргентине — крупноплодный сорт персиков, в Индии и Швеции — сорта пшеницы с повышенным содержанием протеинов, в Венгрии — скороспелый мутант риса.

С помощью радиомутации удалось вывести новую разновидность тутового шелкопряда с более высокой продукцией шелкового волокна (за счет отбора самцов), выведена новая порода норки с оригинальным серебристым цветом меха.

В бывшей Чехословакии радиационным методом был получен штамм микроорганизма для производства молочного

нисинового порошка нислактин. При добавлении к плавленным сырам он улучшал их качество и продлевал срок хранения. В промышленном масштабе с успехом были проверены молочные смеси, содержащие нислактин, для выкармливания поросят. При использовании нислактоина кормовые смеси приобретали новые диетические и целебные свойства, повышался прирост массы поросят и улучшалось их общее состояние.

Другой пример — использование методов радиационной селекции для получения новых форм микроорганизмов — возбудителей заболеваний у вредителей сельскохозяйственных культур. Так, с помощью ионизирующего излучения получена новая форма этномогенного гриба боверина — возбудителя мускардиноза у свыше 60 видов насекомых-вредителей (фасолиевая зерновка, яблонная плодожорка, хлебный клоп-черепашка и др.). На базе этой работы был создан и испытан препарат «Боверин», который вызывал гибель многих насекомых-вредителей в период уборки урожая.

Особый интерес при радиационных мутациях представляют те из них, у которых поврежден кодон, необходимый для образования аллостерического центра фермента. Нарушение функций этого центра может снять субстратное ингибирование фермента. В результате фермент активируется, и реакции, катализируемые этим ферментом, идут интенсивнее, чем в норме. На этом основании получены мутанты микроорганизмов с усиленной продукцией того или иного метаболита (антибиотиков, аминокислот и др.).

Облучением культур дрожжей выведены их расы, вырабатывающие в 2 раза больше эргостерина, чем исходные. Такое наследственно закрепленное изменение обмена веществ имеет большое значение для витаминной промышленности.

Комбинированным воздействием радиации и химических мутагенов выведено много штаммов высокоактивных плесневых грибов — продуцентов пенициллина, стрептомицина, ауреомицина, эритромицина и альбомицина, которыми теперь располагает промышленность. Некоторые штаммы дают выход стрептомицина в 20, а пенициллина в 50 раз больше исходных рас. Это позволило организовать промышленное производство антибиотиков и сделало их широко доступны-

ми препаратами. Такой положительный опыт распространен и на другие отрасли микробиологической промышленности для получения высокоактивных продуцентов витаминов, различных ферментов и органических кислот.

Значительный интерес представляют изменения вирулентности микроорганизмов и их способность образовывать токсины под действием ионизирующих излучений. Данные изменения могут быть стойкими, закрепленными наследственно. Такие авирулентные мутанты используются для разработки вакцин. Кроме того, изменения вирулентности бактерий и их способности к токсинообразованию могут происходить и при таком облучении бактерий, когда не возникает мутаций.

Возникновение мутаций, как и всякое вероятностное событие, возрастает с увеличением поглощенной дозы. Однако с увеличением дозы возрастает гибель мутаций в облученной популяции, а многие из возникших не выявляются. В микробиологической практике используют обычно дозы, при которых остается 1...5% выживших микроорганизмов. При радиационной селекции растений часто используют дозы, вызывающие гибель 70% растений. Среди оставшихся 30% выживших растений можно наблюдать большое количество мутаций. Абсолютные значения дозы зависят от радиочувствительности взятого организма.

Для радиационного мутагенеза применяют специально созданные исследовательские ядерные реакторы, радионуклидные гамма-установки («Гамма-поле», «Гамма-панорама», «Генетик»), ускорители электронов.

Стимулирующее действие ионизирующих излучений. В определенном диапазоне доз ядерные излучения обладают стимулирующим действием. Такая стимуляция обнаруживается у всех биологических объектов, начиная с одноклеточных и заканчивая высокоорганизованными растениями и животными. Впервые эффект радиационной стимуляции был получен на растениях и описан М. Мальдиным и К. Тувиненом в 1898 г., т. е. всего лишь через 3 года после открытия рентгеновских лучей. Ускорение прорастания семян, облученных рентгеновскими лучами, привлекло внимание многих исследователей, работавших с ионизирующими излучениями.

В последующие годы появилось большое количество работ, посвященных радиационной стимуляции растений. Среди них предпосевное гамма-облучение семян сельскохозяйственных растений, овощных культур, кормовых трав с целью повышения урожая и улучшения качества продукции. Так, семена салата имеют всхожесть 25...35%. При гамма-облучении их всхожесть увеличивается до 65%. Семена лаванды при облучении дозой 10 Гр на 30-й день повышают всхожесть с 7 до 28%. Внедрение гамма-облучения семян в Молдавии позволило получить за 3 года испытаний (1972–1974) 8,763 т дополнительной продукции зерна кукурузы, 3,703 т подсолнечника, 5,354 т сахарной свеклы.

За 4 года производственного испытания предпосевого гамма-облучения семян в Павлодарской области Казахстана средние прибавки урожая по таким культурам, как гречиха, кукуруза, подсолнечник, колебались в пределах 10...27%.

В Болгарии внедрен в практику метод предпосевого гамма-облучения семян томатов, выращиваемых в условиях закрытого грунта. Метод позволяет ускорить сбор урожая на 10...12 дней.

Облучение семян в стимулирующих дозах перед их посевом приводит не только к ускорению прорастания семян, но и к увеличению урожая и улучшению его качества. Хорошо известно, что семена в момент их прорастания очень восприимчивы к действию различных физических и химических агентов, которые способны влиять на их развитие. Именно на этом основаны такие известные методы их обработки, как яровизация, прогрев УВЧ, намачивание в растворах ростовых веществ, микроэлементов, приводящих к ускорению развития и повышению урожая.

Сравнительный анализ конечных эффектов применения всех этих методов, так же как и гамма-облучения, показывает, что они однотипны. Применение любого из этих методов при неблагоприятных условиях увеличивает урожай на 10...12%. Однако метод гамма-облучения имеет ряд преимуществ:

- простота и постоянство действия облучательных установок, для работы на которых не требуются высококвалифицированные специалисты;
- равномерность воздействия на семена облучения;

- точность дозировки при облучении;
- возможность обработки больших объемов материала.

Изучая процесс радиационной стимуляции на молекулярно-биохимическом уровне, радиобиологи показали, что облучение растений приводит к активации многих процессов обмена: усиливается синтез нуклеиновых кислот, белков, гормонов, повышается активность некоторых ферментов, изменяется проницаемость мембран, усиливается поступление в растения питательных веществ. Все это приводит в итоге к ускорению роста и развития растений. Однако пусковой момент, по мнению А. М. Кузина, — депрессия и активизация под влиянием радиации определенной группы генов. Вещества, которые запускают весь процесс активации генома, так называемые триггер-эффекторы, могут не только образовываться в клетке в результате измененного под действием облучения метаболизма, но и быть привнесенными извне — из других тканей, внешней среды.

В 1976 г. А. М. Кузин высказал гипотезу, что при лучевой стимуляции в качестве триггер-эффекторов могут выступать хиноны, образующиеся из полифенолов в результате радиационно-химических реакций окисления и активации полифенолоксидаз. Обнаружение этих веществ практически возможно только при больших дозах облучения, когда они образуются в высоких концентрациях ($10^{-3} \dots 10^{-4}$ М), угнетающих развитие, поэтому их первоначально и назвали радиотоксинами. В малых же концентрациях ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ М) эти вещества действуют стимулирующе.

Как известно, основная поглощенная объектом энергия ионизирующего излучения реализуется в образовании высокореактивных свободных радикалов, что способствует усилению первичных окислительных процессов. Свободные радикалы в значительных количествах образуются в белках и липидах биомембран, что приводит к получению липидных перекисей и активных хинонов. Происходящие при этом конформационные сдвиги во внутренней структуре мембран клетки изменяют не только ее проницаемость, но и активность мембранных ферментов. Одним из таких наиболее хорошо изученных ферментов мембран является аденилатциклаза (АЦ), регулирующая уровень циклического аденозинмонофосфата

(ЦАМФ) в организме. ЦАМФ влияет на скорость фосфорилирования белков, а также является посредником в действии многих гормонов на геном клетки. Широко известно, что ростовые гормоны, фитогормоны дерепрессируют гены в низких дозах, а в повышенных концентрациях действуют как ингибиторы, как токсические вещества. Хиноны, воздействуя на мембраны, активируют АЦ и через ЦАМФ вызывают дерепрессию генома. Активация генов в облученных объектах возможна и в результате непосредственного действия триггер-эффекторов на хроматин ядра. Так, еще в 1966 г. на изолированных клеточных ядрах было показано, что ортохиноны (например, допахинон) быстро проникают в ядра, соединяются с гистонами и тем самым снимают неспецифическую блокаду генома этими белками. Как следствие, происходит усиленный синтез информационных РНК, белков, ферментов и фитогормонов, индуцирующих метаболические процессы. Это, в свою очередь, существенно сокращает фазы клеточного цикла на ранних стадиях развития. Так, например, по данным И. Н. Гудкова (1976), гамма-облучение семян кукурузы в дозах от 5 до 10 Гр вызывало в клетках увеличение на 2% митотической активности и уменьшение длительности цикла за счет G_1 и G_2 фаз с 13,8 до 10,4 ч.

Таким образом, образование неспецифических триггер-эффекторов хиноидной природы составляет один из важных механизмов общего стимулирующего действия излучения. Повышенный уровень триггер-эффекторов вызывает дерепрессию генома не только у клеток верхушечной точки роста, но и в боковых почках, что ведет к увеличению числа боковых побегов, усиленному ветвлению у стимулированных растений.

Многолетние экспериментальные испытания в полевых и производственных условиях Поволжья (В. И. Костин, 1989) показали, что при облучении семян яровой пшеницы дозой в пределах 2,5...5 Гр, сахарной свеклы 10...12 Гр, томатов и огурцов 2,5...3 Гр отмечается активация ферментов из класса оксидоредуктаз. Эти ферменты осуществляют гидролиз запасных веществ, в частности альфа- и бета-амилаз при прорастании семян, особенно на вторые-третьи сутки проращивания. В результате наблюдается более высокая степень расходования питательных веществ. Как ответная реакция на

раздражимость возрастает интенсивность дыхания, увеличиваются активность фермента каталазы и содержание редуцирующих сахаров.

Наряду с увеличением урожая в результате предпосевной обработки в растениях активизируется накопление органических веществ, которые выработались в процессе эволюции растений данного вида: белка для пшеницы, сахарозы для сахарной свеклы. Усиливается минеральное питание. Следует отметить, что растения, выращенные из облученных семян по интенсивной технологии, полнее используют минеральные удобрения.

Проведены многочисленные исследования по предпосевному облучению клубней, корневищ и черенков. Результаты работ в этом направлении показали, что гамма-облучение находящегося в покое посадочного материала в оптимальных дозах вызывает более быстрое и обильное пробуждение точек роста, корнеобразования. Так, максимальная стимуляция картофеля происходит при облучении клубней в дозах от 0,5 до 5 Гр. Массовые испытания, проведенные в производственных условиях ряда хозяйств Московской, Ленинградской, Орловской и других областей, показали, что гамма-облучение дозой 3 Гр или ускоренными электронами дозой 1 Гр клубней (сорт Лорх) за 2...6 сут до посадки обеспечивает стабильное повышение урожая картофеля на 18...25%. Одновременно наблюдали увеличение содержания крахмала.

При предпосевном облучении корневищ мяты (5 Гр) также наблюдали пробуждение значительно большего числа глазков и образование побегов, прибавку зеленой массы по сравнению с контролем.

Облучение черенков ягодных культур: крыжовника в дозе 5 Гр, черной и красной смородины (20 Гр) — приводило к их лучшему укоренению, большему годовому приросту, увеличению содержания хлорофилла и в конечном итоге к увеличению урожая крыжовника на 60%, черной смородины — на 16, красной смородины — на 63%. Облучение усов земляники дозой от 5 до 15 Гр при последующем тепличном культивировании приводит к увеличению урожая ягод на 30%.

Механизм стимулирующего действия ионизирующего излучения в данном случае такой же, как при предпосевном

облучении семян. На это указывают работы по выделению хинонов из клубней картофеля.

Значительный практический интерес представляет облучение черенков при прививках. Гамма-облучение черенков или подвоя виноградной лозы на гамма-установке «Стерилизатор» дозой порядка 10...30 Гр значительно увеличивает выход полноценных прививок — от 11 до 34%. Вследствие дерепрессии генома усиливаются процессы роста и деления клеток, что будет способствовать более интенсивному срастанию тканей привоя с подвоем. При этом выражено интенсивное деление клеток в камбиальном слое на стыках срастания подвоя с привоем, изменение активности фосфатаз.

При прививках используют также явление радиационного преодоления тканевой несовместимости подвоя с привоем. Использование ионизирующего излучения для преодоления иммунологической несовместимости широко исследовалось на животном организме в связи с задачами пересадки тканей и органов в медицинской практике.

Облучение подвоя $(2...3) \cdot 10^{-2}$ Гр снижает антителогенез в ответ на проникновение чуждых антигенов привоя, что задерживает реакцию отторжения и дает возможность размножающимся клеткам привоя образовать общую ткань с подвоем. В результате возникает иммунологическая толерантность облученного реципиента к трансплантируемой ткани.

Эта принципиально новая технология позволила чисто радиобиологическим методом заменить чрезвычайно трудоемкие ручные операции в виноградарстве современными механизированными и автоматизированными процессами, улучшить качество продукции и повысить ее выход в производственных условиях.

Стимулирующее действие ионизирующих излучений используют при разведении лекарственных растений, для ускорения роста и увеличения выхода лекарственно-ценного вещества (алкалоидов и др.).

Использование ионизирующих излучений для повышения хозяйственно полезных качеств птицы. По всей вероятности, механизм стимулирующего действия малых доз ионизирующих излучений на организм животных на молекулярно-биологическом уровне вряд ли может существенно

отличаться от действия на растения. Следует лишь отметить, что роль специфических гормонов, индуцирующих запуск характерных метаболических процессов, которые обуславливают активацию развития, выполняют гормоны животных, и в первую очередь, по-видимому, стероидные гормоны, контролирующие эти процессы (Гудков, 1989). Об этом свидетельствуют и данные Г. Л. Лукша с соавторами (1989), которые установили, что у крыс-самцов при облучении дозой 0,5 и 1 Гр происходят определенные изменения в системе рецепторов стероидных гормонов клеток различной чувствительности. Наиболее чувствительной к воздействию ионизирующих излучений оказалась рецепция андрогенов в простате крыс. Облучение дозой 0,5...1 Гр приводит к 7...8-кратному снижению числа мест связывания андрогенов в цитозоле во все исследованные сроки (10...60 дней). Таким образом, при облучении малыми дозами происходит перераспределение фракций кортикостерона в пользу биологически активного, не связанного с транскортином гормона. Вместе с этим, по данным Т. В. Дудина с соавторами (1989), при облучении половозрелых крыс-самцов дозой 0,5 Гр рецепторное связывание ^3H -кортикостерона в гипоталамусе повышается, что свидетельствует об увеличении доли связанного гормона. На фоне измененного гормонального уровня происходят сдвиги в соотношении между отдельными изоферментами, которые приводят к изменению обменных процессов. Это связано с тем, что многие ферменты являются адаптивными к гормонам надпочечников (А. Г. Пикулев, 1989).

О стимулирующем действии ионизирующих излучений на животный организм можно судить по ускорению или повышению под влиянием облучения таких факторов, как рост, развитие, продуктивность.

Первые попытки практического использования ионизирующих излучений для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных были сделаны в птицеводстве путем облучения яиц до и после инкубации, а также облучения цыплят и кур в различные возрастные периоды. Еще в 1963 г. А. М. Кузин, И. Г. Костин и другие авторы показали, что хроническое облучение яиц в первые дни инкубации микродозами

гамма-лучей (суммарная доза 0,012...0,03 Гр) увеличивает выводимость и выживаемость в среднем на 2,6%, а яйценоскость выросших кур — на 7%.

Большой интерес для промышленного птицеводства представляли полупроизводственные исследования, проведенные на Ташкентской птицефабрике с гамма-облучением дозой 0,03...0,05 Гр куриных яиц перед закладкой в инкубаторы. При этом использовали опытно-производственную гамма-установку производительностью 7000 яиц в смену. Эксперименты показали усиление интенсивности роста и развития куриных эмбрионов, увеличение выводимости, выживаемости цыплят и повышение яйценоскости кур (табл. 29).

При дозе 0,25 Гр эффект стимуляции пропал, а при дозах 0,5 Гр и выше переходил в эффект угнетения (рис. 54).

Согласно исследованиям, проведенным в МГАВМиБ им. К. И. Скрябина, радиационная обработка яиц в дозе 0,2 Гр на 10-й день инкубации сокращает время инкубации на одни сутки, увеличивает массу цыплят в течение первого месяца в среднем на 12%, повышает яйценоскость кур, полученных из облученных яиц, по сравнению с контролем (В. В. Пак, 1983). Положительный эффект радиации наблюдали также при облучении цыплят в 1...3- и 20-дневном возрасте дозами 0,2 и 1 Гр.

Таблица 29

**Влияние радиационной обработки яиц
на контрольную выбраковку и отходы инкубации**

Доза облучения, Гр	Контрольная выбраковка на 7...8-е сутки инкубации, %	Отходы инкубации, %	Процент выжившихся цыплят
Контроль (необлученные)	17,6 ± 2,6	23,0 ± 2,8	77,0 ± 2,4
0,01	7,5 ± 1,7	15,0 ± 2,0	85,0 ± 3,3
0,03	7,0 ± 1,7	12,4 ± 2,1	87,6 ± 3,2
0,05	7,5 ± 1,8	14,0 ± 1,6	86,0 ± 3,2
0,10	7,5 ± 1,5	16,0 ± 3,4	84,0 ± 3,0
0,50	15,7 ± 2,4	23,7 ± 4,4	76,3 ± 2,7
1,00	17,7 ± 2,4	28,0 ± 4,6	72,0 ± 3,8
4,00	22,7 ± 3,1	37,7 ± 4,8	62,3 ± 4,7

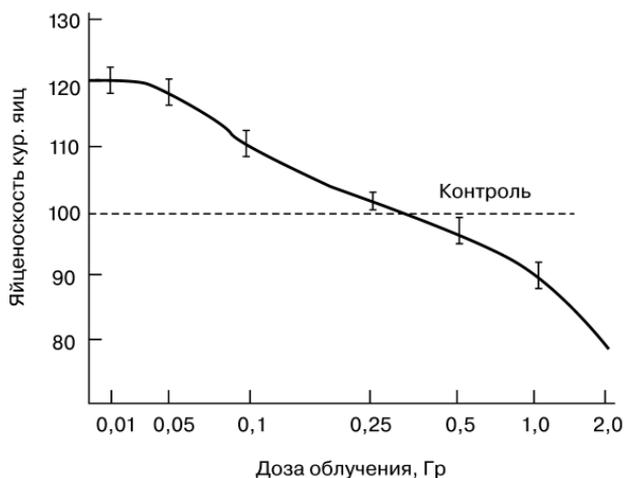


Рис. 54

Влияние радиационной обработки кур на яйценоскость

Стимулирующее действие ионизирующих излучений было установлено у кур-несушек. После облучения их в возрасте 14 мес. в дозе 0,05 Гр яйценоскость увеличивалась в месяц в среднем на 18%. Несушки, которые хорошо неслись до облучения, не изменили яйценоскости. Облучение несушек в дозе 0,2 Гр было менее благоприятно. Аналогичное стимулирующее действие ионизирующих излучений на рост молодняка и последующую продуктивность кур-несушек наблюдали ученые Казанского ветеринарного института (В. А. Киршин и др., 1979). Большое практическое значение имеют работы, проведенные на бройлерах с целью увеличения их массы (В. В. Пак, В. А. Киршин и др.). Облучение бройлеров в дозах 0,25 и 0,5 Гр приводило к увеличению массы цыплят через 30 дней в среднем на 15%. Более высокая масса у облученных цыплят по сравнению с контрольными сохранялась до конца выращивания (65 сут).

Зависимость стимулирующего эффекта от мощности дозы показал Ю. И. Вахер. Так, при облучении цыплят в 2-недельном возрасте при мощности экспозиционной дозы 4,5 Р/мин стимулирующий эффект составляет 10%, а при облучении цыплят в 3-недельном возрасте при мощности дозы 7,5 Р/мин — 5%. Таким образом, стимулирующее действие излучения на

организм птиц зависит от многих как внешних, так и внутренних условий, в первую очередь от дозы, ее мощности, возраста и функционального состояния облучаемого организма.

Механизм стимулирующего действия ионизирующей радиации на яйценоскость кур связывают с возникновением триггер-эффекторов. Воздействие малой дозы (неспецифический триггер-эффектор) на яйцо или голову цыпленка активизирует синтез и выброс в кровь гипоталамического нейросекрета. При этом повышается продуцирование гонадолиберинов (специфические триггер-эффекторы), которые, воздействуя на гипофиз, стимулируют секрецию гонадотропинов, ЛГ и ФСГ. Гонадотропины, в свою очередь, стимулируют выработку стероидных половых гормонов. Устанавливается оптимальный баланс овариальных стероидов, ускоряется созревание фолликулов, повышается продуктивность. Воздействие овариальных гормонов через обратную связь на гипоталамус вызывает следующую волну стимуляции (В. А. Вardanян, М. А. Кочикянц, 1989).

Существенной частью механизма межклеточного контроля, осуществляемого путем нервной и эндокринной регуляций клеток организма, является система циклических нуклеотидов. Как показали опыты А. Д. Белова, Л. В. Рогожиной, З. Г. Кусуровой (1986), предынкубационное рентгеновское облучение яиц дозой 0,05 Гр активизирует циклазную систему у цыплят-бройлеров в последующие сроки развития (с 1-х по 35-е сут).

Исходя из многочисленного экспериментального материала наиболее перспективным считают процесс радиационного облучения яиц перед закладкой их в инкубатор оптимальными дозами 0,03...0,05 Гр и при сортировке цыплят сразу после их вылупления дозой 0,2 Гр.

Схема промышленного использования довольно проста: уложенные в лотки яйца подают транспортером в рабочую камеру гамма-установки, подвергают радиационной обработке оптимальной стимулирующей дозой и затем по транспортеру они поступают в инкубатор. Таким образом, новый процесс легко вписывается в существующую технологическую цепочку инкубации на птицефабриках и комплексах.

