

**Леонова Ю.В., Тютюнькова М.В., Тихонова М.В.,  
Слипец А.А., Соколова Л.А.**

# **РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ**

**учебное пособие**

2-е изд. исп. и доп.



**Калуга 2024**



**Леонова Ю.В., Тютюнькова М.В., Тихонова М.В.,  
Слипец А.А., Соколова Л.А.**

# **РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ**

**учебное пособие**

2-е изд. исп. и доп.

**Калуга 2024**

**УДК 631.95**

**ББК 40.1**

*Рецензенты:*

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, **В.К. Храмой**  
кандидат географических наук, доцент, зав. кафедрой географии и  
безопасности жизнедеятельности **М.В. Захарова**

**Ю.В. Леонова, М.В. Тютюнькова, М.В. Тихонова, А.А. Слипец,  
Л.А. Соколова**

Радиационная экология: учебное пособие / Ю.В. Леонова,  
М.В. Тютюнькова, М.В. Тихонова, А.А. Слипец, Л.А. Соколова. – г. Калуга:  
ИП Якунина В.А., 2024. – С. 138

В учебном пособии изложены основы радиационной экологии. Рассмотрены физические основы радиационной экологии: строение атома, ядра; стабильные и не стабильные изотопы; явление радиоактивности и др. Проанализированы естественные и искусственные источники излучения, поступление радионуклидов в экосистемы и поведение их в почве, в растениях и в организме животных. Представлено действие ионизирующего излучения на живые организмы, в том числе механизм действия на клеточном уровне. Рассмотрено ведение хозяйственной деятельности в условиях радионуклидного загрязнения, даны рекомендации по снижению содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции.

Учебное пособие предназначено для студентов обучающихся по направлениям «Агрономия», «Садоводство», «Зоотехния» и специальности «Ветеринария» в рамках изучения дисциплин «Сельскохозяйственная радиология», «Радиационные технологии в сельском хозяйстве», «Сельскохозяйственная экология» и др.

ISBN 978-5-6050600-9-3

© Леонова Ю.В, Тютюнькова М.В., Тихонова  
М.В., Слипец А.А., Соколова Л.А., 2024

© ФГБОУ ВО КФ РГАУ-МСХА  
имени К.А. Тимирязева, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Радиационная экология. Исторические этапы развития и современные задачи.....	6
Глава 2. Физические основы радиационной экологии.....	17
2.1 Строение атома и ядра. Ядерные силы сцепления.....	17
2.2 Эффект насыщения и дефект массы ядра.....	22
2.3 Понятие о стабильных и нестабильных изотопах.....	23
2.4 Явление радиоактивности.....	25
Глава 3. Радионуклиды в биосфере.....	29
3.1 Радиоактивность окружающей среды.....	29
3.2 Искусственные источники излучения.....	33
3.3 Радионуклиды в наземных экосистемах: поступление в экосистемы и поведение в почве.....	35
3.4 Радионуклиды в наземных экосистемах: поступление в растения, метаболизм в организме животных.....	41
Глава 4. Радиобиология растений и животных.....	47
4.1 Формирование дозовых нагрузок на растения и животных.....	47
4.2 Этапы развития радиационного поражения.....	53
4.3 Теории косвенного и прямого действия.....	54
4.4 Радиохимические процессы в облученном организме.....	56
4.5 Механизм гибели клетки.....	59
4.6 Радиочувствительность растений и факторы ее определяющие.....	60
4.7 Действие ионизирующих излучений на животных.....	63
Глава 5. Крупные радиационные аварии и их экологические последствия.....	71
5.1 Международная шкала ядерных и радиационных событий. Крупные радиационные аварии.....	71
5.2 Радиобиологические последствия радиоактивного загрязнения природных экосистем.....	75

Глава 6. Ведение хозяйственной деятельности в условиях радионуклидного загрязнения.....	79
6.1 Особенности ведения животноводства в условиях загрязнения радионуклидами.....	79
6.2 Использование кормовых угодий, загрязненных радионуклидами.....	84
6.3. Режим питания и содержания животных при радиоактивном загрязнении среды.....	93
6.4 Использование веществ, ускоряющих выведение радионуклидов из организма животных с целью получения пригодной в пищу продукции.....	103
6.5 Перепрофилирование отраслей сельского хозяйства с целью снижения загрязнения продукции.....	105
Тестовые задания.....	109
Глоссарий.....	118
Список литературы.....	129
Приложения.....	131

## ВВЕДЕНИЕ

До середины XX столетия суммарно во всех странах мира было получено несколько десятков граммов радиоактивных веществ, при этом в настоящее время только один ядерный реактор производит порядка 10 тонн искусственных радиоактивных веществ. Развитие техники, технологии, научный прогресс в области промышленности и здравоохранения приводит все большему использованию радиоактивных веществ. Обратной стороной их применения является накопление радиоактивных отходов, а следовательно, и мероприятия, направленные на утилизацию.