Что касается цыплят, то на современных крупных птицефабриках их подвергают специальной обработке. Цыпленка затапливают клювом вперед в крошечную клетушку на карусельной установке, где верхнюю часть его клюва прижигают. Эту операцию проводят, чтобы предотвратить выщипывание пуха и расклеивание до смерти, присущее цыплятам в условиях большой скученности. Технологически ее легко совместить с облучением головы цыпленка, что приведет к его более быстрому развитию и повышению яйценоскости.

Подсчитано, что повышение яйценоскости на 10% в условиях крупных птицеферм, дающих ежегодную продукцию 5 млн яиц, означает получение дополнительной продукции в 500 тыс. штук.

Радиационная стимуляция животных. Данных о радиационной стимуляции у млекопитающих немного. Показано, что хроническое облучение крыс при мощности дозы $0,2 \dots 10^{-2}$ Гр/год приводит к достоверному повышению их плодовитости: количество родившихся крысят более чем в 2 раза превышает таковое в контрольной группе (А. В. Федоров, 1973). У мышей, получавших в течение всей жизни пищу, содержащую некоторое количество радиоактивных элементов, наблюдали также ускорение роста, увеличение абсолютной массы тела и стимуляцию функции воспроизводства (А. П. Ермолаева-Маковская и др., 1973).

Радиостимуляцию изучают в скотоводстве, свиноводстве, звероводстве. Так, гамма-облучение суточных поросят крупной белой породы дозами $0,1 \dots 0,25$ Гр приводило к увеличению массы тела животных на 10...15% в первые 3 месяца жизни. К шестимесячному возрасту масса тела превышала на 6...8% массу контрольных животных. При этом радиостимуляция не влияла отрицательно на органолептические и биохимические показатели (Жиршин, Григорьев, Пастухов, 1983).

Опыты, проведенные на валухах тонкорунных овец в условиях овцеводческого хозяйства, показали, что облучение ягнят в одно-, двух- и трехмесячном возрасте малыми дозами на гамма-установке «Панорама-2» к 9-месячному сроку приводит к повышению живой массы, выживаемости, настригу, густоты, длины шерсти по сравнению с контролем (Курбангалеев, Ишмухаметов, 1994).

Имеются данные, что гамма-облучение норок при экспозиционной дозе 0,1...0,3 Гр повышает выживаемость потомства, сопротивляемость заразным болезням, в том числе алектской болезни норок, и улучшает качество пушнины, особенно у самцов.

Облучение черно-бурых лисиц незадолго до гона сокращало данный размытый период, увеличивало плодовитость самок, повышало выживаемость потомства. При этом потомство облученных самок росло интенсивнее и обладало более длинными шкурками при той же пушистости на период убоя.

По сведениям Галена, после облучения небольшого участка кожи кроликов при экспозиционной дозе 1 Гр через 48...96 ч у них повышался фагоцитарный индекс в крови. Это свидетельствует о стимуляции факторов неспецифического иммунитета, увеличивающего жизнеспособность животного организма.

Данные процессы радиационно-биологической технологии в звероводстве находятся пока на первой экспериментальной стадии, поскольку внедрение технологий возможно только в промышленных звероводческих комплексах, которых сейчас крайне мало. Рассматривая вопрос о стимулирующем действии радиации, следует учесть, что ускорение роста и развития может приводить к сокращению продолжительности жизни организма, что в целом является отрицательным явлением. Вместе с этим в животноводстве оно может приобретать положительное значение с хозяйственной точки зрения.

Ускорение цикла развития под влиянием облучения в стимулирующих дозах было показано в опытах с мышами и дрозофилой. Но данных о сокращении жизни животных не имеется. Напротив, есть сведения о ее продлении. Так, Е. Лорец (1980), исследуя влияние различных доз хронического гамма-излучения на развитие мышей и морских свинок, показал, что их облучение при мощности дозы $0,11 \cdot 10^{-2}$ Гр/сут, начиная с одного месяца и до конца жизни, приводит к увеличению средней продолжительности жизни мышей с 703 дней до 761 дня, а свинок — с 1400 до 1457 дней.

Таким образом, сферы применения радиостимуляции довольно обширны и перспективны из-за высокообещающей

экономической выгоды, что особенно важно в наше время — время рыночной экономики.

Использование радиационной биотехнологии при производстве кормов и кормовых добавок для сельскохозяйственных животных. В основе методов получения кормов и кормовых добавок лежит использование бактерицидного действия ионизирующих излучений. Значительный резерв для получения ценных кормов и кормовых добавок — промышленные, сельскохозяйственные и бытовые отходы. Очистка сточных вод на первом этапе заключается в отстаивании нерастворимых твердых остатков, которые образуют сырой осадок сточных вод (ОСВ). Биологическая очистка аэрированных сточных вод приводит к образованию активного ила. При этом в ОСВ возрастает доля биологической массы, представляющей собой преимущественно белковое вещество. Та часть активного ила, которая не используется как затравка для биологической очистки новых порций сточных вод, составляет избыточный активный ил (ИАИ). Иловые площадки есть даже в зоне городов. ОСВ и ИАИ имеют высокую влажность (92...97%) и представляют собой сложные коллоидно-дисперсные водные системы с высоким сопротивлением к фильтрации. Они являются благоприятной питательной средой для возникновения опасной микрофлоры, для заражения яйцами гельминтов; в них легко развивается гнилостное брожение. Вместе с тем ОСВ и ИАИ можно рассматривать как ценное сырье для получения корма и кормовых добавок для животных. Так, активный ил содержит около 70% органических веществ, 30...40% белков, жиров, углеводов, витаминов и минеральных веществ, практически все заменимые и незаменимые аминокислоты.

Дезинфекция и дегельминтизация ОСВ и ИАИ могут быть успешно решены путем применения ионизирующего излучения, которое приводит к гибели большинства возбудителей инфекционных и инвазионных болезней. Летальная доза зависит от типа микроорганизмов, их радиочувствительности. Кроме того, с увеличением обсемененности доза немного возрастает. В водных средах, насыщенных кислородом, наблюдается усиленное действие радиации (кислородный эффект). Поглощенная доза 10...20 кГр обеспечивает стерильность по

всем наиболее часто встречающимся в отходах возбудителям инфекционных и инвазионных болезней. При повышении температуры до 320...330°K (47...57°C) дозу полного обеззараживания можно снизить в 10 раз (модифицирующий фактор). Предварительное облучение ОСВ и ИАИ, кроме того, снижает удельное сопротивление к фильтрации в 1...5 раз, что сокращает время обработки стоков и снижает энергозатраты.

В Университете штата Нью-Мехико в США совместно с фирмой «Сандиа» были проведены исследования по скармливанию телкам (20 голов) ОСВ, облученных дозой 10 кГр. Было показано, что конечные приросты массы в опытной и контрольной группах не различаются, физиологические показатели крови, содержание тяжелых металлов соответствуют норме, мясо по цвету, плотности и вкусовым качествам не изменилось. По калорийности и биологической ценности аминокислот ОСВ не уступают муке из жмыха семян хлопчатника. В опытах на мышцах было установлено отсутствие в ОСВ, обработанном ионизирующим излучением, токсических веществ.

Технология получения корма из ИАИ была разработана Институтом физической химии АН Украины. Она включает обработку ИАИ ускоренными электронами до поглощенной дозы 10 кГр, его фильтрацию при давлении 0,8 МПа и сушку. Получаемая кормовая добавка не содержит патогенных микроорганизмов, вирусов и яиц гельминтов и нетоксична.

Подвергнутые радиационной обработке ОСВ и ИАИ могут быть использованы и в качестве органоминеральных удобрений.

Радиационная стерилизация ветеринарных принадлежностей, бактериальных препаратов, питательных сред, получение радиовакцин. В основе радиационной стерилизации лежит бактерицидное действие ионизирующего излучения, эффект которого определяется степенью радиорезистентности микроорганизмов и дозой ионизирующего излучения. Радиационная стерилизация как промышленный процесс используется в нашей стране более 20 лет. Созданы различные виды облучательных установок лабораторного, опытно-промышленного и промышленного типов.

Радиационный метод имеет важное значение для стерилизации медицинских и ветеринарных изделий одноразово-

го пользования из полимерных материалов, не выдерживающих термической или химической обработки или теряющих при этом свои функциональные свойства.

Благодаря высокой проникающей способности ионизирующих излучений оказалось возможным стерилизовать продукцию в упакованном и готовом к выпуску виде на конечном этапе производства, что дает дополнительные преимущества способу радиационной стерилизации по сравнению с традиционными. В процессах радиационной стерилизации доза — практически единственный контролируемый параметр, в то время как паровой или газовый метод требует регулирования 5...7 параметров (табл. 30).

В 1971–1976 гг. на Ленинградском заводе «Медполимер» осуществлен первый в нашей стране промышленный выпуск изделий (систем службы крови и шприцев одноразового пользования), стерилизованных на опытно-промышленной гамма-установке «Стерилизатор». Минимальной эффективной поглощенной стерилизующей дозой считают 25 кГр.

В Государственном научном центре «Институт биофизики» для радиационной стерилизации медицинских изделий и препаратов широко используют линейный ускоритель электронов. В этом институте активно ведутся работы по апробации более низких стерилизующих доз.

Таблица 30

**Контролируемые факторы
при различных методах стерилизации**

Фактор	Метод стерилизации		
	Паровой (авто- клавирование)	Газовый (окси- дом этилена)	Радиационный (ионизирующим излучением)
Температура	+	+	—
Время	+	+	+
Давление	+	+	—
Вакуум	+	+	—
Концентрация	—	+	—
Упаковка	+	+	—
Влажность	—	+	—

Примечание. Обозначения: (+) — параметр используется; (—) — параметр не используется.

Развивается это же направление и в ветеринарии. Наиболее перспективно применение радиационной технологии для стерилизации наборов инструментов для искусственного осеменения животных. В нашей стране искусственному осеменению подвергают 76% коров, 80% овец и 60% свиноматок. Если учесть общее поголовье искусственно осемененных животных, то ежегодно требуется около 200 млн наборов инструментов для осеменения. Номенклатура и количество пластмассовых изделий, применяемых в ветеринарии, все время растут, и для их стерилизации невозможно обойтись без радиационных методов. В настоящее время радиационный метод стерилизации успешно применяют и для стерилизации шовных и перевязочных материалов — кетгута (широко используется в хирургии), а также нитей, изготавливаемых из особого пластического материала или коллагена. В ряде случаев радиационные методы применяют для стерилизации хирургических принадлежностей и перевязочных материалов (бинтов, тампонов, марли, ваты, халатов и т. д.). Стерилизующая доза перечисленных объектов составляет 25 кГр.

Широкое использование сульфаниламидов и антибиотиков в медицине и ветеринарии обуславливает особый интерес к стерильности этих препаратов и способам стерилизации их. Сульфаниламиды обладают высокой радиорезистентностью. При дозе 25 кГр и выше не возникает никаких изменений этих лекарственных веществ; незначительные физико-химические изменения были отмечены лишь при облучении дозой 250 кГр. Антибиотики, простерилизованные радиационным способом в сухом виде, по терапевтической эффективности, биологическим и основным физико-химическим показателям отвечают требованиям, предусмотренным для необлученных препаратов.

Испытывалась возможность стерилизации радиационным способом гормонов, ферментов и витаминов. Оказалось, что гормоны обладают более высокой радиорезистентностью по сравнению с витаминами. Облучение гормонов (кортизон, преднизолон, прогестерон, АКГТ и др.) в дозах, значительно превышающих стерилизующие (60...70 кГр), не вызывало изменений их химических свойств. Из ферментов наиболее радиорезистентными были протеолитические (трипсин, пепсин, инвертаза и др.).

Высокой радиочувствительностью характеризуются витамины группы В, особенно если их облучают в растворах. При облучении дозой от 5 до 25 кГр изменяется цвет препарата и снижается его биологическая активность. Однако при облучении таблеток поливитаминных препаратов, содержащих фолиевую и никотиновую кислоты, тиамин, рибофлавин и пантотенат кальция, дозами в пределах 20 кГр не изменились свойства препаратов и не снижалась их активность в течение 4 лет в условиях хранения при комнатной температуре.

Изучается возможность радиационной стерилизации крови и препаратов, изготовленных из нее. Получены обнадеживающие результаты, которые позволяют применить ионизирующее излучение для стерилизации крови и белковых растворов (Туманян, Каушанский, 1974).

Радиационной стерилизации можно подвергать и растворы различных препаратов, применяемых в лечебной практике для внутривенных вливаний (например, растворы глюкозы, физиологический раствор и другие солевые растворы). Стерилизующая доза составляет 25 кГр. С помощью гамма-излучения стерилизовали и другие инъекционные растворы (аспирин для внутривенного введения, некоторые анальгетики).

Несмотря на относительно высокую радиорезистентность микроорганизмов, оказалось возможным использовать ионизирующие излучения для получения принципиально новых препаратов — радиовакцин и радиоантигенов, а также для лучевой стерилизации уже готовых вакцин, бактериальных агентов и питательных сред.

В ветеринарной практике при производстве вакцин обычно применяют такие методы воздействия на бактерии, как нагревание и обработка химическими веществами — спиртом, ацетоном, формальдегидом и др. Однако при этом многие клеточные антигены, ответственные за создание в организме животных полного иммунитета, разрушаются. Ионизирующее излучение в определенных дозах позволяет сохранить антигенные свойства препарата и дает полный генактивирующий эффект. Так, для приготовления радиовакцин против гриппа и паратифа достаточна доза 10 кГр (Туманян, Каушанский, 1974).

Перспективными оказались попытки использования живых радиовакцин при гельминтозах — иммунизации телят и ягнят против нематод путем заражения животных личинками, ослабленными рентгено- или гамма-облучением от 400 до 600 Гр. Опыты с личинками *Dictiocaulus*, *Haemonchus* и *Trichostrongylus* на овцах и телятах дали очень хорошие результаты. Вакцины, изготовленные из личинок *Difilarie viviparus*, *Sungamus trachea*, *Ankilastoma caninum*, используют в Югославии, Шотландии, Австралии и других странах.

Проводят работы по созданию радиовакцин против протозойных заболеваний животных.

С помощью ионизирующей радиации можно готовить и убитые вирусные и бактериальные вакцины. Убитые вакцины можно разделить на две группы: корпускулярные и химические. Корпускулярные вакцины готовят из бактерий, убитых различными способами, в том числе и радиацией. Ионизирующие излучения были использованы прежде всего при изготовлении вакцин против кишечных инфекций (например, против брюшного тифа), так как вакцины, приготовленные другими способами, были малоэффективными из-за разрушения антигенов бактериальной клетки. Для приготовления радиовакцины облучают стандартную взвесь бактерий в физиологическом растворе (10^9 бактериальных клеток в 1 мл) дозой 10...15 кГр. Эта доза гарантирует надежную инактивацию стандартной взвеси брюшно-тифозных бактерий и стерильность вакцин. Исследования, проведенные на разных экспериментальных животных и при различных путях введения вакцин в организм, показали, что радиовакцины, как корпускулярная, так и химическая, менее токсичны, чем гретая брюшно-тифозная. Вакцины обладают высокой иммуногенностью и не уступают по этим свойствам эталонной вакцине.

Привлекает и другой вид использования ионизирующих излучений — для стерилизации вакцин в готовом и фасованном видах, питательных сред при культивировании микробов и вирусов. Это исключает возможность повторного обсеменения продукта во время ампулирования и фасования.

Ионизирующие излучения с успехом могут быть использованы для приготовления вирусных вакцин. Первой вирусной вакциной, полученной таким способом, была вакцина

против бешенства. В настоящее время имеется достаточно сведений о возможности инактивации многих вирусов.

Практическое использование радиовакцин еще не имеет широкого распространения. Однако имеющиеся данные показывают большие возможности использования ионизирующих излучений как для приготовления вакцин против бактериальных, вирусных и глистных заболеваний, так и для стерилизации уже готовых препаратов.

Есть данные, указывающие на то, что радиационная стерилизация питательных сред не только не понижает питательных свойств, но даже в той или иной степени повышает их качество для некоторых видов микроорганизмов. Так, по данным А. В. Хотянович и др. (1981), одним из лучших субстратов для получения штаммов азотсваивающих клубеньковых бактерий рода *Rhizobium* является подвергнутый радиационной стерилизации торфяной нитрагин. Препаратом этих бактерий обрабатывают семена бобовых культур для повышения их урожайности. Показано, что на стерильном субстрате клубеньковые бактерии развиваются наиболее полноценно. Сравнение способов стерилизации показало, что при радиационной стерилизации содержание микробных тел в готовом препарате значительно выше, а зараженность посторонней микрофлорой ниже, чем при тепловой стерилизации.

Радиационное обеззараживание навоза и навозных стоков животноводческих комплексов. Одна из сложных и недостаточно решенных проблем на животноводческих комплексах — обеззараживание навоза и навозных стоков. Образование огромных масс необеззараженного навоза и навозных стоков на животноводческих и птицеводческих комплексах приводит к загрязнению окружающей среды (воздуха, воды и почвы), а также служит источником инфекционных и инвазионных болезней.

Как показали многочисленные исследования, радиационный метод не только экономически, но и экологически выгоднее существующих способов обеззараживания навоза и навозных стоков (термического, пароструйного, интенсивного окисления, химического и др.). Разработка процессов радиационной обработки сточных вод базируется на данных о радиочувствительности яиц и личинок гельминтов, ооцист

кокцидий, патогенных микроорганизмов и других возбудителей заболеваний.

В работах А. Е. Антоненко подробно изучена зависимость степени угнетения развития яиц гельминтов, ооцист кокцидий в навозе от дозы гамма-излучения (табл. 31).

Как следует из табл. 30, наибольшей радиорезистентностью характеризуются ооцисты кокцидий и доза облучения, необходимая для полной дезинвазии отходов животноводства, должна быть не менее 2,5 кГр. Наиболее эффективным и экономически выгодным оказалось комбинированное воздействие ионизирующего излучения и физических (теплота, давление) или химических факторов (микро-, макроудобрения, например хлорид калия), так как при этом удается значительно снизить обеззараживающую дозу для яиц гельминтов и микроорганизмов (табл. 32).

Показано синергическое усиление бактерицидного действия ионизирующего излучения, применяемого в сочетании с микродозами хлорной извести. Так, при обеззараживании жидкого свиного навоза гамма-облучением в сочетании с хлорной известью доза снижается с 2,5 до 0,5 кГр. Для обеззараживания жидкого бесподстилочного навоза животноводческих комплексов были разработаны гамма-установка «Комплекс-1» производительностью 1000...2800 м³/сут (для комплексов на 54 и 104 тыс. свиней) и установка «Комплекс-2» производительностью 350 м³/сут для обеззараживания твердой фракции и илового осадка.

Кроме того, для дегельминтизации и дезинфекции стоков используют ускорители электронов (ЛИТ-1) с энергией 0,5 МэВ и выше.

Дезинфекция сырья животного происхождения при инфекционных заболеваниях. Известно, что большинство патогенных возбудителей длительное время сохраняют жизнеспособность во внешней среде, в том числе в сырье животного происхождения. Исследования показали, что споры сибирской язвы сохраняются десятилетиями, листерии — 72...90 сут, вирус ящура — 20...352 сут, оспа птиц — от 13 сут до 1,5 лет. В связи с этим полученная от больных животных продукция (шерсть, мех, шкуры, кожевенное сырье, щетина) нередко оказывается переносчиком заразного начала и

Таблица 31

Зависимость степени угнетения развития яиц гельминтов и ооцист кокцидий в навозе от дозы гамма-облучения

Доза, кГр	Процент развивающихся особей			
	стронгилиды	аскариды	трихоцефалы	кокцидии до стадии спороцист
0	95	97,3	97	97,3
0,10	30	—	—	—
0,20	5	—	—	—
0,30	0	—	—	—
0,50	0	46,6	18,3	—
0,70	0	13,6	3,0	94
0,90	—	4,0	0	—
1,10	—	2,3	0	—
1,30	—	0	—	—
1,90	—	0	—	45,6
2,10	—	0	—	16,0
2,30	—	—	—	7,3
2,50	—	—	—	0

Таблица 32

Влияние комбинированной обработки на выживаемость возбудителей инфекционных и инвазионных болезней

Вид облучения	Доза, кГр	Выживаемость при комбинированном воздействии, %		
		Облучение	Облучение + барботаж воздуха + КСИ	Облучение + тепло (38°C)
<i>E. coli</i> (штамм W1485)	0,05	70	5	20
Ооцисты кокцидий	0,60	91	25	50

источником заражения здоровых животных, а также человека общими для животных и людей болезнями.

Существующие влажные методы дезинфекции сырья животного происхождения, неблагоприятного по инфекционным заболеваниям, с одной стороны, очень трудоемки, а с другой — приводят к понижению его товарного качества. Применение ионизирующей радиации для обеззараживания

этих материалов, а также пуха, пера и других весьма перспективно.

Установлены оптимальные поглощенные дозы для эффективного обеззараживания сырья в зависимости от вида возбудителя: 23...25 кГр (сибирская язва), 21 кГр (ящур), 5,5 кГр (листериоз), 22,4...22,5 кГр (чума свиней, плотоядных), 10...15 кГр (трихофития). При этом физико-химические свойства и товарные качества сырья не изменяются, а радиационная обработка дозой 5 кГр даже улучшает качество меха, что связано с преобладанием процессов структурирования над процессами деструкции.

Структурирование в кератинах волос под действием оптимальных доз гамма-облучения происходит в результате образования дополнительных дисульфидных и водородных связей. Это приводит к снижению истираемости волосяного покрова, увеличению прочности его связи с кожной тканью. Кроме того, радиационная обработка сырья удлиняет сроки его хранения. Если при влажном методе дезинфекции сырье должно сразу же подлежать технологической обработке, то после облучения парного кожевенного сырья дозой 1 кГр его можно хранить 7 сут без заметных признаков бактериального повреждения. Доза в 3 кГр увеличивает сроки хранения до 12 сут. При этом сырье не требует дополнительного консервирования химическими веществами.

В Австралии уже не одно десятилетие действует промышленная гамма-установка для обеззараживания овечьих шкур и шерсти. Сырье облучается в тюках объемом около 1 м³ при дозе 20 кГр. В нашей стране для обеззараживания сырья животного происхождения эксплуатируют промышленные гамма-установки «Стерилизатор», К-300.

Оценка экономической эффективности обеззараживания сырья, неблагоприятного по листериозу, с применением гамма-установки К-300 показала, что стоимость радиационной обработки 500 шкурок кролика в 4 раза дешевле, чем при влажном методе дезинфекции. При этом в 88 раз возрастает производительность труда, сырье может длительно храниться после обработки, обеззараживание можно проводить в упакованном виде и уменьшается вероятность инфицирования помещений, оборудования, животных и людей.

Радиационная стерилизация животных и насекомых-вредителей. Заслуживает внимания использование ионизирующих излучений для половой стерилизации самок сельскохозяйственных животных при откорме с целью повышения их продуктивности. В настоящее время успешно применяют хирургические методы стерилизации (кастрации) самцов (бычков, хрячков). Стерилизацию же самок (свинок) используют в гораздо меньших масштабах в связи с тем, что при хирургических методах возможны различные осложнения (грыжи, перитониты, нагноение кожных швов, потеря массы и т. д.).

В то же время, по данным многих авторов, половая стерилизация свиней при полусальном откорме приводит к возрастанию массы животных на 10...13 кг, увеличению количества сала и внутреннего жира на 33...35%.

Разработка лучевых способов стерилизации животных позволит избежать недостатков, присущих хирургическим методам кастрации. Ряд авторов (Я. З. Бейлин, Wilman, Nishiga и др.) делали попытки применить для этих целей рентгеновское излучение, растворы ^{32}P . Однако предлагаемые методы не нашли широкого применения в практике, так как на рентгеновском аппарате трудно создать мощный узкий пучок излучения, а ^{32}P является остеотропным изотопом и подвергает облучению костный мозг.

Наиболее эффективно радиационная стерилизация используется в борьбе с насекомыми-вредителями. В основе метода лежит различие в радиочувствительности соматических и половых клеток. Под влиянием правильно подобранной дозы ионизирующего излучения у насекомых некоторых видов соматические клетки не страдают, а в половых происходят необратимые изменения при сохранении возможности облученных насекомых к спариванию.

При стерилизации самцов жизненный цикл насекомых будет нарушен. При неоднократном повторении приема в течение нескольких лет удается полностью уничтожить вид в определенном регионе. Впервые этот метод был применен в США для истребления мясной мухи, личинки которой, скапливаясь в ранах животных, вызывали их гибель. С этой целью облучали куколок мух. В результате через 18 мес. работы

удалось полностью очистить всю юго-восточную часть США от опасного вредителя.

Радиационный метод стерилизации был применен и в борьбе со средиземноморской мухой — вредителем цитрусовых культур. Главное преимущество этого метода в том, что он направлен против насекомых одного конкретного вида, в то время как химические вещества действуют и на других, в том числе и полезных (пчел, муравьев) насекомых. К тому же радиационный метод безвреден для животных, человека, а также других объектов биосферы, т. е. экологически чистый.

Известно, что малярия стала настоящим бичом Черного континента. По сообщению профессора Барта Нолса, ежегодно в мире регистрируется 5 млн случаев этого опасного заболевания, более 90% из них приходится на Африку, где каждые 20 с от малярии умирает один ребенок. Для решения проблемы ООН обратилась к МАГАТЭ, где в настоящее время интенсивно ведутся работы над технологией, позволяющей стерилизовать самцов малярийных комаров посредством радиоактивного облучения.

В нашей стране ведутся работы по борьбе с гороховой и фасолевой зерновками, яблоневой плодовой жоржкой и другими вредителями сельскохозяйственных растений. Было показано, что для стерилизации зерновки оптимальна доза 100...120 Гр. Насекомые, облученные этими дозами, теряли способность к воспроизводству потомства.

Для половой стерилизации насекомых-вредителей предназначена гамма-установка «Генетик», разработанная под руководством Д. А. Каушанского в КБ Института органической химии им. Н. Д. Зелинского. В этой установке в свинцовом защитном корпусе находятся три камеры, внутрь которых помещают емкости с насекомыми. При вращении этих емкостей вокруг облучателя (^{137}Cs) через определенное время набирается необходимая доза (100...200 кГр). Затем емкости с насекомыми вынимают и стерильных самцов выпускают на фасолевые поля. После спаривания выпущенных стерилизованных жуков с жуками естественной популяции самки откладывают нежизнеспособные яйца, из которых новое поколение не выводится.

Важное значение в борьбе с насекомыми-вредителями приобретает радиационная дезинсекция зерна. При выборе оптимальных доз облучения необходимо учитывать радиочувствительность насекомых на разных стадиях развития. Так, яйца и личинки амбарного долгоносика погибают при дозе 55 Гр, а куколки — при 200 Гр. Продукты питания (зерно, мука и т. п.) чаще бывают заражены яйцами и реже — молодыми личинками, т. е. наиболее радиочувствительными стадиями развития насекомых. Тем не менее для зерна, зараженного несколькими видами насекомых-вредителей, рекомендована единая дезинсекционная доза 200 Гр.

Для дезинсекции зерна используют гамма-нуклидные установки и ускорители электронов с энергией 1,5...10 МэВ. В Одесском портовом элеваторе с 1980 г. успешно работает ускоритель электронов ЭЛВ-2 с энергией 1,4 МэВ.

Преимущества радиационной дезинсекции зерна по сравнению с широко распространенным химическим методом обеззараживания следующие: исключается загрязнение окружающей среды; в облученном зерне отсутствуют остатки ядохимикатов; полностью уничтожаются насекомые-вредители; не изменяется качество продукции; процесс легко можно механизировать и автоматизировать, он не трудоемок и экономически выгоден.

Облучение успешно применяют для дезинсекции и других продуктов: какао-бобов, орехов и сушеных фруктов.

Одно из направлений радиационной половой стерилизации — технология генетического определения пола. Экономически выгоднее и эффективнее облучать самцов насекомых, поскольку затраты на разведение самок гораздо существеннее. Задача этой технологии состоит в создании устойчивости к летальному воздействию ионизирующих излучений и в передаче этого генетического фактора устойчивости мужской хромосоме, определяющей род потомства. Отбор на основе летального воздействия на раннем этапе развития насекомых приводит к уничтожению самок насекомых.

Ионизирующие излучения перспективно использовать в шелководстве для промышленного получения гусениц мужского пола. Метод заключается в оплодотворении необлученной спермой предварительно облученных дозой 700...800 Гр

яйцеклеток, что приводит к андрогенетическому развитию гусениц, т. е. получению самцов. Это явление называют радиационным андрогенезом. Применение описанного метода на промышленных выкормках гусениц мужского пола повышает продуктивность на 20% за счет большей (на 12%) выживаемости и повышенной (на 8%) шелконосности.

Повышение продуктивности тутового шелкопряда в результате такого разведения самцов не связано с дополнительными затратами труда и расходом шелковицы.

Стоимость добавочной продукции шелка, получаемой от самцов, в несколько раз больше, чем затраты, связанные с этой технологией. Поэтому радиационная технология получения гусениц в шелководстве экономически эффективна и выгодна.

Использование бактерицидного действия ионизирующих излучений для обеззараживания и продления сроков хранения продукции животноводства и растениеводства. Одно из перспективных направлений использования ионизирующих излучений — радиационная обработка мяса и мясных продуктов с целью удлинения сроков хранения и обеззараживания при некоторых заболеваниях. Разработана радиационная технология обработки и хранения мясной продукции на основе методов пастеризации и стерилизации. Радиационные методы хранения мясной продукции обладают существенными преимуществами: можно продлить сроки хранения и дополнительно уменьшить потери при хранении и транспортировке; нет загрязнения химическими препаратами; возможна обработка продукта в любой упаковке, в том числе из полимерных материалов; можно механизировать и автоматизировать весь технологический процесс.

Установлено, что полуфабрикаты из говядины и свинины, упакованные в пакеты из полимерных материалов под вакуумом 5,3...7,9 кПа (40...60 мм рт. ст.) и облученные гамма-квантами при поглощенной дозе 4...6 кГр, способны сохраняться соответственно в течение 40 сут и 2 мес. при температуре 3...5°C. При этих дозах почти полностью погибают такие микроорганизмы, как *Pseudomonas*, *Bacillus*, *E. coli*, *Staphilococcus*.

Повышение дозы облучения до 30...35 кГр приводит к полной стерилизации, но при этом изменяются запах и вкус

мяса вследствие радиохимического распада тиольных соединений и образования меркаптанов, аммиака и др. Чтобы избежать этого, рекомендуют сочетать облучение с модифицирующими факторами, например с предубойной адренализацией животных. Это позволяет снизить неблагоприятное действие катепсина и других ферментов автолиза, а также уменьшить дозу облучения с 25 до 6 кГр.

Для мяса мелких животных (кролик), в том числе птицы (куры, гуси, утки), был предложен метод предубойного гамма-облучения сублетальной дозой, снижающей содержание гликогена в мышцах, благодаря чему повышается рН ткани и увеличиваются сроки хранения. Так, облучение тушек кур дозой 4...6 кГр позволяет продлить срок их хранения с 10 до 34 сут при температуре 1°C. Предубойное (за сутки до убоя) облучение кур дозой 8,5 Гр и последующее облучение тушек дозой 15 кГр позволяло хранить мясо в течение 9 мес. при комнатной температуре без изменения вкусовых и питательных качеств.

Для обработки мясных полуфабрикатов с успехом применяют комбинированное действие излучения и кратковременной тепловой обработки в целях инактивации протеолитических ферментов. После тепловой обработки и облучения в полиэтиленовых пленках дозой 6 кГр полуфабрикаты хранятся до 8 мес. без признаков порчи.

При холодильном консервировании, задерживающем течение автолитических процессов, предложено использовать гамма-облучение. Для длительного хранения свинины, говядины и мяса кур при минус 30°C было рекомендовано облучение дозой 35...40 кГр.

Были попытки использовать ионизирующие излучения для обеззараживания молока, но при этом снижаются вкусовые качества; тем не менее есть сведения о том, что при воздействии на молоко давлением 60...70 МПа (600...700 кг/см²) при температуре 59°C с последующей радиационной обработкой дозой 3 кГр молоко стерилизуется без значительного изменения основных физико-химических свойств.

В ряде стран в повседневной практике используют рентгеновское и гамма-излучение для стерилизации пластиковой или картонной упаковки, в которой хранят молоко.

Актуальная задача — удлинение сроков хранения рыбы и морских продуктов. При гамма-облучении дозой до 6 кГр их органолептические свойства изменяются мало. Радиационная обработка свежей рыбы дозой 2 кГр увеличивает срок хранения до 30 сут, а дозой 4 кГр — до 60 сут при 2°C, что позволяет снабжать немороженой рыбой отдаленные районы страны.

Ионизирующие излучения используют для продления сроков хранения картофеля, лука и других овощей. Установлено, что облучение картофеля дозой от 50 до 150 Гр (в зависимости от сезона) позволяет увеличить срок хранения до одного года и более при 6...8°C вследствие подавления процессов обмена. Радиационная обработка картофеля с помощью ускорителей электронов с энергией 1 МэВ позволяет воздействовать только на поверхностный слой клубня и практически мало влияет на запасающие ткани клубней, в результате чего в них лучше сохраняются питательные вещества. Обработка лука дозой 60 Гр дает возможность хранить его в течение 9...12 мес. без изменения органолептических свойств.

Большие перспективы имеет радиационный метод для продления сроков хранения ягод, фруктов, овощей, особенно быстропортящихся томатов. Доказательством безвредности некоторых облученных продуктов питания служат следующие данные.

Официально разрешенные для потребления продукты питания, подвергнутые лучевой стерилизации.

Для потребления населением в неограниченном количестве:

- картофель — Канада, Дания, Франция, Израиль, Италия, Япония, Нидерланды, Финляндия, Испания, Уругвай, СНГ, США;
- лук — Канада, Израиль, Италия, Таиланд;
- чеснок — Италия;
- пшеничная мука и (или) пшеница — Болгария, Канада, США, СНГ;
- сушеные фрукты — США;
- грибы — Нидерланды;
- концентраты сухофруктов — СНГ.

Для экспериментальных целей:

- картофель — Болгария;
- лук — Болгария, Венгрия, Нидерланды, СНГ;
- свежие фрукты и овощи — Болгария, СНГ;
- сушеные фрукты и сухие пищевые концентраты — Болгария;
- клубника — Венгрия, Нидерланды;
- бобы какао — Нидерланды;
- готовые мясные продукты и полуфабрикаты — СНГ;
- цыплята — Канада, Нидерланды, СНГ;
- рыба — Канада.

Таким образом, радионуклиды и радиационно-биологическую технологию применяют во многих отраслях промышленности, медицины и сельского хозяйства.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность метода «меченых атомов»?
2. Какие конкретные примеры использования радиоизотопных и радиоиммунных методов в животноводстве и ветеринарии вы можете привести?
3. На каких радиобиологических эффектах основано применение ионизирующего излучения в радиационной биотехнологии?
4. Сущность бактерицидного действия радиации и ее применение в сельском хозяйстве.
5. Для каких целей применяется радиационная биотехнология в птицеводстве?
6. На каком эффекте действия излучения основана радиационная технология повышения продуктивности сельскохозяйственных животных?
7. В чем сущность радиоиммунного метода анализа?
8. На чем основано лечебное действие ионизирующих излучений?



ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

РАДИОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОБЪЕКТОВ ВЕТЕРИНАРНОГО НАДЗОРА

Емкость биосферы — величина постоянная. Даже если сброс радиоактивных отходов атомного производства не превышает допустимых пределов, может произойти локальное и глобальное накопление радиоактивных загрязнений в биосфере, главным образом за счет долгоживущих радионуклидов.

Известно, что длительное время источниками повсеместного загрязнения радионуклидами внешней среды были радиоактивные продукты деления (РПД), возникшие при испытательных ядерных взрывах. Радиоактивное загрязнение внешней среды происходит и при эксплуатации промышленных реакторов и атомных электростанций, использовании ионизирующих излучений и радиационной технологии в различных отраслях народного хозяйства. Как показывает опыт эксплуатации атомных электростанций, аварийные ситуации на них также представляют большую радиозоологическую опасность.

На разных этапах ядерного топливного цикла (ЯТЦ) в биосферу, в том числе в сферу сельскохозяйственного производства, поступают различные радионуклиды, биологически активные и способные интенсивно включаться в сельскохозяйственные цепочки. Так, на этапах добычи уранового сырья и его первичной переработки к числу достаточно подвижных можно отнести ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{238}U и некоторые другие тяжелые естественные радионуклиды. При работе атомных электростанций (АЭС) во внешнюю среду проникает очень большое число радиоактивных продуктов деления, среди которых к интенсивно мигрирующим следует отнести

^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs , а также многие нуклиды с наведенной активностью (^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn и др.). При работе радиохимических заводов и захоронении высокоактивных отходов в окружающую среду, помимо продуктов деления и нуклидов с наведенной активностью, поступают долгоживущие трансурановые радионуклиды (^{237}Np , ^{239}Pu , ^{241}Am и др.), которые хотя и не обладают высокой мобильностью в пищевых цепочках, однако относятся к числу высокотоксичных веществ.

Таким образом, радиоактивное загрязнение окружающей среды, как и загрязнение ее отходами современной промышленности и цивилизации, — неизбежный фактор научно-технического прогресса.

Единственное, что необходимо делать, — это контролировать уровень радиоактивной загрязненности внешней среды и принимать меры к его ограничению, а также предотвращать попадание радиоактивных веществ в продукты питания.

Для обеспечения радиационной безопасности животных и сельскохозяйственной продукции создана Система государственного ветеринарного контроля радиоактивного загрязнения объектов ветеринарного надзора — совокупность учреждений, организаций государственной ветеринарной службы и их подразделений, объединенных организационно, методически, однородных по своим задачам. Она разработана с учетом радиационной обстановки, сложившейся в результате аварийных выбросов радиоактивных веществ, на основании анализа данных об уровнях содержания радиоактивных веществ в кормах, сырье и продуктах животного происхождения, оценки размещения радиационно опасных объектов, а также опыта организации и проведения ветеринарного радиологического контроля на территории страны и в районах, пострадавших от радиационных аварий. Система включает сеть ветеринарных радиологических лабораторий, отделов и групп, основными задачами которых являются:

- определение уровней радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции, мощности дозы гамма-излучения, поверхностного альфа- и бета-загрязнения контролируемой продукции и местности;
- государственный ветеринарный надзор за соблюдением предприятиями, организациями, учреждениями,

хозяйствами и гражданами ветеринарно-санитарных требований, обеспечивающих получение и реализацию радиационно безопасной продукции, включая сырье животного происхождения и корма;

- прижизненный контроль содержания радиоактивных веществ в мышечной ткани сельскохозяйственных животных;
- ветеринарно-санитарная экспертиза мяса, субпродуктов и молока в случае острого и хронического лучевого поражения сельскохозяйственных животных;
- проведение радиологических исследований объектов ветнадзора при осуществлении экспортно-импортных операций и арбитражных исследований;
- расчет дозовых нагрузок на сельскохозяйственных животных;
- оценка, анализ радиационной ситуации в животноводстве, прогноз изменения концентраций радионуклидов в основных компонентах пищевой цепи «корм — животное — продукция животноводства»;
- оценка эффективности мероприятий, приемов и методов по снижению содержания радиоактивных веществ в объектах ветнадзора на территориях, пострадавших от радиационных аварий.

Радиоактивность определяют в следующих объектах ветеринарного надзора:

а) в грубых кормах (сено, солома, мякина, полова), концентратах (комбикорм, зернофураж, отруби, жмыхи) и сочных кормах (трава с пастбищ и сенокосов, силос, корнеклубнеплоды, капуста);

б) в сырых продуктах животноводства (молоко, мясо, кости, яйца, рыба и т. п.);

в) в воде открытых водоемов, используемых для поения животных (пруды, озера, реки, колодцы);

г) в кормах и продуктах животного происхождения, ввозимых из-за рубежа.

Для наибольшей объективности получаемой в результате исследований информации о радиационной обстановке области (края, республики) на подведомственной территории выделяется несколько (не менее 7) контрольных пунктов, где

отбирают пробы объектов ветеринарного надзора для радиологических исследований. Этими пунктами могут быть животноводческие хозяйства, фермы, отделения с их кормовой базой и другие хозяйства, типичные для данной области (края, республики), с учетом их географического расположения, местных природных условий (рельеф, тип почв, характер растительности, количество выпадающих осадков) и экономики. Чем более однородны природные, климатические и хозяйственно-экономические особенности области, тем меньше может быть выделено контрольных пунктов на ее территории. При наличии в регионе АЭС или другого радиационно опасного объекта в его зоне или зоне каждого из них устанавливают три контрольных пункта — в санитарно-защитной зоне, зоне наблюдения и зоне контроля. При размещении этих контрольных пунктов учитывают розу ветров. В случае товарного разведения рыбы в прудах-охладителях АЭС устанавливают четвертый дополнительный контрольный пункт.

Контрольные пункты и сроки отбора проб для исследования утверждает главный государственный ветеринарный инспектор области, края, республики.

Контроль за радиоактивностью воздуха и атмосферных осадков осуществляет гидрометеослужба. Поэтому при выборе контрольных пунктов целесообразно согласовать их размещение с контрольными пунктами гидрометеослужбы, чтобы впоследствии получать сведения о радиоактивности осадков, выпадающих в районах этих пунктов.

Размещение предполагаемых контрольных пунктов необходимо согласовать и с работой медицинских радиологических подразделений, выполняющих исследования, близкие к тем, которые проводят ветеринарные радиологические подразделения. Ветеринарные радиологические отделы имеют связь также с агрохимическими лабораториями, которые определяют радиоактивность почвы и растений.

Для получения радиационно безопасной сельскохозяйственной продукции, в том числе сырья и кормов, радиологический контроль осуществляется на всех этапах производства, переработки, хранения, обращения и реализации — предприятиях, в хозяйствах, мясокомбинатах, молокозаводах,

фабриках по первичной обработке шерсти, хладокомбинатах, транспортировании (экспорте, импорте), на рынках.

Контроль за содержанием радиоактивных веществ в сельскохозяйственной продукции зависит от радиационной ситуации и осуществляется в виде планового периодического, планового систематического, внепланового оперативного контроля, сплошного обследования и проверок.

Плановый периодический радиологический контроль осуществляется путем исследования проб объектов ветнадзора, отобранных в контрольных пунктах, хозяйствах, на перерабатывающих предприятиях и рынках по утвержденному графику.

В контрольных пунктах отбираемые пробы исследуют на суммарную бета-активность, содержание стронция-90, цезия-137, свинца-210, калия-40. Кроме того, при отборе проб измеряют мощность дозы гамма-излучения на местности, от отбираемого объекта, а также ежедневно в месте расположения радиологического подразделения.

В хозяйствах плановый периодический контроль проводят для уточнения радиационной ситуации на подконтрольной территории.

На предприятиях перерабатывающей промышленности исследуют пробы на суммарную бета-активность, содержание стронция-90, цезия-137 во всех видах сырья, поступающего на переработку из каждого хозяйства. Исследования проводят двукратно: через месяц после выгона животных на пастбище и через два месяца после постановки на стойловое содержание.

На рынках всю поступающую продукцию подвергают сплошному дозиметрическому контролю и дважды в год проводят радиометрическое исследование каждого вида реализуемой продукции.

Плановый систематический радиологический контроль проводят на территориях, пострадавших от радиационных аварий, путем радиологического исследования проб, отобранных на рынках и предприятиях перерабатывающей промышленности.

При проведении планового периодического и планового систематического радиологического контроля исследованию

подлежат корма: грубые, сочные, концентрированные, корнеклубнеплоды, витаминные подкормки, минеральные подкормки, вода для поения животных; продукция животноводства — молоко, мясо, кости, птица (тушки), яйцо, рыба, мед, шерсть.

Внеплановый оперативный радиологический контроль проводят в хозяйствах, на предприятиях перерабатывающей промышленности, холодильниках, рынках и др. в случае возникновения новых радиационных аварий и при поступлении сельскохозяйственной продукции, в том числе и кормов, из регионов, пострадавших от радиационных аварий.

Сплошное обследование зоны поражения проводят с целью определения спектра выпавших радионуклидов, степени радиоактивного загрязнения объектов ветнадзора и оценки дозовой нагрузки на животных.

Для получения достоверной информации о состоянии объектов сельскохозяйственного производства необходимо осуществить правильный выбор методов радиационного контроля. Методы контроля можно разделить на радиометрические, дозиметрические, спектрометрические и радиохимические.

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ И ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

Активность объектов ветеринарного надзора при радиометрических анализах обычно оценивают или измеряют с помощью альфа- и бета-радиометров. Основным недостатком радиометрических методов — отсутствие возможности проводить достоверные измерения активности без информации о радионуклидном составе пробы.

При радиологических исследованиях существует масса рутинных определений, в задачу которых входит предварительная оценка уровня радиоактивности объектов ветеринарного надзора или выяснение тенденций изменения состояния окружающей среды на подконтрольной территории. Такую работу проще и дешевле выполнить, применяя элементарные методы подготовки проб и обыкновенные радиометрические приборы. Например, радиометрические методы могут быть использованы при оценке суммарной (интегральной)

альфа- и бета-активности проб объектов ветеринарного надзора и отбраковке проб для дальнейшего прохождения на определение радионуклидного состава на γ -, β - и α -спектрометрах. Отбраковка позволяет проводить дальнейшие измерения только тех проб, которые превышают контрольные уровни, установленные для того или иного вида продукции при радиационном контроле на продовольственных рынках, предприятиях перерабатывающей промышленности, проведении радиационной разведки, сортировке партии продукции по уровню гамма-излучения и т. п.

Дальнейшее определение содержания радиоактивных веществ и радионуклидного состава выделенных аномальных (выше порогового уровня) проб происходит более сложными и дорогостоящими методами α -, β - и γ -спектрометрии или радиохимического анализа. Предварительное распределение проб по уровням интегральной активности позволяет оптимизировать радиологические исследования и в сжатые сроки с минимальными затратами получить информацию об аномальных участках или объектах.

При проведении массовых исследований объектов ветеринарного надзора на содержание радиоактивных веществ в условиях радиоактивного загрязнения обширных территорий одним из первых этапов радиационного контроля является определение уровня радиоактивного загрязнения местности, тела животных и различных объектов сельскохозяйственного производства по мощности дозы гамма-излучения от загрязненного объекта.

Для проведения измерений используют приборы, предусмотренные табелем оснащения радиологических подразделений ветеринарной службы (ДРГ-01Т1, ДП-5, ДБГ-01Н, ДКС-96, СРП-68-01 и др.). При ведении радиационной разведки для обследования небольших площадей измерения могут проводить пешие дозиметристы. В случае обследования обширных территорий используют специальные автомобили, на которых смонтированы необходимые приборы (автогамма-съемка). При необходимости может быть использована воздушная гамма-съемка. В каждом конкретном случае необходимо использовать методики радиационного контроля, рекомендованные для проведения тех или иных

измерений. Например, «Методические рекомендации по оценке радиационной обстановки в населенных пунктах», «Инструкция по наземному обследованию загрязненных территорий» и т. п.

Пр и м е р. При измерении уровня радиоактивной загрязненности тел животных, техники, одежды и оборудования необходимо:

1) выбрать участок для проведения измерений на расстоянии 15...20 м от объекта измерения;

2) прибором ДП-5 определить фон на выбранной площадке ($D_{\text{ф}}$);

3) измерить мощность дозы гамма-излучения, создаваемую радиоактивными веществами на поверхности тела животного ($D_{\text{изм}}$), располагая детектор прибора ДП-5 на расстоянии 1...1,5 см от поверхности тела животного (экран в положении «Г»);

4) при установлении радиоактивной загрязненности кожных покровов животных обследовать всю поверхность тела, обращая особое внимание на места наиболее вероятного загрязнения (конечности, хвост, спина);

5) загрязненность техники и оборудования проверяют в первую очередь в тех местах, с которыми соприкасаются при работе люди. Одежду и средства защиты обследуют в развернутом виде, находят места наибольшего загрязнения;

6) рассчитать дозу облучения, создаваемую поверхностью измеряемого объекта по формуле

$$D_{\text{об}} = D_{\text{изл}} - D_{\text{ф}}/K,$$

где, $D_{\text{об}}$ — доза облучения, создаваемая поверхностью обследуемого объекта, мР/ч; $D_{\text{изл}}$ — доза излучения, создаваемая поверхностью объекта вместе с фоном, мР/ч; $D_{\text{ф}}$ — гамма-фон, мР/ч; K — коэффициент, учитывающий экранизирующее действие объекта (для поверхности тела животных он равен 1,2; для автотранспорта и сельхозтехники — 1,5; для средств индивидуальной защиты, продовольственной тары и кладовых — 1,0).

Полученную таким образом величину радиоактивного загрязнения сравнивают с допустимой нормой и делают вывод о необходимости дезактивации.

Наличие радиоактивных веществ внутри организма животных определяют двумя измерениями: с закрытым и открытым окном детектора. Если показания прибора с закрытым и открытым окном детектора одинаковы, обследуемая поверхность не загрязнена радиоактивными веществами. Гамма-излучение проходит через исследуемую поверхность с другой стороны (или из внутренних тканей организма). Если при открытом окне детектора показания больше, чем при закрытом, поверхность тела загрязнена радиоактивными веществами.

После аварии на Чернобыльской АЭС для проведения массовых исследований большого числа проб использовали экспресс-метод определения удельной и объемной активности гамма-излучающих радионуклидов в воде, продуктах питания, продукции растениеводства и животноводства, который основан на измерении мощности дозы гамма излучения от чисто вымытых и измельченных проб массой 0,7 кг (для большинства проб), размещенных в литровой банке или сосуде Маринелли и пересчете ее в единицы активности. Для бета-излучающих радионуклидов измеряли скорость счета частиц от «толстослойных» препаратов с последующим расчетом активности в беккерелях. Предел погрешности измерения в обоих случаях составляет 50%. В настоящее время разработаны приборы, которые позволяют в значительной степени упростить и удешевить процедуру приготовления счетных образцов, уменьшить погрешность измерений.

После оценки радиационной обстановки на загрязненных территориях, определения радиоактивной загрязненности поверхности тела животных и наличия радиоактивных веществ внутри организма следует определить удельную радиоактивность мышечной ткани животных и решить вопрос о возможности убоя животных на мясо. Для этих целей разработан экспресс-метод наружной радиометрии тела животных. Метод основан на коррекции между мощностью дозы гамма-излучения, измеренной в надлопаточной области и в области ягодичных мышц животного, и содержанием радионуклидов цезия-137 в мышечной ткани.

Радиационный контроль мясного сырья и крупного рогатого скота. Цель входного оперативного радиационного контроля мясного сырья и крупного рогатого скота при приемке

на мясоперерабатывающих предприятиях и в хозяйствах — недопущение к производству сырья, использование которого может привести к превышению допустимых уровней содержания цезия-137 и стронция-90 в пищевой продукции, установленных санитарными правилами и нормами.

Объектами входного контроля являются живой скот и все виды мясосырья. Порядок проведения оперативного радиационного контроля мясного сырья и скота устанавливается с учетом радиационной ситуации, сложившейся на территории их происхождения и проводится в виде сплошного и выборочного контроля.

Сплошной оперативный радиологический контроль осуществляют при исследовании мясного сырья и скота, произведенных на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению или подозреваемых в радиоактивном загрязнении. Выборочный контроль осуществляют при исследовании мясного сырья и скота, произведенных на территориях, не подвергшихся радиоактивному загрязнению и не подозреваемых в радиоактивном загрязнении с целью подтверждения радиационной безопасности и однородности партий мясного сырья и скота (при этом выборка составляет до 30% объема контролируемой партии).

При выявлении мясного сырья или скота с содержанием радионуклидов выше *контрольных уровней (КУ)* переходят к сплошному оперативному или полному лабораторному радиологическому контролю.

РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ МЯСНОГО СЫРЬЯ И КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА

Радиационный контроль мясного сырья и скота осуществляется путем оценки соответствия результатов измерения удельной активности цезия-137 в контролируемом объекте контрольным уровням, не превышение которых позволяет гарантировать соответствие контролируемой продукции требованиям радиационной безопасности без измерения стронция-90:

$$(Q/H)^{137}\text{Cs} + (Q/H)^{90}\text{Sr} \leq 1,$$

где Q — удельная активность цезия-137 и стронция-90 в контролируемом объекте; H — нормативы удельной активности цезия-137 и стронция-90, установленные действующими правилами и нормами для мясного сырья.

Если измеренные величины удельной активности цезия-137 превышают значения КУ, то:

- для получения окончательного заключения мясное сырье направляют в государственные лаборатории, где проводят полное радиологическое исследование радиохимическими и спектрометрическими методами;
- животных возвращают на дополнительный откорм с использованием «чистых кормов» и (или) препаратов, снижающих переход радионуклидов в организм животных.

Для всех видов мясного сырья и скота, произведенных на «чистых» и пострадавших от радиоактивного загрязнения территориях и подлежащих радиационному контролю на мясоперерабатывающих предприятиях и в хозяйствах, введены четыре значения контрольных уровней:

$KУ_1 = 100$ Бк/кг — для сельскохозяйственных животных и мясного сырья с костной тканью;

$KУ_2 = 150$ Бк/кг — для мясного сырья, без костной ткани и субпродуктов;

$KУ_3 = 160$ Бк/кг — для крупного рогатого скота, выращенного на территории Брянской области, наиболее пострадавшей от аварии на ЧАЭС (после уоя этих животных костная ткань подлежит обязательному лабораторному контролю на содержание стронция-90);

$KУ_4 = 180$ Бк/кг — для промысловых и других видов животных.

Оценку соответствия результатов измерений удельной активности цезия-137 требованиям радиационной безопасности проводят по критерию непревышения величины допустимого предела.

Результатом измерения удельной активности Q радионуклида цезия-137 является измеренное значение $Q_{изм}$ и интервал погрешности ΔQ .

Если оказывается, что $Q_{изм} < \Delta Q$, то принимается, что $Q_{изм} = 0$, и область возможных значений Q характеризуется соотношением $Q \leq \Delta Q$.

Сырье отвечает требованиям радиационной безопасности, если по критерию непревышения величины допустимого предела удовлетворяет требованию: $(Q \pm \Delta Q) \leq KU$. Такое сырье поступает в производство без ограничения.

Сырье не соответствует требованиям радиационной безопасности, если $(Q + \Delta Q) > KU$. Сырье можно признать несоответствующим требованиям радиационной безопасности по критерию непревышения KU , если $\Delta Q \leq KU/2$. В этом случае следует провести испытание в лаборатории радиационного контроля в соответствии с требованиями МУК 2.6.717-98 для пищевых продуктов.

Для определения удельной активности цезия-137 в мясном сырье и организме животных допускается использование приборов, отвечающих требованиям, предъявляемым к средствам радиационного контроля, внесенных в Госреестр и табель оснащения государственных ветеринарных лабораторий.

Необходимым условием пригодности средств измерений для оперативного контроля удельной активности цезия-137 являются:

- возможность измерения удельной активности цезия-137 в мясном сырье или в организме животных без подготовки счетных образцов;
- обеспечение значения погрешности измерения пробы «нулевой активности» не более $\Delta Q \leq KU/3$ за время измерения 100 с при мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в месте измерения до 0,2 мкЗв/ч.

Для измерений удельной активности радионуклида цезия-137 созданы новые модификации портативных приборов СКС-99 «Спутник» и РСУ-01 «Сигнал-М» (рис. 55) со сцинтилляционным детектором, снабженным свинцовым коллиматором с крышкой, что дает возможность проводить измерения в таких объектах, как туши, полутуши и т. п., подвешенных на крюках, а также прижизненное определение активности цезия-137 в мышечной ткани крупного рогатого скота перед забоем.

Специфичность измеряемых объектов контроля обуславливает особые требования к выбору геометрии измерения и к безопасности.

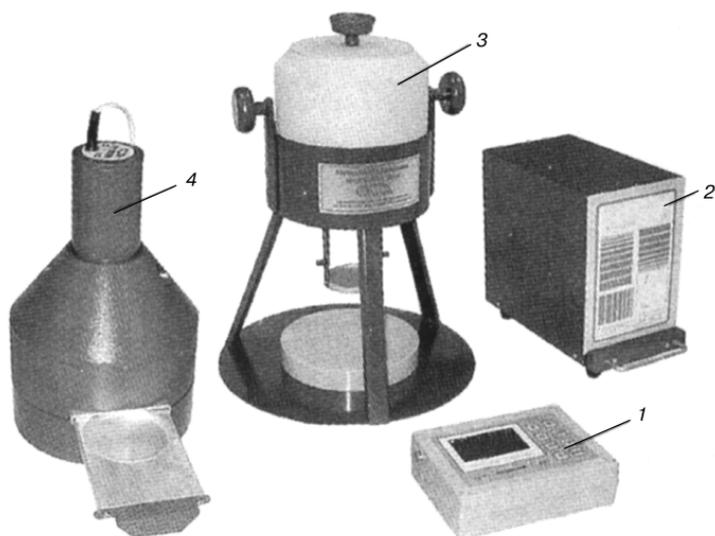


Рис. 55
Портативный спектрометр СКС-99 «Спутник»:

1 — измерительный пульт «Спутник»; 2 — блок детектирования альфа-излучения;
3 — блок детектирования бета-излучения; 4 — блок детектирования гамма-излучения.

Измерение туш, полутуш, четвертин или мясных блоков, сформированных из мышечных тканей одного животного, проводят путем прямого контакта детектора с измеряемым объектом без отбора проб. Для исключения загрязнения детектора его помещают в защитный полиэтиленовый чехол. Использование одного и того же чехла допускается при проведении измерений только одной партии сырья. При измерении отрубов, субпродуктов и птицы измеряемые объекты располагают в поддонах, коробках или других видах тары для создания мясных блоков глубиной ≈ 30 см. Соответственно при измерении туш свиней или мелкого рогатого скота измеряемые объекты следует располагать в виде стоп с суммарной глубиной «по мясу» ≈ 30 см. Таким же образом обеспечивают необходимую глубину при измерении четвертин КРС.

При измерении живого крупного рогатого скота, полутуш и задних четвертин детектор располагают в области заднебедренной группы мышц на уровне коленного сустава между бедренной и берцовой костями; при измерении передних четвертин детектор располагают в области лопатки; при измерении

туш, полутуш и задних четвертин детектор располагают в области ягодичной группы мышц слева или справа от позвоночника, между позвончиком, бедренной костью и крестцом.

Измерение удельной активности цезия-137 в мясосырье и скоте проводят путем прямого контакта детектора с измеряемым объектом без отбора проб. Программное обеспечение данных измерений имеет ряд отличий от стандартного универсального программного обеспечения прибора «Сигнал-М» с учетом специфики измеряемых объектов. Погрешность прижизненного определения удельной активности радионуклидов в мышцах в пределах $3,7 \cdot 10^2 \dots 3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг ($10^{-8} \dots 10^{-7}$ Ки/кг) $\pm 50\%$.

РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ РЫНОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

В настоящее время создана новая модификация радиометров-спектрометров типа РСУ-01 «Сигнал-М» и СКС-99 «Спутник» (рис. 55), в которой учтена специфика проведения измерений в условиях продовольственных рынков, мясо- и молокоперерабатывающих предприятий. Измерение активности цезия-137 в сельскохозяйственной продукции можно проводить в том виде, в котором она поступила в лабораторию на испытания. Основной особенностью радиационного контроля на рынках является необходимость оценки радиационной безопасности большого количества мелких партий продовольствия за короткое время. Поэтому непреложным требованием к радиационному контролю является приготовление счетных образцов прямо из вещества проб без какого-либо концентрирования, и по возможности, без измельчения, гомогенизации и т. п. Эти требования делают принципиально невозможным измерение удельной активности нормируемых радионуклидов по их альфа- или бета-излучению и оставляют возможность проведения радиационного контроля только по гамма-излучению.

В условиях настоящего времени наиболее жесткие нормативы по бета-излучающему радионуклиду стронций-90 для продовольствия биологического происхождения установлены в СанПиН (2.5) по позиции «специализированные

продукты для лечебного питания детей» — 25 Бк/кг по радионуклиду стронций-90 и 40 Бк/кг по радионуклиду цезий-137. В продовольствии биологического происхождения обязательно содержится бета-излучающий естественный радионуклид калий-40 активностью 40...200 Бк/кг. В этих обстоятельствах даже при использовании бета-спектрометрических радиометров погрешность измерения пробы «нулевой активности» по радионуклиду иттрий-90 при времени измерения 1800 с — не менее 70 Бк/кг, т. е. даже в настоящее время осуществление радиационного контроля радионуклида стронций-90 по бета-излучению на рынках практически невозможно. Тем более это проблематично в условиях аварийной ситуации, например при наличии в выбросах бета-излучающих радионуклидов йода-131, цезия-134, а также церия-144, празеодима-144, рутения-106, родия-106.

В то же время, благодаря сравнительно малому самопоглощению в веществе пробы биологического происхождения, гамма-излучение может донести до детектора информацию об удельной активности продовольствия массой до 10 кг и более. Благодаря этому обстоятельству в условиях нашего времени погрешность измерения пробы «нулевой активности» радионуклида цезия-137 для типичных сцинтилляционных гамма-спектрометрических радиометров за время измерения 1800 с составляет (2...5) Бк/кг для счетных образцов объемом не менее 0,5 дм³.

Контроль радиоактивного загрязнения продукции на продовольственном рынке осуществляют путем оценки соответствия измеренной удельной активности цезия-137 в контролируемом объекте контрольным уровням (КУ). Непревышение контрольных уровней в контролируемом объекте позволяет гарантировать их соответствие требованиям радиационной безопасности без измерения удельной активности стронция-90, т. е. гарантировать выполнение условия

$$(Q/H)^{137}\text{Cs} + (Q/H)^{90}\text{Sr} \leq 1,$$

где Q — удельная активность радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в контролируемом объекте; H — нормативы удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr , установленные для данного контролируемого объекта.

При невыполнении данного условия для получения окончательного заключения о соответствии контролируемого объекта требованиям радиационной безопасности проводят полное радиологическое исследование (концентрирование проб, их спектрометрию или радиохимическое исследование) с определением удельной активности каждого радионуклида, присутствующего в пробе.

Полное радиологическое исследование проводят в областной ветеринарной лаборатории или при наличии условий в зональной, межрайонной, районной ветеринарной лаборатории, лаборатории ветеринарно-санитарной экспертизы на продовольственном рынке.

Радиационную безопасность продукции животного и растительного происхождения устанавливают на основании результатов радиационной ветеринарно-санитарной экспертизы.

Опасными признают продукцию животного и растительного происхождения, не отвечающую обязательным требованиям безопасности, установленным санитарными, ветеринарными правилами и нормами.

Заключение о радиационной безопасности контролируемых объектов и путях использования (утилизации, уничтожения) продукции, не отвечающей этим требованиям, выдают ветеринарные врачи (ветврачи-радиологи) на основании результатов ее экспертизы.

Для всех видов продукции животного и растительного происхождения, подвергаемых радиационному контролю на продовольственных рынках, введены три значения контрольных уровней, для трех видов продукции.

$KУ_1 = 20$ Бк/кг — для всех видов продукции, в которых нормируемое содержание цезия-137 должно быть меньше 80 Бк/кг ($H^{137}Cs < 80$ Бк/кг);

$KУ_2 = 40$ Бк/кг — для продукции, в которой содержание цезия-137 находится в пределах от 80 до 400 Бк/кг ($80 \leq H^{137}Cs < 400$ Бк/кг);

$KУ_3 = 100$ Бк/кг — для продукции, в которой содержание цезия-137 равно или больше 400 Бк/кг ($H^{137}Cs \geq 400$ Бк/кг).

Оценку соответствия результатов исследований требованиям радиационной безопасности проводят по результатам измерения удельной активности радионуклидов цезия-137

или йода-131 ($Q_{\text{изм}}$) и абсолютной погрешности (ΔQ). Соответственно верхняя граница области возможных значений Q равна ($Q_{\text{изм}} + \Delta Q$), и в общем виде Q характеризуется соотношением: $Q \leq Q_{\text{изм}} + \Delta Q$. Если $Q_{\text{изм}} < \Delta Q$ из-за флуктуаций фона радиометрической установки, то $Q_{\text{изм}}$ принимается равным 0 ($Q_{\text{изм}} = 0$) и область возможных значений Q характеризуется соотношением: $Q \leq \Delta Q$.

Продукция отвечает требованиям радиационной безопасности, если $(Q_{\text{изм}} + \Delta Q) \leq \text{КУ}$. Такую продукцию реализуют на рынке без ограничений. Если $(Q_{\text{изм}} + \Delta Q) > \text{КУ}$, то продукцию нельзя признать соответствующей требованиям радиационной безопасности.

По результатам испытаний продукцию можно признать несоответствующей требованиям радиационной безопасности, если $\Delta Q \leq \text{КУ}/2$. В этом случае следует провести исследование данной продукции в лаборатории радиационного контроля в полном соответствии с требованиями методических указаний МУК 2.6.1.717-98 для пищевых продуктов и ветеринарными правилами для кормов (ВП 13.5.13-00).

СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

До аварии на ЧАЭС контроль за активностью цезия-137 и стронция-90 в продукции животноводства и растениеводства основывался на селективной радиохимической экстракции цезия и стронция из вещества проб с измерением активности каждого радионуклида в соответствующих счетных образцах на бета-радиометрических установках (например, УМФ-1500, ДП-100 и т. п.) После аварии на ЧАЭС необходимый объем измерений возрос настолько, что осуществление на этой аппаратурно-методической основе массового контроля оказалось невозможным, в первую очередь из-за ограничений, обусловленных слишком большой продолжительностью и трудоемкостью химических процедур приготовления счетных образцов.

Выходом явилось использование компьютеризированных гамма-, бета-спектрометрических комплексов (далее — Комплексы). Применение спектрометров позволяет в значитель-

ной степени упростить и удешевить процедуры приготовления счетных образцов, а возможности современной вычислительной техники, реализованные в программном обеспечении, позволяют автоматизировать обработку спектрограмм, все вычисления значений удельной активности, их погрешности и т. д. В методическом обеспечении сохраняются апробированные традиционные способы предварительного отбора проб, принятые в различных ведомствах, а методики приготовления счетных образцов изменены для использования возможностей спектрометрических методов радиометрии. Внедрение Комплексов в систему измерений лабораторий радиационного контроля помогло обеспечить работу по соблюдению требований ВДУ-93 к содержанию цезия-137 и стронция-90 в продовольствии. Действие ВДУ-93 закончилось в связи с переходом к новым нормам радиационной безопасности (НРБ). В соответствии с НРБ разработаны нормативы допустимых уровней удельной активности цезия-137 и стронция-90 в различных видах продовольствия, вошедшие в «Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.3.2.560-96».

Следует подчеркнуть, что при определении соответствия продовольствия требованиям радиационной безопасности задача испытаний сводится лишь к получению однозначного ответа на вопрос: «Удовлетворяет это продовольствие критериям радиационной безопасности или нет?», и при этом не ставится задача определения истинных значений удельной активности радионуклидов с максимальной точностью.

Спектрометрические методы делят на: гамма-, бета- и альфа-спектрометрические методы. Наиболее широко распространены гамма-спектрометрические методы. Бета-спектрометрические методы на практике не используют, так как расшифровка бета-спектров — трудная задача в прикладной спектрометрии ионизирующих излучений. Однако если известен радионуклидный состав, то этот метод используют на практике. Альфа спектрометрия применяется при работе с естественной радиоактивностью.

ОТБОР И ПОДГОТОВКА ПРОБ

Отбор проб. Перед отбором проб объектов ветеринарного надзора для исследования устанавливают однородность партии продукта по мощности дозы гамма-излучения. Партию продукции считают однородной по уровню радиоактивного загрязнения, если результаты измерений для разных точек исследуемой партии различаются не более чем в 3 раза.

Взятие проб материала для радиологического исследования осуществляют в строгом соответствии с методическими рекомендациями и нормативными документами Минсельхоза, Минздрава, Госстандарта России.

Для лабораторных исследований из объединенной пробы продукции берут ее часть — среднюю пробу, которая характеризует радиоактивное загрязнение всей партии.

Масса средней пробы зависит от степени радиоактивного загрязнения контролируемого материала, предполагаемого метода исследования, чувствительности измерительной аппаратуры, требуемой точности измерения.

При гамма-радиометрии ^{137}Cs экспресс-методом и активности контролируемой продукции более $5 \cdot 10^{-10}$ Ки/кг масса средней пробы составляет 0,5...1,0 л (кг). При гамма-спектрометрии цезия-137 в нативном материале и активности $n \cdot 10^{-12}$... $5 \cdot 10^{-10}$ Ки/кг (л) — 0,3...1,0 л (кг), в зольном остатке — 1,0...3,0 л (кг), радиохимическом анализе — 0,2...3,0 л (кг).

Подготовка проб к измерениям. Первичная подготовка проб к измерениям включает в себя обычную обработку пищевых продуктов.

Корнеплоды, клубнеплоды, фрукты, пищевую зелень, мясо, рыбу и т. п. промывают проточной водой, удаляют несъедобные части продуктов, с колбасных изделий, сыра снимают защитную оболочку, измельчают с помощью ножа, мясорубки, ножниц и т. д.

Вязкие продукты (сгущенное молоко, мед, джемы и т. п.) при необходимости можно разбавлять водой, определив и зафиксировав исходную массу и объем приготовленной смеси. Подготовленную пробу размещают в выбранной измерительной кювете (например, сосуде Маринелли), которую взвешивают до и после заполнения для определения массы образца.

Исходя из чувствительности выпускаемых в настоящее время гамма-спектрометров (минимальная измеряемая активность 3...10 Бк), при измерении ^{137}Cs целесообразно использовать метод измерения нативных проб 0,5...1 л. При этом обеспечивается приемлемая погрешность получаемого результата. Для концентратов и сухих продуктов (молоко сухое, сухие овощи, фрукты, ягоды, грибы, чай, рыба сушеная и т. п.), а также дорогостоящих продуктов со значением допустимого уровня активности более 130 Бк/кг (приправы, кофе, дорогостоящая рыба, икра и т. п.) возможно измерение в сосудах Маринелли 0,5 л и чашках Петри. При измерении нативной пробы в программу вводят только массу счетного образца.

В тех случаях, когда чувствительности гамма-спектрометра не хватает для получения достоверного результата в нативных пробах, проводят термическое концентрирование радионуклидов в пробах (выпаривание, высушивание, обугливание, озоление) с последующим измерением полученного концентрата.

Универсальным способом приготовления счетных образцов является сухая минерализация. Она основана на полном разложении органических веществ путем термической обработки пробы при контролируемом температурном режиме и состоит из трех последовательных этапов — высушивания, обугливания и озоления. На каждом этапе степень концентрирования радионуклидов увеличивается. Высушивание измельченных и взвешенных проб растительного происхождения до постоянной массы проводят в сушильном шкафу при температуре 80...100°C. Для обезвоживания жидких образцов во избежание их разбрызгивания рекомендуется применять инфракрасные лампы или песчаные бани.

Пробы молока подкисляют соляной или уксусной кислотой, упаривают в фарфоровых чашках под инфракрасными лампами до сухого остатка, постепенно добавляя в них очередные порции молока. Высушивание заканчивают в сушильном шкафу при температуре 100°C до постоянной массы сухого остатка.

Пробы мяса, отделенные от жира, сухожилий и костей, сушат до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 80...100°C.

Кости отделяют от мягких тканей, костного мозга и сушат в сушильном шкафу при температуре 100...150°C в течение 2...3 часов.

После установления постоянной массы пробы сухой остаток обугливают путем прокаливания на электорплитках или песчаных банях в вытяжном шкафу. Во избежание потери летучих радионуклидов не допускается воспламенения пробы. Для интенсификации процесса обугливания одновременно допускается обогрев чашки с пробой инфракрасной лампой. Процесс обугливания считается законченным при прекращении вспучивания пробы и исчезновении дыма.

Обугленные сухие остатки озоляют в муфельных печах при температуре 400°C.

Основные достоинства термического концентрирования активности проб путем сухой минерализации — универсальность и сравнительная простота процедур. Характерные недостатки — большая продолжительность, энергоемкость и отвратительные запахи, сопровождающие обугливание и озоление некоторых видов продовольствия (молоко, мясо и др.).

Разработаны специальные методики экспрессного химического концентрирования активности стронция, иттрия и цезия для некоторых видов продовольствия, не требующие сжигания вещества проб, и в то же время позволяющие в полной мере использовать преимущества бетта-спектрометрического способа определения активности стронция-90 и гамма-спектрометрического способа определения активности цезия-137.

Для жиров, молока, молочных продуктов, мяса, мясных продуктов приготовление счетных образцов оказывается более удобным, быстрым, менее трудоемким и дорогостоящим, чем обугливание или озоление.

ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Реализация радиационного экологического мониторинга предъявляет жесткие требования к методам анализа и γ -спектрометрической аппаратуре для определения радионуклидного состава и измерений активности в объектах окружающей среды. Эти требования выражаются в необходимости обеспечить как большой объем измерений, так и определенную точность и достоверность. Известно, что удельная актив-

ность радионуклидов в объектах окружающей среды очень мала: не превышает $10^{-10} \dots 10^{-12}$ Ки/кг, а в фоновых пробах еще меньше или такого же уровня.

Для достоверности измерений значение удельной активности в пробах окружающей среды необходимо определять с погрешностью не меньше 50%. Измерить указанные значения активности с такой погрешностью с помощью простых средств измерений не удастся, поэтому используются специальные аппаратные комплексы и методы, основные характеристики которых рассматриваются ниже.

Существует несколько методов измерения энергетического распределения фотонного излучения. Наибольшее распространение получили в прикладной γ -спектрометрии сцинтилляционный и ионизационный методы.

Материалом сцинтилляционного детектора в γ -спектрометрии чаще всего являются кристаллы йодистого натрия, активированного таллием $\text{NaI}(\text{Tl})$, йодистого цезия, активированного таллием $\text{CsI}(\text{Tl})$, а также пластические сцинтилляторы.

Детекторы из $\text{NaI}(\text{Tl})$ имеют высокую эффективность к γ -излучению из-за возможности выращивания кристаллов больших размеров (300 мм и более). В практике исследований используются сцинтилляторы размером от 63×63 до 150×300 мм с колодцами и без них. Применение колодцев в сцинтилляторе позволяет увеличить эффективность регистрации γ -излучения почти до 100%.

Детекторы, выполненные из кристаллов $\text{CsI}(\text{Tl})$, используются реже из-за более низкого разрешения, чем у кристаллов $\text{NaI}(\text{Tl})$.

Пластические сцинтилляторы имеют очень низкое энергетическое разрешение и почти не разделяют γ -кванты по их энергии. Эти сцинтиллирующие вещества дают возможность создавать очень большие по объему (до 1 м^3) детекторы.

Ионизационный метод основан на измерении степени ионизации, возникающей в чувствительной области детектора при взаимодействии с ним γ -излучения. В γ -спектрометрии при использовании этого метода обычно применяют полупроводниковый детектор (ППД). Он представляет собой полупроводниковый диод, на который прикладывается обратное напряжение. Чувствительная область ППД — высокоомный

слой полупроводника, в котором происходит взаимодействие γ -излучения и чувствительного объема этого детектора. Обычным материалом для ППД служит Ge (германий).

Высокий уровень шумов в германиевых детекторах позволяет использовать их только при низких температурах (температура жидкого азота).

Площадь фотопика — показатель количества событий взаимодействий γ -квантов с веществом детектора — пропорциональна активности радионуклида. Гамма-спектрометрические детекторы характеризуются следующими основными параметрами: энергетическим разрешением, эффективностью регистрации, максимальной входной нагрузкой.

Энергетическое разрешение сцинтилляционных спектрометров определяется статистическими флуктуациями процессов возбуждения света в сцинтилляторе, фокусировкой света на фотокатод, выходом электронов из фотокатода, собиранием фотоэлектронов на первом диноде ФЭУ, коэффициентом размножения в системе динодов и шумами электронной аппаратуры.

Эффективность регистрации (ε) — это отношение количества зарегистрированных γ -квантов к активности источника в единицу времени, она рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{N}{t \times A},$$

где t — время набора спектра; N — площадь спектра; A — активность источника.

Максимальная входная нагрузка — зависимость изменения формы аппаратурного спектра при увеличении потока γ -квантов. В случае анализов низкоактивных проб окружающей среды изменением данного параметра можно пренебречь.

Если сравнивать ППД и сцинтилляционный детектор по их техническим характеристикам, а именно по энергетическому разрешению и эффективности, то можно отметить, что за счет различных физических процессов в детекторах разрешение ППД приблизительно на два порядка выше, чем в сцинтилляционных детекторах. Но в то же время эффективность регистрации сцинтилляционного детектора гораздо выше, чем у ППД. В настоящее время появились полупроводниковые де-

детекторы из особо чистого Ge (ОЧГ) с эффективностью регистрации сцинтилляционного кристалла объемом приблизительно 80×80 мм. При регистрации фотопиков с близкими энергиями улучшение разрешения в 2 раза приводит к увеличению фотоэффективности в 8 раз. В связи с этим, имея гораздо лучшее разрешение и соизмеримую эффективность, в настоящее время при проведении радиационного контроля объектов окружающей среды ППД вытеснили из большинства аналитических лабораторий детекторы на основе $\text{NaI}(\text{Tl})$, оставив за последними рутинные оценочные измерения. Надо отметить, что сцинтилляционные детекторы из-за возможности получения кристаллов большого объема нашли применение в построении специальных γ -спектрометров со схемами антисовпадений. Суть метода защиты антисовпадениями состоит в том, что основной детектор-анализатор, обычно это полупроводниковый детектор, облучаемый исследуемым источником γ -излучения, максимально возможно окружают дополнительным защитным детектором, который выполняют на основе детектора $\text{NaI}(\text{Tl})$ большого объема. Назначение защитного детектора состоит в том, что он регистрирует γ -кванты, которые подверглись в детекторе-анализаторе комптоновскому рассеянию. Сигналы от защитного детектора закрывают вход многоканального анализатора для импульсов, одновременно зарегистрированных в основном детекторе-анализаторе.

Минимально детектируемая активность. Основной характеристикой для спектрометрических и радиометрических установок является минимально детектируемая активность (МДА), величина которой определяет чувствительность анализа. Значение МДА зависит от типа детектора, эффективности регистрации γ -квантов, времени измерения пробы, относительной погрешности измерения. Главная проблема определения содержания радиоактивности в пробах окружающей среды состоит в низком содержании активности в этих пробах, кроме того, результаты измерений для достоверности должны обладать точностью не менее 50%, поэтому приходится использовать дорогие, но чувствительные электронно-физические измерительные комплексы с детекторами, которые позволяют решать поставленные задачи. Для γ - и рентгеновских спектрометров это полупроводниковые детекторы

большого объема из особо чистого Ge и планарные низкоэнергетические детекторы с максимальной площадью входного окна (более 600 мм²), задача которых с максимальной чувствительностью анализировать всю энергетическую шкалу γ -квантов, начиная от 2 кэВ до 2 МэВ и выше.

Для проб с низким содержанием радиоактивности основным источником погрешностей служат статистические флуктуации. Даже при большом времени измерения их величина может оказаться недопустимой, что влияет на МДА. Кроме этого, если в пробе присутствуют большие и малые активности разных радионуклидов, то определение прямым методом малых активностей на фоне больших становится затрудненным. Поэтому сверхнизкие концентрации радионуклидов в пробах окружающей среды определяют после концентрирования или радиохимического выделения.

Сцинтилляционный метод позволяет измерять активность радионуклидов в пробах с основной относительной погрешностью в диапазоне 10...50%.

Нижний предел измеряемой минимальной детектируемой активности (МДА) определяется при аттестации сцинтилляционного γ -спектрометра и составляет величину 1...100 Бк/пробу.

Методика рассчитана на равномерное распределение радионуклида по объему пробы, поэтому она должна быть тщательно перемешана и измельчена. При измерении удельной активности продуктов питания их подвергают очистке или мытью, как на первом этапе приготовления пищи, для удаления возможного поверхностного загрязнения.

При выборе измерительной кюветы необходимо учитывать объем подготовленной на анализ пробы, ожидаемый уровень радиоактивного загрязнения, время и погрешность измерения.

Перед измерениями необходимо убедиться, что интегральный фон γ -спектрометра не увеличивается более чем на 10% при размещении пустой кюветы в защите детектора, что будет являться свидетельством радиационной чистоты кюветы.

Заполнение измерительной кюветы до нужного объема проводят, используя заранее нанесенные на поверхности кюветы метки либо отмеривая объем мерной посудой. Объем заполнения должен соответствовать номинальному значению

кюветы с погрешностью не более $\pm 10\%$. Массу пробы определяют взвешиванием до и после заполнения кюветы с погрешностью не более $\pm 2\%$. Плотность пробы — путем деления массы на ее объем.

Для регистрации гамма-излучения от счетного образца используется гамма-спектрометрический тракт со сцинтилляционным блоком детектирования (СБД), который включает в себя сцинтиллятор, фотоэлектронный умножитель с делителем высокого напряжения и спектрометрический усилитель импульсов. СБД располагается в свинцовом защитном экране. Для проведения калибровки γ -спектрометра по энергии и контроля за сохранностью параметров установки используют комбинированный источник $^{137}\text{Cs} + ^{40}\text{K}$, который входит в состав спектрометра.

С целью преобразования аналогового спектрометрического сигнала, поступающего с выхода детектора, в цифровой применяют амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП). Управление работой АЦП осуществляется при помощи специальных программ, входящих в состав программного пакета «Прогресс».

Обработку спектров, расчет активности и погрешности производят на ПЭВМ с использованием программного пакета «Прогресс».

Перед вводом в эксплуатацию гамма-спектрометрического тракта проводят его метрологическую аттестацию, основными характеристиками которой являются: энергетический диапазон, чувствительность для каждого из измеряемых радионуклидов, зависимость чувствительности и эффективности регистрации гамма-квантов от энергии, минимально измеряемая активность и контрольная скорость счета от калибровочного источника в определенном энергетическом интервале. Значения чувствительности заносятся в программу матричной обработки в виде матрицы.

БЕТА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Основным достоинством бета-спектрометрического анализа проб является проведение измерений при минимальном процессе их подготовки. Причем анализ на бета-спектрометре позволяет выделить весь набор бета-излучателей в пробе,

тогда как радиохимическое выделение нуклидов, как правило, представляет собой селективный длительный многостадийный процесс с использованием дорогостоящих реактивов. Бета-спектрометрия может применяться для определения активности бета-излучающих радионуклидов, таких как ^3H , ^{14}C , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{55}Fe и др.

Необходимо отметить, что использование бета-спектрометрии для расшифровки радионуклидного состава — трудная задача в прикладной спектрометрии ионизирующих излучений. Трудности заключаются в сложности идентификации непрерывных спектров бета-излучений, которые возникают в связи с одновременной регистрацией рентгеновского, гамма-излучений и комптоновских электронов. Кроме этого, имеет место эффект обратного рассеивания электронов, а при регистрации энергии электронов выше 1000 кэВ — эффект тормозного излучения. В настоящее время известны методы, позволяющие аппаратными способами ослабить побочные явления и уменьшить искажения бета-спектра, но даже и при этих условиях получение достоверной информации радионуклидного состава проб при расшифровке бета-спектров остается сложной задачей.

Известен метод расшифровки бета-спектров, появление которого связано с развитием вычислительной техники. Он позволил решить проблему применения бета-спектрометрии для измерения содержания радионуклидов в различных компонентах окружающей среды. Данный метод дает возможность оперировать с большими массивами радиоэкологической информации при обработке результатов измерений в комплексе аппаратно-программных средств.

АЛЬФА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Если анализ и идентификация радионуклидов в пробах объектов ветеринарного надзора по γ -излучению нашли широкое применение при определении радионуклидного состава пробы, то определение активности радионуклидов на спектрометрах α -излучения из-за сложности радиохимического анализа, обслуживания спектрометров не получило широкого распространения. Вследствие этого α -спектрометрию ис-

пользуют, как правило, в ограниченных сферах научных исследований. Большинство α -излучающих радионуклидов относится к группе А радиационной опасности, и к ним должны применяться наиболее жесткие требования, которые зафиксированы в нормах радиационной безопасности (НРБ-99). Отсюда следует, что определение содержания альфа-излучающих нуклидов в объектах окружающей среды — это важная задача радиэкологического контроля.

В научно-производственной деятельности большой интерес представляет определение низких и сверхнизких содержаний α -излучающих радионуклидов в объектах окружающей среды. Данная проблема может быть решена наиболее приемлемым методом определения количественных и качественных характеристик проб внешней среды с помощью α -спектрометров. Несмотря на сложность α -спектрометрического анализа, информация, получаемая при его использовании, часто уникальна и не достигается другими методами при идентификации и определении количественных характеристик α -нуклидов проб окружающей среды естественного и техногенного происхождения.

В прикладной α -спектрометрии в основном используют α -спектрометры с ионизационными камерами и в последнее время специальные полупроводниковые детекторы.

Обычный материал для полупроводниковых детекторов — Si с тонкой чувствительной областью, способной регистрировать α -излучение с энергией до 10 МэВ.

Применение полупроводниковых α -детекторов упростило эксплуатацию α -спектрометров, помогло повысить производительность α -анализов. Развитие современных технологий по производству полупроводниковых α -детекторов, так называемая PIPS-технология, позволило сравнять и перекрыть технические характеристики ионизационных α -камер.

Влияние на энергетическое разрешение полупроводниковых α -спектрометров оказывает вылет α -частиц под различными углами к поверхности детектора. Это влияние можно ослабить, устанавливая коллиматор между источником и детектором, чтобы α -частицы попадали на чувствительную область детектора под углами, близкими к 90° .

Компенсация потерь энергий α -частиц от взаимодействия с молекулами воздуха в блоке детектирования достигается путем обеспечения откачки воздуха в области «детектор – проба». Обычно вакуумирование происходит при использовании вакуумного насоса в схеме α -спектрометра.

На практике приходится измерять пробы низкой и сверхнизкой активности и для получения достоверной информации о содержании в пробе α -радионуклидов при наборе площади пика полного поглощения α -спектра, время измерения при этом увеличивается — оно может достигать более 100 ч. В данном случае на первое место выходит фактор температурной (временной) нестабильности. Нестабильность измерительного тракта приводит к увеличению энергетического разрешения и смещения пика полного поглощения на энергетической шкале α -спектрометра.

Влияние температурной нестабильности можно ослабить, применяя температурно-стабильные линейные измерительные блоки и оборудовав аналитические лаборатории кондиционерами для температурной стабилизации воздуха в помещении. Для особо точных измерений применяют системы термостабилизации, где измерительные блоки помещают в специальные термостаты, которые локально поддерживают постоянную температуру.

РАДИОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

Радиохимический метод состоит из нескольких неразрывно связанных стадий: отбор и подготовка проб исследуемых объектов; внесение носителей и минерализация проб; выделение радионуклидов из проб; очистка выделенных радионуклидов от посторонних нуклидов и сопутствующих макроэлементов; идентификация и проверка радиохимической чистоты; радиометрия выделенных радионуклидов; расчет активности и составление заключения.

Отбор проб проводят сотрудники радиологических отделов, другие лица (специалисты районных лабораторий) только после подробного инструктажа о правилах отбора и транспортировки проб с последующим периодическим их контролем. Для отбора проб за каждым радиологическим отделом

закрепляется не менее семи контрольных пунктов (сельскохозяйственное предприятие, ферма и др.), типичных для данной области, с учетом их географического расположения, местных природных условий (рельеф, тип почв, характер растительного покрова, количество выпадающих осадков, роза ветров) и экономики.

Образец пробы должен быть типичным для исследуемого объекта, а масса (объем) достаточной, чтобы после концентрирования получить массу золы, необходимую для проведения радиохимического анализа (20...40 г). Нормы и сроки отбора проб приведены в табл. 33.

При отборе проб в контрольных пунктах измеряют гамма-фон прибором ДРГ-01Т1 или СРП-68-01 на расстоянии 0,7...1 м от почвы и 1...1,5 см от скирды, бурта, туши животных, рыбы и шерсти. Данные гамма-фона записывают в сопроводительном документе.

Таблица 33

**Сроки и нормы отбора проб объектов ветнадзора
для исследования на радиоактивность**

Объект	Сроки отбора проб	Число проб	Масса (объем)
Трава	Весна, лето, осень	20...25	3...4 кг
Грубые корма	Осень	20...30	2...3 кг
Силос, сенаж	В период скармливания животным	10...15	4...5 кг
Корнеклубнеплоды	Осень	10...15	2...3 кг
Концентрированные корма	Осень	20...30	
Молоко	Ежеквартально	20	5...6 л
Мясо	Весна, осень	20	2...3 кг
Кости	То же	20	0,5 кг
Рыба свежая	По мере поступления	5	3,0 кг
Птица	По мере поступления	10	1 штука
Яйцо	То же	10	10 штук
Мед	То же	10	0,2...1,0 кг
Шерсть	То же	5	0,2...0,5 кг
Вода	Весна, осень	3	10,0 л

Исследования взятых проб проводят прежде всего на наличие радионуклидов ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{89}Sr , ^{90}Sr , U , Pu , ^{140}Ba , ^{91}Y , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{95}Zr , которые определяют во всех объектах ветнадзора: ^{131}I — в течение 2...3 мес. после выпадения радиоактивных осадков; ^{140}Ba — 3...4 мес.; ^{91}Y , ^{89}Sr , ^{141}Ce , ^{95}Zr — 2 лет; ^{144}Ce , ^{106}Ru — 5 лет; ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , U , Pu , Pb — постоянно.

Для получения оперативной информации о степени загрязненности объектов ветеринарного надзора определяют суммарную бета-активность экспресс-методом в толстом слое при удельной активности проб $\leq 3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг (л) [$1 \cdot 10^{-7}$ Ки/кг (л)] и в зольном остатке при удельной активности $\leq 3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг (л) [$1 \cdot 10^{-8}$ Ки/кг (л)].

При радиоактивном загрязнении сельскохозяйственных угодий в результате незапланированных выбросов (аварий) на предприятиях ядерно-энергетического цикла усиливают радиационный контроль за объектами ветеринарного надзора. Массу (объем) отбираемых для исследований проб уменьшают в 2...3 раза, а частоту отбора увеличивают.

Пробы травы (1...2 кг) отбирают 2 раза в месяц в первый год радиоактивного загрязнения и 1 раз в месяц в последующие годы. Пробы сена, соломы, сенажа (1...2 кг), корнеклубнеплодов (1...2 кг) и концентрированных кормов (1...2 кг) отбирают при закладке их на зиму и при исследовании рационов. Зернофураж и солому отбирают одновременно в одних и тех же отделениях хозяйств. Силос исследуют только при поступлении его в рацион животным. Пробы воды (2...3 л) из рек, озер, прудов и других источников берут в местах водопоев 1 раз в месяц только в весенний, летний и осенний периоды. Молоко (1...2 л) берут не реже 2 раз в месяц в первый год радиоактивного загрязнения территорий, а в последующие годы — 1 раз в месяц.

Мясо (1...2 кг), внутренние органы (0,5...1 кг), кости (0,5 кг) животных разных возрастов и видов отбирают непосредственно в контрольных хозяйствах в период убоя, но не реже 4 раз в год (зимой, весной — перед выгоном животных на пастбища или началом дачи зеленых кормов, в середине лета и осенью — перед переходом на зимний рацион). Отбор проб на мясокомбинатах проводят только от партий

скота контролируемого района. Пробы мяса птиц (1 тушка) и яиц (10 штук) берут ежемесячно в период массового убоя и сдачи в торговую сеть. Рыбу (1...2 кг) отбирают целыми экземплярами одновременно с пробами воды (2...3 л) в период массового отлова, мед (0,2...0,3 кг) — перед сдачей на заготовительные базы или в торговую сеть.

Компоненты рационов кормления животных, в том числе птицы, отбирают одновременно с продукцией животноводства в первый год ежемесячно, а в дальнейшем — 1 раз в 2 месяца.

В контрольных пунктах одновременно с отбором проб измеряют мощность дозы естественного гамма-фона радиации в данной местности. Создается он в приземном слое атмосферы за счет космического излучения и радиоактивности верхних слоев Земли. Величина мощности дозы естественного фона на земной поверхности при отсутствии дополнительного загрязнения искусственными радионуклидами составляет 30...250 нГр/ч. Средний уровень 100 нГр/ч. На него ориентируются при отборе проб. Такие измерения нужны для радиационной характеристики данного района и своевременного выявления случайных радиоактивных загрязнений.

Места измерения мощности дозы гамма-фона определяют не ближе 100 м от зданий, чтобы избежать влияния радиоактивности строительных материалов этих зданий. Участок измерения фона должен быть удален примерно на 100 м от проезжих дорог и лесных массивов. Так как фон в течение суток меняется, его измеряют на открытой местности в каждом контрольном пункте в одни и те же часы. Чувствительный элемент дозиметра располагают на расстоянии 1 м от поверхности земли. При каждом измерении гамма-фона мощность дозы определяют в трех точках на расстоянии 100...200 м одна от другой. Средний показатель регистрируют в рабочем журнале и записывают в сопроводительном документе.

В случае повышения гамма-фона в 2 раза и более необходимо немедленно в установленном порядке сообщить об этом в вышестоящие государственные ветеринарные учреждения и СЭС. Одновременно проводят внеплановый отбор проб объектов ветеринарного надзора и исследуют их на загрязненность.

Для измерения мощности дозы естественного фона пользуются радиометрами ДРГ-01Т1, СРП-68-01, ДП-5А или другими приборами достаточной чувствительности.

При отборе проб необходимо соблюдать определенные правила.

Отбор проб травы проводят как на низинных, так и на горных пастбищах и сенокосах, удаленных от дорог не менее чем на 200 м. Траву срезают на трех участках, расположенных по треугольнику и отстоящих один от другого примерно на 50...100 м. Пробу взвешивают, записывают сырую массу и помещают в целлофановый мешок.

Пробы сена, соломы, мякоти, половы, концентрированных кормов отбирают при закладке их на зимнее хранение. Пробу усредняют, взвешивают и помещают в матерчатый или целлофановый мешок или в бумажный пакет.

Овощи и корнеклубнеплоды исследуют, как правило, в период уборки, отбирая усредненные пробы (по несколько экземпляров из разных слоев бурта или ящиков в одну пробу). Очищенные от земли и вымытые, их обрабатывают как одну пробу.

Пробы мяса берут из нежирной части туши, не снижая ее товарных качеств. Для анализа можно использовать мышцы шеи или конечностей. Однотипность отбираемых проб позволяет сопоставить получаемые результаты при исследовании мяса разных видов, возрастов и пород животных.

Однотипность следует соблюдать и при отборе проб костей, так как отложения остеотропных радионуклидов (например, стронция) неравномерны не только в разных участках одной и той же кости. Для исследования удобно брать последние ребра и шейные позвонки.

Для исследования мяса птицы берут 1 тушку, а при небольшой массе — 3...4 тушки, отделяют мясо от костей и делают среднюю пробу. Мышцы и кости исследуют отдельно.

Рыбу для анализа отбирают целыми экземплярами, если она мелкая (при массе до 0,5 кг), а от крупной берут отдельные части (голова с частью тушки, часть туши с позвоночником). Надо учитывать, что наибольшую концентрацию радионуклидов обнаруживают в жабрах, плавниках и чешуе, поэтому проба во всех случаях должна быть усредненной.

Чтобы не допустить порчи мяса, костей при доставке в радиологический отдел или при хранении, их консервируют. Пробы завертывают в несколько слоев марли, сильно смоченной 4...5% -ным раствором формальдегида, или помещают в плотно закрывающиеся банки (полиэтиленовые мешки), куда вкладывают большой тампон ваты (фильтровальной бумаги), смоченной 40% -ным раствором формальдегида. Целые тушки птицы и рыбы можно консервировать путем инъектирования в них из шприца 5% -ного раствора формальдегида.

Яйца отбирают из одного птичника от птиц, содержащихся на одном рационе и в одинаковых условиях. Для анализа берут 20...40 яиц, объединяют в усредненную пробу. Всю пробу перед анализом разъединяют на съедобную часть (белок и желток) и скорлупу, которые исследуют отдельно. Яйца транспортируют в целом виде в упаковке, обеспечивающей их сохранность.

Пробы воды из рек, прудов, озер отбирают у берегов в местах водопоя животных. Если водоем глубокий, то берут 2 пробы: с поверхности и на расстоянии примерно 0,5 м от дна (чтобы не захватить донные отложения). Пробы помещают в чистые бутылки, предварительно ополоснув их исследуемой водой. Чтобы понизить адсорбцию радиоизотопов на стекле, воду подкисляют азотной или соляной кислотой до слабокислой реакции.

Молоко перед взятием пробы тщательно перемешивают. Из большой тары берут пробы с поверхности и из глубины (стеклянной трубкой). Можно надаивать молоко от отдельных коров (выборочно) в чистые бутылки. Для радиометрического и радиохимического анализов используют как цельное, так и сепарированное молоко.

Каждую отобранную пробу взвешивают, помещают в чистую сухую тару, упаковывают в ящики и опечатывают. К таре прикрепляют этикетку, где указывают название пробы, место и дату взятия, ее массу. При взятии проб, их пересылке, а также при оформлении документов, дающих право хозяйству на списание взятых продуктов, следует руководствоваться действующими «Методическими указаниями по отбору и доставке проб объектов ветеринарного надзора для определения их радиоактивной загрязненности».

Принимают и обрабатывают доставленные в лабораторию пробы в специальном помещении, оборудованном вытяжными и сушильными шкафами, муфельными печами, приспособленными для мытья тары, посуды и при необходимости проб. Присланный материал перед взятием средней пробы тщательно перемешивают, при необходимости промывают в проточной воде, измельчают с помощью мясорубки, терки, кофемолки, ножа и ножниц.

Внесение носителей и минерализацию проб осуществляют следующим образом. Носителями радионуклидов обычно служат стабильные элементы, одноименные или сходные по химическим свойствам с выделяемым из пробы радионуклидом и добавляемые в пробы в виде растворов тех или иных солей. Использование носителей значительно упрощает анализ, позволяя применять для выделения нуклидов реакции осаждения труднорастворимых солей и контролировать полноту выделения. Носитель вводят в пробу до начала ее химической обработки, что предотвращает неконтролируемые потери радионуклида. Обычно количество носителя выбирают равным 30...60 мг в пересчете на весовую форму, в виде которой носитель выделяют из пробы и взвешивают.

Роль носителя заключается в том, что, будучи введенным в пробу, он увеличивает массу выделяемого элемента и позволяет увлечь за собой одноименный или сходный по химическим свойствам радионуклид по всем этапам анализа, чем достигается наиболее полное извлечение радионуклида. Зная количество введенного в пробу носителя перед анализом и количество полученного в результате анализа, определяют химический выход носителя, по которому судят о полноте выделения радионуклида. Химический выход носителя определяют как отношение массы выделенного носителя (мг) в конце анализа к массе внесенного носителя (мг) в пробу перед анализом. Кроме того, применение носителей в радиохимическом анализе позволяет получить в конце анализа «весомое» количество радиоактивного препарата, которое можно нанести на подложку для радиометрии.

Обычно пробы содержат органические вещества, которые должны быть разрушены без потери радионуклидов на этапе подготовки проб к анализу с целью получения исходного го-

могенного раствора. Разрушение органических веществ проводят, как правило, путем сухого или мокрого озоления. Чаще применяют метод сухого озоления, который состоит из трех этапов: высушивания, сжигания (обугливания) и озоления.

Высушивание проб проводят в сушильных шкафах при температуре 80...100°C. Сухие пробы сжигают на электроплитках или газовых горелках. При сжигании нельзя допускать воспламенения, так как при этом происходит потеря радионуклидов. Полученный после сжигания материал переносят в фарфоровые тигли или чашки и проводят озоление в муфельных печах при температуре 400...450°C. Продолжительность озоления различная, в зависимости от количества и вида органических соединений в пробе: для растительных проб оптимальным временем считают 2...4 ч, для проб мяса, молока, костей и корнеклубнеплодов — 15...25 ч. Озоление считают законченным, когда зола приобретает светло-серый или серый цвет, в зависимости от материала пробы. Если в золе содержатся обугленные частицы, содержимое тигля после охлаждения смачивают концентрированной азотной кислотой, высушивают и прокаливают еще раз. В результате минерализации получают остаток, состоящий из смеси солей и окислов, который иногда с трудом растворяется в кислотах. Озоленные пробы охлаждают в эксикаторе до комнатной температуры, взвешивают и рассчитывают коэффициенты озоления $K_{оз}$ (г/кг) путем деления массы золы (г) на массу сырой пробы, взятой для сжигания (кг). Готовую золу растирают в мелкий порошок и используют для определения суммарной бета-активности и радиохимического анализа.

На первом этапе радиохимического анализа необходимо перевести золу в раствор. В большинстве случаев для анализа берут 20...30 г золы. Существуют два метода переведения золы в раствор: растворение и экстрагирование. Под растворением пробы понимают полное переведение ее в раствор. Это достигается только в том случае, когда в пробах отсутствует кремниевая кислота. Способы полного растворения озоленных проб практически применимы лишь к навескам 1...10 г. Для растворения необходимо применять жесткие условия (концентрированные кислоты, высокую температуру и встряхивание).

Из больших навесок золы радионуклиды приходится экстрагировать кислотами. Многие радионуклиды хорошо экстрагируются из больших навесок проб. Никакие способы контроля полноты экстракции в этом случае невозможны.

Выделение радионуклидов из проб проводят реакцией осаждения, экстракцией и дистилляцией.

Для осаждения выбирают реакции, наиболее специфические для выделяемого элемента. Цель этого этапа работы — по возможности более полно выделить носитель и отделить его от сопутствующих макро- и микроэлементов пробы. Выбор реакции осаждения особенно важен тогда, когда из пробы должны быть выделены последовательно несколько радионуклидов.

В радиохимическом анализе полное выделение носителя не является главной задачей. Гораздо важнее обеспечить такие условия, при которых доли выделенного носителя и радионуклида равны. Этого достигают, когда радионуклид и носитель находятся в одинаковой химической форме или переходят в одинаковую форму в момент выделения осадка. Данное требование автоматически выполняется для большинства элементов. Трудности в приведении радионуклидов и их носителей к единой химической форме возникают чаще в случае элементов, отличающихся многообразием химических форм в растворах. К таким элементам относится, например, йод, который может быть в растворе в виде I_2 , I^- , IO_3^- , IO_4^- . Если первые две формы легко переходят друг в друга, $I_2 \leftrightarrow 2I^-$, то для превращения их в одну из кислородсодержащих форм должны быть созданы специальные условия, иначе носитель, добавленный в виде I^- , и радионуклид, находящийся в форме IO_3^- (IO_4^-) будут вести себя совершенно независимо. Количественное выделение носителя в этом случае не приведет к количественному выделению радионуклида.

Химическое состояние в растворе радионуклидов со сложным химическим составом, как правило, неизвестно. Поэтому перед выделением носителя обеспечивают условия, в которых он превращается из одной формы в другую, побывав во всех возможных валентных состояниях. Для йода это достигается введением носителя в двух формах в таких соотношениях, в которых весь йод превращается в элементарное

состояние I^+ , $IO_4 \rightarrow I_2$. При этом в какой бы химической форме ни находился в растворе радионуклид йода, в одной из стадий превращения носителя их химические формы совпадают, и далее они будут вести себя одинаково.

Использование метода экстракции для выделения радионуклидов из растворов проб имеет ряд преимуществ. Поверхность раздела фаз при экстракции ничтожно мала по сравнению с таковой при осаждении. Это позволяет повысить селективность извлечения нуклидов. Кроме того, данный метод отличают быстрота и легкость исполнения. Однако процесс экстракции часто неспецифичен для данного элемента, и в органический растворитель переходит целая группа нуклидов. Исключение составляет экстракция элементарного йода (эфиром, хлороформом и пр.) из азотнокислых растворов и экстракция уранил-нитрата диэтиловым эфиром из раствора 1,5 н. HNO_3 . Когда в пробе содержится несложная смесь нуклидов и их количества сравнимы, экстракция весьма полезна. Так, в пробах золы молока и костей, как правило, присутствуют лишь три нуклида бета-излучателя ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{90}Y . В таких условиях экстракция иттрия трибутилфосфатом приводит к количественному выделению химически и радиохимически чистых препаратов иттрия.

Возможность использования дистилляции в радиохимическом анализе ограничивается нуклидами тех элементов, которые образуют легколетучие соединения. Особенность методов дистилляции — их чрезвычайно высокая специфичность для каждого элемента, позволяющая получить без дополнительной очистки радиохимически и химически чистые препараты.

Очистку выделенных радионуклидов от посторонних нуклидов и сопутствующих макроэлементов проводят с целью получения радиохимически чистых препаратов. Радиохимически чистым называют препарат данного радионуклида, не содержащий других радиоактивных веществ. Например, выделенный из раствора и очищенный препарат стронция не должен содержать никаких других нуклидов, кроме ^{89}Sr и ^{90}Sr . В радиохимическом анализе можно считать условно радиохимически чистыми и такие препараты, которые, кроме изотопов выделяемого элемента, содержат другие нуклиды,

не мешающие количественному измерению радиоактивности определяемых радионуклидов. Например, в результате экстракции иттрия из азотнокислых растворов проб костей получают препараты, содержащие не только ^{90}Y , но и радионуклиды тория и плутония, количественно экстрагирующиеся в тех же условиях. Однако эти радионуклиды являются альфа-излучателями и не регистрируются детекторами, используемыми для измерения бета-активности ^{90}Y .

Идентификацию и проверку радиохимической чистоты выделенных из проб радионуклидов выполняют с помощью приборов, используемых для измерения скорости счета препаратов. Короткоживущие радионуклиды можно идентифицировать, определив их период полураспада путем измерения скорости счета от препарата несколько раз с небольшими интервалами (в часах, днях) до снижения ее наполовину от исходной. По результатам измерений строят график в координатах: логарифм скорости счета — время. Из графика находят период полураспада радионуклида и сравнивают его с табличным значением. Совпадение найденного и табличного значений свидетельствует о радиохимической чистоте измеряемого препарата. Если в препарате присутствует один радионуклид с простым спектром, то на графике получится прямая линия. Если экспериментальные точки не укладываются на прямую, это означает, что в препарате есть по крайней мере два радионуклида. Графическим анализом кривая может быть разложена на прямолинейные участки, соответствующие каждому из содержащихся в препарате радионуклидов.

В случае анализа долгоживущих радионуклидов такую проверку радиохимической чистоты можно выполнить измерением слоя половинного поглощения бета-частиц в алюминии, характеризующим максимальную энергию бета-спектра радионуклида, являющуюся одной из основных его характеристик. Для определения слоя половинного ослабления измеряют скорость счета от препарата, а затем закрывают препарат экраном из алюминиевой фольги известной толщины ($\text{мг}/\text{см}^2$) и вновь измеряют скорость счета. Далее накрывают препарат последовательно вторым, третьим и т. д. экранами, каждый раз определяя скорость счета от препарата до тех пор,

пока она не уменьшится до скорости счета фона. По результатам измерения на графике в координатных осях, на которых отложены логарифм скорости счета и толщина алюминиевой фольги ($\text{мг}/\text{см}^2$), строят график, аналогичный графику изменения активности со временем, но такой график может быть построен быстрее (за несколько минут или часов, в зависимости от активности). Если в препарате присутствует один радионуклид с простым спектром, то на графике получится прямая линия, по наклону которой находят слой половинного ослабления. Найденное значение сравнивают с табличным. Если радионуклид испускает два (или больше) группы бета-частиц, график будет представлять собой кривую, которую можно разложить на соответствующие прямые точно так же, как и при определении периода полураспада.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные цели и задачи радиационного контроля?
2. Какая система радиационного контроля объектов ветеринарного надзора применяется в острый послеаварийный и последующие периоды?
3. На чем основаны методы прижизненного определения радионуклидов в организме животных?
4. Каковы общие правила отбора и подготовки проб кормов и продуктов животноводства для радиационного контроля?
5. В чем состоит роль носителей в радиохимическом анализе?
6. Как определяется радиохимическая чистота радионуклидов, полученных после радиохимического анализа?
7. Из каких этапов состоит радиохимический анализ?
8. Какие особенности радиационного контроля рыночной продукции?
9. Какая цель радиационного контроля мясного сырья и крупного рогатого скота?



ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА И НАСЕЛЕНИЯ

РЕГЛАМЕНТАЦИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Правовые основы обеспечения охраны окружающей среды и радиационной безопасности населения определяют федеральные законы: «Об использовании атомной энергии» от 21 ноября 1995 г. и «О радиационной безопасности населения» от 9 января 1996 г. На основе указанных федеральных законов разработаны и утверждены «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009), а также «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности» (ОСПОРБ — 99/2010).

Главной целью радиационной безопасности является охрана здоровья населения, включая персонал, от вредного воздействия ионизирующего излучения путем соблюдения основных принципов и норм радиационной безопасности без необоснованных ограничений полезной деятельности при использовании излучения в различных областях хозяйства, науке и медицине.

Радиационная безопасность персонала, населения и окружающей природной среды считается обеспеченной, если соблюдаются основные принципы радиационной безопасности:

принцип обоснования — запрещение всех видов деятельности по использованию источников ионизирующих излучений, 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;

принцип нормирования — непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников ионизирующего излучения.

Согласно НРБ-99/2009 установлены следующие категории облучаемых лиц:

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

Для категории облучаемых лиц установлены два класса нормативов:

- основные пределы доз (табл. 34);
- допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида или одного вида внешнего облучения), являющиеся производными от основных пределов доз: пределы годового поступления (ПГП), допустимые среднегодовые объемные активности (ДОВА).

Основные пределы доз облучения не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий.

Эффективная доза для персонала группы А не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) — 1000 мЗв, для персонала группы Б — 250 мЗв, для населения — 70 мЗв.

Таблица 34

Основные пределы доз

Нормируемые величины	Персонал (группа А)	Персонал (группа Б)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	5 мЗв в среднем, но не более 12,5 мЗв	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год:			
в хрусталике глаза	150 мЗв	37,5 мЗв	15 мЗв
в коже	500 мЗв	125 мЗв	50 мЗв
в кистях и стопах	500 мЗв	125 мЗв	50 мЗв

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

Допустимые пределы внутреннего облучения. Радионуклиды, попадающие внутрь организма при вдыхании, через желудочно-кишечный тракт и кожные покровы, вызывают внутреннее облучение человека. В этом случае поражающим началом является ионизирующее излучение даже от ничтожно малой массы радионуклида при высокой активности. Для оценки допустимого содержания радионуклидов рассчитывают предел годового поступления их в организм. Предел годового поступления (ПГП) находят на основании оценки дозового предела (ДП) и дозового коэффициента (E), который характеризует уровень внутреннего облучения персонала, Зв/Бк:

$$\text{ПГП} = \frac{\text{ДП}}{E}.$$

При оценке внутреннего облучения рассматриваются три момента:

- облучение всего организма или того органа, в котором откладывается наибольшая часть попадающего внутрь радионуклида;
- облучение желудочно-кишечного тракта, по которому проходит основная часть попавших в организм радионуклидов при их заглатывании с пищей или водой;
- облучение легких, из которых осевшие при вдыхании нерастворимые соединения удаляются крайне медленно.

Предел годового поступления радионуклидов в организм зависит от радиотоксичности элемента.

Радиотоксичность — свойство радиоактивных изотопов вызывать большие или меньшие патологические изменения при попадании их в организм. Она зависит от ряда моментов, главные из которых следующие:

- вид радиоактивного излучения;
- средняя энергия одного акта распада;
- схема радиоактивного распада;
- пути поступления радионуклида в организм;
- распределение радионуклида по органам и системам;

- время пребывания радионуклида в организме;
- продолжительность времени поступления радионуклида в тело человека.

Планируемое повышенное облучение. Согласно НРБ-99/2009 разрешается планируемое повышенное облучение персонала группы А при ликвидации радиационной аварии. Потенциальную дозу облучения при поступлении радионуклидов в организм предвидеть невозможно. Планируемое повышенное облучение персонала выше установленных пределов во время ликвидации аварии может быть оправдано лишь спасением людей, предотвращением развития аварии, а также облучения большого числа людей. В каждом подобном случае персонал должен быть предупрежден о дополнительном облучении. Такое облучение допускается для мужчин старше 30 лет при их добровольном письменном согласии.

Планируемое повышенное облучение в эффективной дозе до 100 мЗв в год допускается структурными подразделениями федеральных органов исполнительной власти, а облучение в эффективной дозе до 200 мЗв в год — только федеральными органами исполнительной власти, уполномоченными осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор.

Повышенное облучение не допускается:

- для работников, ранее уже облученных в течение года в результате аварии или запланированного повышенного облучения с эффективной дозой 200 мЗв или с эквивалентной дозой, превышающей в четыре раза соответствующие пределы доз;
- для лиц, имеющих медицинские противопоказания для работы с источниками излучения.

Лица, не относящиеся к персоналу, привлекаемые для проведения аварийных и спасательных работ, должны быть оформлены и допущены к работам как персонал группы А.

Для оценки состояния радиационной безопасности используется показатель радиационного риска. В наибольшей степени этот риск характеризует суммарная накопленная эффективная доза от всех источников излучения. Значимость каждого источника излучения следует оценивать по его вкладу в суммарную эффективную дозу.

Обеспечение радиационной безопасности складывается из радиационной безопасности на объекте и вокруг него, радиационной безопасности персонала и радиационной безопасности населения. Для этой цели введен контроль за радиационной безопасностью, который охватывает все основные виды действия ионизирующего излучения на человека. Радиационный контроль предусматривает учет индивидуальных и коллективных доз облучения персонала и населения. Сведения по радиационному контролю радиационного объекта передаются в органы Роспотребнадзора.

Ограничение облучения населения. Радиационная безопасность населения достигается путем ограничения облучения от техногенных и природных источников, от медицинского облучения и облучения в условиях радиационной аварии.

Облучение населения техногенными источниками при их нормальной эксплуатации ограничивается путем обеспечения сохранности источников ионизирующего излучения, контроля технологических процессов и ограничения выброса радионуклидов в окружающую среду, другими мероприятиями на стадии проектирования, эксплуатации и прекращения использования источников ионизирующего излучения.

Снижение облучения населения от природных источников достигается путем ограничения облучения населения от отдельных природных источников. Так, доза космического излучения должна учитываться при подсчете суммарной дозы. При проектировании новых жилых и общественных зданий следует учитывать активность радона и торона, радия-226 и калия-40 и не превышать допустимый норматив.

При профилактических и других медицинских рентгенологических исследованиях годовая эффективная доза облучения не должна превышать 1...5 мЗв в год. Решения о мерах защиты населения в случае крупной радиационной аварии принимаются на основании критерия для принятия решений в начальном периоде аварийной ситуации, об отселении и ограничении потребления загрязненных пищевых продуктов. В качестве критериев при решении вопросов радиационной безопасности персонала и охраны окружающей среды используются основные дозовые пределы, допустимые и контрольные уровни в зависимости от категории облучаемых лиц.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ С ИСТОЧНИКАМИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

При работе с источниками ионизирующих излучений главное значение приобретает правильная организация труда, которая обеспечивает радиационную безопасность персонала и всего населения в целом. Прежде всего, еще на этапе проектирования радиационного объекта устанавливается категория его потенциальной опасности в зависимости от возможной степени радиационного воздействия на население при радиационной аварии. По потенциальной радиационной опасности устанавливается четыре категории объектов.

Согласно ОСПОРБ-99/2010 разработаны правила размещения радиационных объектов и зонирование территорий. Размещение радиационного объекта должно быть согласовано с органами государственного санитарно-эпидемиологического надзора с учетом перспектив как самого объекта, так и района его размещения.

Вокруг радиационных объектов I и II категорий устанавливается санитарно-защитная зона, а вокруг радиационных объектов I категории — дополнительно еще и зона наблюдения. Санитарно-защитная зона для радиационных объектов III категории ограничивается территорией объекта, для радиационных объектов IV категории установление зон не предусмотрено.

Технологическое оборудование для работ с радиоактивными веществами должно удовлетворять ряду требований:

- должно быть надежным и удобным в эксплуатации, обладать необходимой герметичностью, обеспечивать возможность применения дистанционных методов управления, контролировать выполнение работы;
- изготавливаться из прочных коррозионно-радиационно-стойких материалов, легко поддающихся дезактивации;
- все оборудование должно иметь предупредительные знаки радиационной опасности для привлечения внимания к этим объектам.

До начала эксплуатации радиационный объект должен быть принят компетентной комиссией, которая составляет акт приемки. На основании акта приемки органом государ-

ственного санитарно-эпидемиологического надзора выдается санитарно-эпидемиологическое заключение на право работ с источниками ионизирующих излучений.

В порядке, установленном законодательством Российской Федерации, для деятельности радиационного объекта требуется наличие лицензии.

Для обеспечения правильности работы с источниками излучений разрабатывается инструкция по радиационной безопасности, правила внутреннего распорядка, устанавливается необходимое оборудование — свинцовые сейфы, колдцы, боксы, вытяжные шкафы. Хранилище радиоактивных веществ оборудуется вытяжной вентиляцией и пожарно-охранной сигнализацией.

Администрация учреждения определяет перечень лиц для работы с источниками ионизирующих излучений, обеспечивает их необходимое обучение и инструктаж, назначает приказом лиц, ответственных за учет, хранение, сбор радиоактивных отходов и их сдачу на захоронение, за производственный контроль радиационной безопасности.

Все поступившие источники излучения учитываются в приходно-расходном журнале. Источники излучения выдаются сотрудникам для работы по требованиям с письменного разрешения руководителя. Ежегодно комиссия, назначенная руководителем организации, производит инвентаризацию источников ионизирующих излучений.

Работа с закрытыми источниками излучения. Источники ионизирующего излучения, конструкция которых исключает попадание радиоактивных веществ в окружающую среду, называют закрытыми. В этом случае персонал может подвергаться только внешнему облучению. Закрытые источники ионизирующего излучения по характеру действия условно делят на две группы:

- 1) источники излучения непрерывного действия;
- 2) источники, генерирующие излучение периодически.

Рабочая часть стационарных установок с неограниченным по направлению пучком излучения должна размещаться в отдельном помещении. Материал и толщина стен, пола, потолка этого помещения при любых положениях источника излучения и направления пучка должны обеспечивать ос-

лабление первичного и рассеянного излучения до допустимых значений.

Пульт дистанционного управления установкой размещается в отдельном помещении. Входная дверь должна блокироваться, чтобы исключить возможность облучения персонала.

При работе с закрытыми источниками излучения необходимо пользоваться дистанционными инструментами или специальными приспособлениями, защитными экранами и манипуляторами.

Работа с открытыми источниками ионизирующего излучения. Открытый радиоактивный источник — это такой источник излучения, агрегатное состояние которого позволяет загрязнять внешнюю среду при работе с этим источником.

Радионуклиды как потенциальные источники внутреннего облучения разделяются по степени радиационной опасности на четыре группы в зависимости от минимально значимой активности (МЗА), под которой понимают наименьшую активность открытого источника на рабочем месте:

- группа А — радионуклиды с минимально значимой активностью 10^3 Бк;
- группа Б — радионуклиды с минимально значимой активностью $10^4 \dots 10^5$ Бк;
- группа В — радионуклиды с минимально значимой активностью 10^6 и 10^7 Бк;
- группа Г — радионуклиды с минимально значимой активностью 10^8 Бк и более.

Все работы с использованием открытых источников излучения разделяют на три класса в зависимости от группы радиационной опасности и его активности на рабочем месте (табл. 35).

Таблица 35

Класс работ с открытыми источниками излучения

Класс работ	Суммарная активность на рабочем месте, приведенная к группе А, Бк
I класс	Более 10^8
II класс	От 10^5 до 10^8
III класс	От 10^3 до 10^5

Классом работ определяются требования к размещению и оборудованию помещений, в которых проводятся работы с открытыми источниками излучения.

Комплекс предупредительных мероприятий при работе с открытыми источниками излучения должен обеспечивать защиту от внутреннего и внешнего облучения, ограничивать загрязнение воздуха и поверхностей рабочих помещений, кожных покровов, одежды персонала, объектов окружающей среды — воздуха, почвы, растительности и др. как при нормальной эксплуатации, так и при проведении работ по ликвидации последствий радиационной аварии.

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 персонала; рациональный режим вентиляции; своевременный сбор и удаление радиоактивных отходов.

К размещению лабораторий III класса специальных требований не предъявляют. Работы проводят в отдельных помещениях (комнатах). Предусматривается приточно-вытяжная вентиляция, душевая, помещения для работы с источниками излучения, а также для хранения их. 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. Рабочие помещения оборудуют вытяжными шкафами или боксами.

Работы I класса проводятся в отдельном здании или изолированной части здания с отдельным входом только через санпропускник. Помещения оборудуются боксами, камерами, каньонами, другим герметичным оборудованием и разделяют на три зоны:

1 зона — необслуживаемые помещения, где размещается технологическое оборудование и коммуникации, являющиеся основными источниками излучения и радиоактивного за-

грязнения. Пребывание персонала в необслуживаемых помещениях при работающем технологическом оборудовании не допускается;

2 зона — периодически обслуживаемые ремонтно-транспортные помещения для ремонта оборудования, загрузки и выгрузки активных материалов, временного хранения и удаления радиоактивных отходов;

3 зона — помещения для постоянного пребывания персонала — операторские, пульты управления и т. д.

К планировке лабораторий II и III классов не предъявляются столь жестких требований.

Помещения для работ II класса необходимо размещать в отдельной части здания, изолированной от других кабинетов. В составе этих помещений должны быть хранилище изотопов, фасовочная, санпропускник, пункт радиационного контроля на выходе. Рабочие комнаты оборудуют вытяжными шкафами или боксами.

К размещению лабораторий III класса специальных требований не предъявляют. Работы проводят в отдельных комнатах. Предусматривается приточно-вытяжная вентиляция, душевая, помещения для работы с источниками излучения, хранилище радионуклидов. При опасности загрязнения воздуха работы следует проводить в вытяжных шкафах.

Средства индивидуальной защиты. Для защиты от внешнего гамма-излучения применяют три метода: защита временем, расстоянием и экранированием.

Защита временем — сокращение времени работы с источниками. Сокращая срок работы с источником, можно в значительной степени уменьшить дозы облучения персонала. Сокращение рабочего дня персонала, увеличение отпуска, перевод сотрудника на работу, не связанную с облучением, также позволяют защищать работника временем.

Защита расстоянием — увеличение расстояния от источников до работающих. Это простой и надежный способ защиты, который обеспечивается достаточным удалением работающих от излучателя. При этом следует помнить свойство ядерных излучений — их пробег в воздухе.

Защита экранами — экранирование источников излучения материалами, поглощающими ионизирующее излучение.

При этом учитывается проникающая способность излучений. В зависимости от вида ионизирующего излучения для изготовления экранов применяют различные материалы, а их толщина определяется мощностью излучения. Так, для защиты от рентгеновского и γ -излучений используют очень плотный материал свинец. В целях экономии используют просвинцованное стекло, железо, кирпич, бетон, баритобетон, железобетон, воду. В этом случае эквивалентная толщина экранов намного превосходит ту, которая могла бы обеспечить нужную кратность ослабления с помощью свинца.

В комплексе защитных мероприятий по созданию условий радиационной безопасности важное место занимают средства индивидуальной защиты, предназначенные для защиты органов дыхания и кожного покрова.

В зависимости от характера проводимых работ все средства индивидуальной защиты условно делят на средства повседневного назначения и кратковременного пользования. К средствам повседневного назначения относят халаты, комбинезоны, костюмы, спецобувь и некоторые типы противопылевых респираторов. К средствам кратковременного пользования относят изолирующие шланговые и автономные костюмы, пневмокостюмы, противогазы, перчатки и пленочную одежду: полукombineзоны, фартуки и нарукавники. Кроме того, средства индивидуальной защиты по конструктивным и эксплуатационным особенностям делят на пять видов: спецодежда, спецобувь, средства защиты органов дыхания, изолирующие костюмы, дополнительные защитные приспособления.

В зависимости от назначения спецодежда изготавливается из хлопчатобумажной ткани, синтетических материалов из поливинилхлоридных и полиэтиленовых материалов. В качестве спецобуви используют сапоги и галоши из различных материалов, бахилы из пластика. Для защиты органов дыхания применяют высокоэффективные бесклапанные респираторы разового или многократного применения, разработанные И. В. Петряновым, С. М. Городинским и др. Из изолирующих костюмов наиболее совершенен пневмокостюм ЛГ-5. Средства индивидуальной защиты используются в соответствии с классом проводимых работ.

Деактивация радиоактивных загрязнений. При загрязнении радионуклидами кожных покровов, оборудования, производственных помещений, спецодежды и пр. их очищают от радиоактивного материала. Проводят деактивацию. Деактивация — механическое удаление радиоактивного загрязнения с поверхности различных предметов.

Независимо от природы загрязнения все способы деактивации делят на жидкостные и безжидкостные. При жидкостных способах деактивации радиоактивные вещества удаляют либо в результате механического воздействия струей воды или пара, либо в результате физико-химических процессов, происходящих между жидкой средой и радиоактивными веществами. Безжидкостные способы деактивации основаны на механическом удалении радиоактивных веществ: сметания, сдувания, снятия загрязненного слоя поверхности, отсасывания.

Деактивацию рук, головы, лица проводят теплой водой с мылом при температуре 30...32°C. После тщательного отмывания сильно загрязненных участков кожи рекомендуются санитарная обработка всего тела под душем. Затем обязательно измерение с помощью радиометрических приборов. Если есть остаточная активность кожи, повторяют деактивацию, но не более трех раз. Для удаления радионуклидов в тяжелых случаях рекомендуется применять специальные средства деактивации кожи: препараты «Защита», «Деконтамин», «Паста 116» или густые суспензии моющих средств.

Для деактивации кожных покровов не рекомендуется использовать органические растворители (спирт, бензин и др.), т. к. они способствуют проникновению радионуклидов внутрь организма.

Одежду, обувь, помещения, транспорт тщательно отмывают до уровня допустимого радиоактивного загрязнения. В ветеринарных учреждениях так же, как и в медицинских, различные поверхности деактивируют 0,5...1% раствором синтетических моющих средств и их смесей. Начинать деактивацию следует с более загрязненного участка помещения по принципу «от чистых участков к грязным». Жидкие радиоактивные отходы собирают в емкости, а твердые — в полиэтиленовые или бумажные мешки. Земельные угодья вспахивают,

переворачивая пласты с целью заглубления радионуклидов (желательно ниже уровня развития корневой системы растений) или снимают поверхностные слои земли. Собранные радиоактивные отходы с разрешения Роспотребнадзора временно хранят в изолированном помещении, а затем сдают на захоронение.

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ РАДИОАКТИВНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Благодаря проведению комплекса мероприятий по охране окружающей среды от радиоактивных загрязнений на объектах, где ведутся работы с радионуклидами, дополнительное облучение населения группы Б во много раз меньше, чем принятые допустимые величины НРБ-99/2009.

Подтверждением этого могут служить результаты оценки радиационной обстановки в районах размещения объектов, где находятся радиоактивные отходы в значительных количествах. Например, результаты контроля радиационной обстановки окружающей местности Белоярской и Нововоронежской АЭС в течение ряда лет свидетельствуют о том, что их эксплуатация не сопровождается накоплением радиоизотопов (в частности, ^{90}Sr и ^{137}Cs) в почве и продуктах питания местного производства (картофель, капуста, молоко, злаки и т. д.) по сравнению со средними величинами по стране и данными, полученными до пуска в эксплуатацию этих электростанций. Это послужило основанием для органов санитарного надзора разрешить использовать санитарно-защитные зоны указанных станций для сельскохозяйственных целей. Вместе с тем и дозы дополнительного внешнего облучения вокруг санитарно-защитных зон (за счет ^{41}Ar) по сравнению с естественным фоном оказались незначительными. Таким образом, осуществление ряда мероприятий по охране окружающей среды от радиоактивных загрязнений при проектировании, строительстве и эксплуатации даже таких мощных источников радиоактивных отходов, как АЭС, предотвращает неблагоприятные изменения радиационной обстановки прилегающих районов и создает требуемые условия радиационной безопасности для населения.

Охрана окружающей среды от радиоактивных загрязнений обеспечивается следующими мерами:

- использованием совершенной технологии производства, которая сводит к минимуму количество образующихся радиоактивных отходов (РАО) и предупреждает их утечку (герметизация процессов, связанных с образованием радиоактивных газов и аэрозолей, применение оборотного цикла водоснабжения и т. д.);
- методами обезвреживания, централизованного сбора и захоронения радиоактивных отходов;
- организацией санитарно-защитных зон и планировочными мероприятиями.

Методы обезвреживания радиоактивных отходов. Радиоактивные отходы — это не подлежащие дальнейшему использованию вещества в любом агрегатном состоянии, материалы, изделия, приборы, оборудование, объекты биологического происхождения, в которых содержание радионуклидов превышает уровни, установленные с целью предупреждения загрязнения окружающей среды радионуклидами. Допускается сброс отходов с такой активностью, уровень которой предупреждает возможность поступления в организм человека искусственных радионуклидов в количестве, превышающем предел их годового поступления для отдельных лиц из населения или предел дозы внешнего облучения от присутствия в воздухе радионуклидов аргона, криптона, ксенона и короткоживущих изотопов углерода, азота и кислорода.

К радиоактивным отходам относятся растворы, изделия, материалы, биологические объекты, содержащие радионуклиды в количестве, превышающем величины, установленные действующими правилами ОСПОРБ-99/2010 и СПОРО-2002 и не подлежащие дальнейшему использованию. К радиоактивным отходам относятся также отработавшие источники ионизирующих излучений.

Радиоактивные отходы по агрегатному состоянию подразделяются на жидкие, твердые и газообразные.

Жидкие радиоактивные отходы — органические и неорганические жидкости, пульпы и шламы, не подлежащие дальнейшему использованию. Жидкие радиоактивные отходы считаются радиоактивными, если в них удельная активность

радионуклидов более чем в 10 раз превышает значения уровней вмешательства, приведенные в НРБ-99/2009.

Твердые радиоактивные отходы — отработавшие свой ресурс радионуклидные источники, не предназначенные для дальнейшего применения материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, загрязненные объекты внешней среды, отвержденные жидкие радиоактивные отходы, в которых удельная активность радионуклидов превышает значения минимально значимой удельной активности. При неизвестном радионуклидном составе твердые отходы считаются радиоактивными, если их удельная активность больше:

100 кБк/кг — для бета-излучающих радионуклидов;

10 кБк/кг — для источников альфа-излучающих радионуклидов;

1,0 кБк/кг — для трансурановых радионуклидов.

При известном радионуклидном составе газообразные отходы считаются радиоактивными, если сумма отношений удельной активности радионуклидов к их минимально значимой активности превышает 1.

Гамма-излучающие отходы неизвестного состава считаются радиоактивными, если мощность поглощенной дозы у их поверхности (0,1 м) превышает 0,001 мГр/час над фоном при соблюдении условий измерения в соответствии с утвержденными методиками.

Жидкие и твердые радиоактивные отходы с известным радионуклидным составом подразделяют по удельной (объемной) активности на три категории: низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные (табл. 36).

Таблица 36

Классификация жидких и твердых радиоактивных отходов по удельной радиоактивности

Категория отходов	Удельная (объемная) активность, кБк/кг (кБк/л)		
	β -излучающие радионуклиды	α -излучающие радионуклиды (исключая трансурановые)	Трансурановые радионуклиды
Низкоактивные	Менее 10^3	Менее 10^2	Менее 10^1
Среднеактивные	От 10^3 до 10^7	От 10^2 до 10^6	От 10^1 до 10^5
Высокоактивные	Более 10^7	Более 10^6	Более 10^5

Твердые и жидкие радиоактивные отходы, содержащие короткоживущие изотопы с периодом полураспада не свыше 15 суток, выдерживаются в течение времени, обеспечивающего снижение активности до величин, при которых они рассматриваются как неактивные.

На объектах, где ведутся работы с радионуклидами, разрешается удалять вентиляционный воздух без очистки, если его активность на выбросе не превышает ДК для воздуха рабочих помещений. При этом уровень внешнего и внутреннего облучения отдельных лиц из населения не должен превышать предела дозы, установленного для этой категории населения.

Удаляемый из укрытий, боксов, камер, шкафов и другого оборудования загрязненный воздух должен подвергаться перед выбросом в атмосферу очистке на эффективных фильтрах. При работах I и II классов, когда суммарная активность удаляемых газов и аэрозолей может достигать значительного уровня, предусматриваются, кроме фильтров, выбросные трубы, высота которых должна обеспечивать снижение загрязненности атмосферного воздуха до величин, не превышающих ДУА для населения и пределов доз внешнего и внутреннего облучения этой категории населения, предусмотренных НРБ-99/2009.

В том случае, когда выполнить указанные выше условия невозможно, отходы, содержащие радионуклиды, должны быть переработаны таким образом, чтобы их радиоактивность была снижена до требуемого уровня.

Единственным окончательным решением проблемы отходов является полный естественный распад содержащихся в них радиоактивных продуктов. Методы, которые применяются при переработке отходов, можно условно разделить на две категории.

К первой категории относится выдержка — хранение отходов в условиях, обеспечивающих абсолютную безопасность для здоровья людей до тех пор, пока все или почти все радионуклиды не распадутся.

Выдержка во времени — уникальный способ снижения активности отходов. Обычно при наличии в отходах смеси радиоактивных элементов максимальный срок выдержки

устанавливают по изотопу, имеющему наибольший период полураспада, а сам срок принимают равным 10 периодам полураспада (например, для отходов, содержащих ^{131}I — 82 дня). За это время существенно снижается удельная активность отходов (примерно в 1024 раза), почти всегда обеспечивающая возможность последующего их выпуска в хозяйственно-фекальную канализацию (при жидких отходах). Твердые отходы, уровень активности которых при хранении снижается до допустимых величин, в дальнейшем удаляют как обычный мусор. Если присутствуют долгоживущие изотопы, то отходы необходимо хранить в течение многих лет в герметичных контейнерах, снабженных защитой. Поскольку такое хранение возможно только при больших экономических затратах, а количество отходов достигает значительного объема, этот метод требует предварительного извлечения радионуклидов из отходов, их концентрирования с помощью различных способов и последующего надежного захоронения концентратов.

Метод, относящийся ко второй категории, предусматривает разбавление при малом объеме и низкой удельной активности отходов до ничтожно малого уровня активности, не представляющего опасности для здоровья населения. Кроме того, этот способ пригоден при наличии реальных условий для разбавления. Однако, хотя этот метод и привлекает своей простотой и дешевизной, он часто неприменим на практике, особенно для высокоактивных и среднеактивных отходов.

В зависимости от агрегатного состояния радиоактивных отходов применяют различные способы их переработки. Способы кондиционирования радиоактивных отходов включают цементирование, битумирование, прессование, сжигание, остекловывание.

Существуют три метода континентального хранения, различающиеся по глубине размещения РАО: поверхностное, приповерхностное хранение и хранение в глубоких геологических формациях.

Специально организованные службы радиационной безопасности пунктов хранения РАО контролируют и гарантируют условия радиационной безопасности персонала и объектов окружающей среды.

Контрольные вопросы

1. Каковы принципы радиационной безопасности?
2. Каковы основные пределы доз разных категорий населения?
3. Что такое внутреннее облучение и каковы пределы внутреннего облучения человека?
4. В каких случаях разрешается планируемое повышенное облучение персонала группы А?
5. Какие мероприятия по ограничению облучения населения проводят в условиях радиационной аварии?
6. Какие установлены классы работ с радиоактивными веществами и категории потенциальной опасности радиационных объектов?
7. Назовите средства и методы индивидуальной защиты при работе с радиационными источниками.
8. Дайте определения открытого и закрытого радиоактивного источника.
9. В чем суть дезактивации радиоактивных загрязнений?
10. Какие меры обеспечивают охрану окружающей среды от радиоактивных загрязнений?
11. Виды радиоактивных отходов и методы их обезвреживания.



СЛОВАРЬ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

Авария радиационная — потеря управления источниками ионизирующего излучения, вызванная неисправностью оборудования, неправильными действиями персонала, стихийными бедствиями или иными причинами, следствием которых являются незапланированное облучение людей или радиоактивное загрязнение окружающей среды, превышающее допустимые уровни.

Аккумуляция радиоактивных изотопов в организме — накопление радиоактивных изотопов в живых организмах, подчиняющееся общим биологическим закономерностям. Радиоизотопы ведут себя при этом в организме как стабильные изотопы данного химического элемента.

Анализ радиохимический — определение качественного состава и количественного соотношения радиоактивных изотопов химических элементов, содержащихся в ультрамалых количествах (по массе) в различных материалах и веществах. Данный метод сочетает в себе выделение из пробы и концентрирование исследуемого радионуклида с помощью методов аналитической химии и определение его удельной радиоактивности одним из методов радиометрии.

Выпадения глобальные — выпадения на обширных территориях радиоактивных продуктов ядерных взрывов. Такие выпадения формируются из мельчайших частиц и газов, выброшенных в стратосферу и оседающих в течение многих месяцев и лет вместе с атмосферными осадками.

Выпадения локальные — выпадения радиоактивных осадков на территории, прилегающей к месту ядерного взрыва или к месту ядерных аварий в течение первых 2...3 сут. Такие вы-

падения обычно содержат более 200 радионуклидов 36 химических элементов.

Дезактивация — удаление радиоактивных веществ с поверхности различных объектов или из различных сред. Для этого применяют методы: механический (удаление поверхностного слоя путем срезания, обработки поверхностей водой, моющими средствами и т. д.), физико-химический (разбавление, перегонка, осаждение, ионообменное связывание радиоактивных веществ из растворов, использование специальных фильтрующих систем для очистки воздуха и т. д.) и биологический (использование различного рода биофильтров, например некоторых микроорганизмов, водорослей, извлекающих радиоактивные вещества из жидкостей, сорбция радиоактивных веществ почвой, активным илом, планктоном и т. д.).

Единица стронциевая — величина, характеризующая отношение активности ^{90}Sr к массе кальция в пробе. Количественно определяется как отношение активности ^{90}Sr в пикокюри на 1 кг продукта к массовой доле в нем кальция (г/кг). Например, при поверхностном загрязнении естественных кормовых угодий ^{90}Sr , равном 1 мкюри/км², 2 кг сухого вещества естественных трав содержит 4,8 стронциевых единиц (с. е.).

Загрязнение радионуклидное — поступление в экосистему радионуклидов техногенного происхождения.

Зона наблюдения — территория за пределами санитарно-защитной зоны, на которой проводят радиационный контроль.

Зона радиационной аварии — территория, на которой суммарное внешнее и внутреннее облучения населения могут превысить регламентированную нормативными документами дозу за первый год после радиационной аварии.

Зона санитарно-защитная — изолированная территория между промышленными предприятиями и жилыми или общественными зданиями, служащая для защиты населения от влияния вредных факторов производства (выбросы, шум и т. д.). Зона санитарно-защитная применительно к радиационно-опасным объектам — территория вокруг источника ионизирующего излучения, на которой уровень облучения людей в условиях нормальной его эксплуатации может превысить установленный предел дозы облучения для населения. В этой зоне запрещается постоянное проживание, вводятся режим ограничения хозяйственной деятельности и проводятся радиационный контроль.

Коэффициент дискриминации ^{90}Sr — отношение числа стронциевых единиц в данной пробе к числу стронциевых единиц в предшествующем звене биологической системы.

Кратность накопления — отношение активности радионуклида в органах, тканях и организме животного к суточному поступлению его с рационом.

Коэффициент перехода радионуклидов — отношение активности радионуклидов в звене-акцепторе к активности в звене-доноре. Под звеном-акцептором понимают каждое последующее звено пищевой цепочки, а под звеном-донором — каждое предыдущее.

Коэффициент накопления — отношение активности радионуклидов в растениях к активности его в почве.

Миграция радионуклидов в биосфере — природное или техногенное перемещение радионуклидов. По направлению миграции радионуклидов подразделяют на вертикальную, горизонтальную и смешанную.

Миграция радионуклидов в почве — совокупность процессов, приводящих к перемещению радионуклидов в почве по глубине и в горизонтальном направлении: диффузия свободных и адсорбированных (связанных) ионов, перенос по корневым системам растений в результате хозяйственной деятельности человека и других процессов.

Период йодной опасности — первый период в динамике радиационной обстановки после ядерного взрыва или радиационной аварии на предприятиях ядерного энергетического цикла. Наибольшую опасность для человека и животных в этот период представляют радионуклиды йода (в первую очередь ^{131}I). Продолжительность этого периода составляет 40...60 сут.

Период корневого поступления радионуклидов в продукцию растениеводства — третий период в динамике радиационной обстановки после радиационной аварии, начинающийся со второго вегетационного года после аварии. Основную опасность представляют изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Период полувыведения биологический — время, в течение которого из организма выводится половина находящегося в нем количества радионуклида. Этот показатель определяется химическими свойствами, биологической значимостью элемента, свойствами ткани, в которой он находится, видовыми особенностями и общим физиологическим состоянием организма. Он может быть изменен специальным рацио-

ном у животных, лекарственными средствами и другими приемами.

Период полувыведения эффективный — время, в течение которого количество радиоактивного изотопа уменьшается в организме наполовину вследствие его физического распада и биологического выведения. Это один из основных критериев при оценке токсичности радиоактивного изотопа.

Период преобладающего поверхностного загрязнения сельскохозяйственных угодий средне- и долгоживущими радионуклидами — второй период в динамике радиационной обстановки после радиационной аварии, когда основная опасность связана с некорневым (аэральным) загрязнением растений средне- и долгоживущими радионуклидами. Наиболее опасны в биологическом отношении ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Предельно допустимые концентрации (ПДК) радионуклидов — регламентированные гигиеническими нормативами безопасные для человека загрязнения окружающей среды, в том числе воды и продуктов питания.

Резорбция радионуклидов в организме — поступление радионуклидов в организм всеми известными путями (органы дыхания, орально, через кожу, слизистые и серозные покровы, раны и др.). Степень резорбции зависит от химического соединения, пути поступления, вида, возраста, физиологического состояния животных и других факторов.

Самоочищение почвы — уменьшение количества загрязняющих почву радионуклидов в результате протекающих в ней процессов миграции.

Цепь трофическая (пищевая) — взаимодействие между организмами, через которые в экосистеме происходит трансформация вещества и энергии; группы особей, связанные друг с другом отношением «пища — потребитель», т. е. цепь, в которой каждое предыдущее звено служит пищей для последующего.

Частицы горячие — мельчайшие частицы пыли с высокой искусственной радиоактивностью. Величина и форма горячей частицы сильно варьируют (размеры могут изменяться от 2 до 20 мкм). Радиоактивность может достигать $3,7 \cdot 10^{11}$ Бк (10 Ки) на 1 частицу. Образуются они при ядерных взрывах и авариях на атомных энергетических установках. Особую опасность горячие частицы представляют при попадании в организм человека и животных.



РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Лысенко, Н. П.* Практикум по радиобиологии / Н. П. Лысенко, В. В. Пак [и др.] — М. : КолосС, 2007.
2. Радиобиология. Радиационная безопасность сельскохозяйственных животных / под ред. В. А. Бударкова, А. С. Зенкина. — М. : КолосС, 2008.
3. *Карташов, А. А.* Лучевая болезнь сельскохозяйственных животных / А. А. Карташов [и др.] — М. : Колос, 1978.
4. *Лысенко, Н. П.* Ведение животноводства в условиях радиоактивного загрязнения среды / Н. П. Лысенко, А. Д. Пастернак [и др.] — СПб. : Лань, 2005.
5. *Ильин, Л. А.* Радиационная гигиена / Л. А. Ильин, В. Ф. Кириллов, И. П. Коренков. — М. : Медицина, 1999.
6. *Кузин, А. М.* Структурно-метаболическая теория в радиобиологии. — М., 1986.
7. *Ильязов, Р. Г.* Радиоэкологические аспекты животноводства (последствия и контрмеры после катастрофы Чернобыльской АЭС) / Р. Г. Ильязов, Р. М. Алексахин, Н. А. Корнеев [и др.] // под общ. ред. Р. Г. Ильязова. — Гомель, 1996.
8. *Иванов, В. И.* Курс дозиметрии. — М. : Атомиздат, 1970.
9. *Каушанский, Д. А.* Атом и сельское хозяйство. — М., 1981.
10. *Анненков, Б. Н.* Основы сельскохозяйственной радиологии / Б. Н. Анненков, Е. В. Юдинцева. — М., 1991.
11. *Василенко, И. Я.* Токсикология продуктов ядерного деления. — М. : Медицина, 1999.
12. *Василенко, О. И.* Радиационная экология. — М. : Медицина, 2004.
13. *Киршин, В. А.* Ветеринарная противорадиационная защита / В. А. Киршин, В. А. Бударков. — М. : Агропромиздат, 1990.

14. Фокин, А. Д. Сельскохозяйственная радиология / А. Д. Фокин, А. А. Лурье, С. П. Торшин. — СПб. : Лань, 2011.
15. Ярмоненко, С. П. Радиобиология человека и животных / С. П. Ярмоненко, А. А. Вайнсон // под ред. С. П. Ярмоненко. — М. : Высш. шк., 2004.
16. Барсуков, О. А. Радиационная экология / О. А. Барсуков, К. А. Барсуков. — М. : Научный мир, 2003.
17. Цыб, А. Ф. Радиация и патология / А. Ф. Цыб, Р. С. Бударков, И. А. Замулаева [и др.] // под общ. ред. А. Ф. Цыба. — М. : Высш. шк., 2005.
18. Сборник нормативных и методических документов, регламентирующих ведение сельского хозяйства на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. В 3 т. / под ред. Н. И. Санжаровой. — Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2006.
19. Сироткин, А. Н. Основы радиоэкологии сельскохозяйственных животных / А. Н. Сироткин, Р. Г. Ильязов. — Казань, 2000.
20. Бударков, В. А. Радиобиологический справочник / В. А. Бударков, В. А. Киршин, А. Е. Антоненко. — Минск, 1992.
21. Каушанский, Д. А. Радиационно-биологическая технология / Д. А. Каушанский, А. М. Кузин. — М. : Энергоатомиздат, 1984.
22. Кузин, А. М. Прикладная радиобиология / А. М. Кузин, Д. А. Каушанский. — М. : Энергоатомиздат, 1991.



ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
<i>Глава первая</i>	
Физические основы радиобиологии.	
Строение атома. (Л. В. Рогожина)	8
Понятие об изотопах, изомерах, изобарах и изотонах	15
Ядерные силы, дефект массы	16
Явление радиоактивности	19
Естественная радиоактивность и радиоактивные семейства	20
Характеристика радиоактивных излучений	22
Типы ядерных превращений	27
Искусственные преобразования атомных ядер	32
Закон радиоактивного распада	35
Активность радиоактивного элемента и единицы активности	38
Взаимодействие радиоактивных излучений с веществом	40
Взаимодействие корпускулярных излучений с веществом	41
Взаимодействие гамма-излучения с веществом	48
<i>Глава вторая</i>	
Дозиметрия и радиометрия	
ионизирующих излучений. (В. В. Пак)	53
Доза излучения и единицы ее измерения	53
Радиометрия	67
Приборы и средства для обнаружения и измерения ионизирующих излучений	68
Детекторы ионизирующих излучений	68
Приборы для измерения ионизирующих излучений	84
Радиометры	85
Дозиметры	89
Спектрометры	97
Основные методы измерения радиоактивности	101

*Глава третья***Основы сельскохозяйственной радиоэкологии.**

<i>(Н. П. Лысенко)</i>	106
Естественные и искусственные источники ионизирующих излучений	109
Естественные источники ионизирующих излучений	110
Искусственные источники ионизирующих излучений	114
Пути поступления радионуклидов во внешнюю среду	120
Общие закономерности перемещения радиоактивных веществ в биосфере	123
Физико-химическое состояние радионуклидов в воде, почве, кормах	125
Некорневое поступление радионуклидов в кормовые культуры и загрязнение ими продукции животноводства	133
Радиоактивное загрязнение лесных фитоценозов	135
Миграция радионуклидов по сельскохозяйственным цепочкам	137
Поступление радионуклидов в молоко животных	141
Поступление радионуклидов в яйца кур-несушек	143

*Глава четвертая***Токсикология радиоактивных веществ. (Н. П. Лысенко)** 145

Основные факторы, обуславливающие токсичность радионуклидов	146
Классификация радионуклидов по их токсичности для человека и животных	149
Факторы, определяющие степень биологического действия радиоактивных изотопов	149
Характеристика путей поступления радионуклидов и их смесей в организм сельскохозяйственных животных	151
Накопление радионуклидов в органах и тканях	157
Выделение радионуклидов из организма	159
Переход радионуклидов от матери к потомству	162
Метаболизм и токсикология некоторых радионуклидов	163
Переход радионуклидов в продукцию животноводства после разового поступления в организм	183
Накопление радионуклидов в мясе животных при хроническом поступлении	185
Влияние различных факторов на переход радионуклидов из рациона животных в продукцию животноводства	189

*Глава пятая***Ведение животноводства в условиях
радиоактивного загрязнения. (Н. П. Лысенко)** 193

Прогноз поступления радионуклидов в корма и продукцию растениеводства	195
Прогноз поступления радионуклидов в продукцию животноводства	203
Использование кормовых угодий, загрязненных радионуклидами	208

Нормирование поступления радионуклидов в организм сельскохозяйственных животных	219
Режим питания и содержания животных при радиоактивном загрязнении среды	225
Использование веществ, ускоряющих выведение радионуклидов из организма животных	235
Особенности проведения ветеринарных мероприятий в зонах радиоактивного загрязнения	239
Пути использования кормовых угодий, кормов, животных и продукции животноводства, загрязненных радионуклидами	244
Особенности ведения животноводства в условиях Крайнего Севера	259
Природно-климатические условия Крайнего Севера	260
Видовой состав лишайников и других растений	262
Накопление и распределение ¹³⁷ Cs и ⁹⁰ Sr в лишайниках	264
Физиология и рацион северного оленя	269
Поступление ¹³⁷ Cs и ⁹⁰ Sr в организм северного оленя	272
Пути снижения поступления радионуклидов в продукцию оленеводства	276

Глава шестая

Биологическое действие

ионизирующих излучений. (Н. П. Лысенко, В. В. Пак)	280
Механизм биологического действия ионизирующих излучений	280
Теории прямого действия радиации	282
Теории непрямого действия ионизирующих излучений	286
Радиочувствительность животных	298
Влияние ионизирующих излучений на ткани, органы и системы	301
Влияние ионизирующих излучений на кровь и кроветворные органы	316
Влияние ионизирующих излучений на органы размножения и потомство животных	327
Влияние ионизирующих излучений на иммунобиологическую реактивность животных	337
Значение естественной радиоактивности и малых доз радиации в биологических процессах	347

Глава седьмая

Лучевые поражения сельскохозяйственных животных, лучевая болезнь при внешнем облучении.

(В. В. Пак, Н. П. Лысенко)	356
Течение острой лучевой болезни	361
Видовые особенности течения лучевой болезни	370
Патологоанатомические изменения при острой лучевой болезни	375
Диагностика и прогноз острой лучевой болезни	378
Профилактика и лечение лучевой болезни	384

Лучевая болезнь при внутреннем поражении	390
Лучевые поражения кожных покровов	398
Комбинированные лучевые поражения	404
Отдаленные последствия действия радиации	410
<i>Глава восьмая</i>	
Ветеринарно-санитарная оценка продуктов животноводства при радиационных поражениях. (В. В. Пак)	416
Предубойный осмотр, сортировка и убой животных	419
Ветеринарно-санитарная оценка мяса при внешнем гамма-облучении	423
Ветеринарно-санитарная оценка мяса при внутреннем заражении радиоактивными веществами	426
Ветеринарно-санитарная оценка молока	435
Ветеринарно-санитарная оценка яиц кур	441
<i>Глава девятая</i>	
Использование радионуклидов и радиационной биотехнологии в животноводстве и ветеринарии. (Н. П. Лысенко, В. В. Пак, Л. В. Рогожина)	445
Использование радионуклидов в качестве индикаторов (меченых атомов)	446
Использование радионуклидов для диагностики болезней и лечения животных	462
Использование радиационной биотехнологии в сельском хозяйстве	468
<i>Глава десятая</i>	
Радиологический контроль объектов ветеринарного надзора. (В. В. Пак)	502
Радиометрические и дозиметрические методы радиационного контроля	507
Радиационный контроль мясного сырья и крупного рогатого скота	511
Радиационный контроль рыночной продукции	515
Спектрометрические методы радиационного контроля	518
Отбор и подготовка проб	520
Гамма-спектрометрические методы	522
Бета-спектрометрические методы	527
Альфа-спектрометрические методы	528
Радиохимические методы радиационного контроля	530
<i>Глава одиннадцатая</i>	
Основы радиационной безопасности персонала и населения. (З. Г. Кусурова)	542
Регламентация облучения человека	542
Организация работ с источниками ионизирующих излучений	547
Охрана окружающей среды от радиоактивных загрязнений	554
Словарь радиозологических терминов	560
Рекомендуемая литература	564

*Николай Петрович ЛЫСЕНКО
Василий Васильевич ПАК
Лариса Васильевна РОГОЖИНА
Зинаида Георгиевна КУСУРОВА*

РАДИОБИОЛОГИЯ

У ч е б н и к

Под редакцией *Н. П. ЛЫСЕНКО* и *В. В. ПАКА*

Издание четвертое, стереотипное

Зав. редакцией лесохозяйственной
и лесоинженерной литературы *А. С. Копылова*

ЛР № 065466 от 21.10.97

Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»

lan@lanbook.ru; www.lanbook.com

196105, Санкт-Петербург, пр. Ю. Гагарина, д. 1, лит. А.

Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72.

Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 24.11.16.

Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108^{1/32}.

Печать офсетная. Усл. п. л. 30,24. Тираж 100 экз.

Заказ № 342-16.

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета
в ПАО «Т8 Издательские Технологии».

109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.

ГДЕ КУПИТЬ

ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:

Для того, чтобы заказать необходимые Вам книги,
достаточно обратиться в любую из торговых компаний
Издательского Дома «ЛАНЬ»:

по России и зарубежью

«ЛАНЬ-ТРЕЙД»

РФ, 196105, Санкт-Петербург, пр. Ю. Гагарина, 1

тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82

тел./факс: (812) 412-54-93

e-mail: trade@lanbook.ru

ICQ: 446-869-967

www.lanbook.com

пункт меню «Где купить»

раздел «Прайс-листы, каталоги»

в Москве и в Московской области

«ЛАНЬ-ПРЕСС»

109263, Москва, 7-ая ул. Текстильщиков, д. 6/19

тел.: (499) 178-65-85

e-mail: lanpress@lanbook.ru

в Краснодаре и в Краснодарском крае

«ЛАНЬ-ЮГ»

350901, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1

тел.: (861) 274-10-35

e-mail: lankrd98@mail.ru

ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:

интернет-магазин

Издательство «Лань»: <http://www.lanbook.com>

магазин электронных книг

Global F5

<http://globalf5.com/>

Издательство
«ЛАНЬ»  ЛАНЬ®

Мы будем благодарны Вам
за пожелания по издаваемой нами литературе,
а также за предложения по изданию книг
новых авторов или переизданию
уже существующих трудов.
Рукописи не рецензируются и не возвращаются.

Мы заинтересованы в сотрудничестве
с высшими учебными заведениями
и открыты для Ваших предложений
по улучшению нашего взаимодействия.

Теперь вы можете звонить нам бесплатно
из любых городов России по телефону

8-800-700-40-71

Дополнительную информацию
и ответы на вопросы Вы также можете получить,
обратившись по электронной почте:

mae@lanbook.ru