Значительный вклад в радиационный фон нашей планеты внесли также ядерные испытания и аварии на радиационно-опасных объектах. За период проведения ядерных испытаний на Земле в биосферу было выброшено 12,5 т продуктов деления. Ядерные испытания привели к тому, что на Земле на 2% повысился естественный радиоактивный фон, изменилось равновесное содержание в атмосфере углерода-14 на 2,6%, трития почти в 100 раз.

Еще большая угроза возникает в результате аварий на радиационно-опасных объектах. Так, авария на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986г. привела к выбросу в биосферу до 15 т радиоактивных веществ. В результате радиоактивная загрязненность отмечена во многих странах, но особенно велики они на ряде территорий Украины, Белоруссии и России. Вследствие этой трагедии на территории Калужской области подверглись радиоактивному загрязнению 10 районов: Ульяновский, Хвастовичский, Жиздринский, Людиновский, Думиничский, Куйбышевский, Кировский, Козельский, Мещевский, Перемышльский. 11 марта 2011г. на северо-востоке Японии произошел взрыв на атомной электростанции Фукусима-I. По состоянию на 15 марта финский орган по ядерной безопасности оценил несчастные случаи на Фукусиме на уровне 6 по шкале INES. 24 марта научный консультант «Гринпис», работающий с данными австрийского ZAMG и французского IRSN, подготовил анализ, в котором он оценил общую аварию на 7 уровне. Авария вызвала ядерное загрязнение в окружающей среде, воде, молочных, овощных и других продуктах питания. В окружающую среду попали в основном летучие радиоактивные элементы, такие как изотопы йода и цезия, объем выброса которых составил до 20 % от выбросов при Чернобыльской аварии. В результате аварий в Мировом

океане затонуло 9 атомных подводных лодок - 5 советских, 2 российских, 2 американских. Два корабля были подняты, остальные семь находятся на дне в разной степени сохранности. В Мировом океане также производилось захоронение радиоактивных отходов.

Все это представляет огромную потенциальную экологическую опасность. Ядерное загрязнение биосферы вызывает серьезную тревогу экологов. Даже при незначительных размерах радиоактивных загрязнений, спектры и энергия излучения от источников ядерного происхождения, характер их метаболизма в почвах, растительности, организмах значительно отличается от метаболизма естественных излучателей этого ряда (от  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ). Отсутствие объективного анализа последствий воздействия факторов радиационных технологий могут привести к неверным оценкам. Решением этих актуальных проблем занимается наука – радиационная экология, исследующая взаимодействие радиационных факторов среды с отдельными составляющими экосистем и экосистемами в целом.

Данное учебно-методическое пособие предназначено для студентов сельскохозяйственных вузов и освещает вопросы поведения радионуклидов в биосфере, их биологического действия на живые организмы, а также особенности ведения сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения.

## ГЛАВА 1. РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ. ИСТОРИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ

*В главе рассмотрены предмет и задачи радиационной экологии как науки, основные этапы её исторического развития, вклад ученых в развитие явления радиоактивности.*

Экология – это наука о взаимодействиях живых организмов между собой и с их средой обитания.

Радиационная экология занимается теми же задачами, что и общая экология, но изучает среду обитания, содержащую радиоактивные элементы. Ошибочно считать, что такие условия – т.е. наличие в природной среде радиоактивных веществ – встречаются не очень часто. Науке сегодня известно более 3000 изотопов химических элементов, и только 300 изотопов, т.е. 10%, являются стабильными. Таким образом, мир в котором мы живем, в значительной степени является радиоактивным. Радиоэкология как наука стоит на «трех слонах» – она изучает:

- 1) закономерности распределения и поведения радионуклидов (РН) в природных средах (почва, водоёмы, атмосфера, растительность, животные),
- 2) формирование дозовых нагрузок на человека и объекты окружающей среды и
- 3) биологические эффекты, которые возникают в живых организмах и их сообществах в результате действия ионизирующих излучений.

В настоящее время в радиационной экологии осуществляется переход от детерминистского рассмотрения биологических последствий облучения к вероятностному подходу, использующему концепцию радиационного риска, так что можно сказать, что классический треугольник превращается в пирамиду, в вершине которой находится задача оценивания радиационных рисков для живых организмов.

В природной среде радионуклиды распространяются между разными компонентами экосистемы и, как и все остальные химические элементы, вовлекаются в круговорот веществ и поступают в пищевые цепочки. Поэтому теоретические знания о поведении радионуклидов в окружающей среде, дозах и биологических эффектах имеют большое значение для решения

практических задач радиоэкологии, таких как минимизация радиационного воздействия на человека и другие живые организмы; снижение вовлечения радионуклидов в биологический круговорот и ограничение их поступления в трофические цепи.

Все науки, имеющие отношение к ионизирующей радиации, являются очень молодыми. Начало развитию этой области знаний было положено тремя великими открытиями, сделанными в конце 19 века: В.К. Рентгеном – открытие рентгеновского излучения в 1895 (Приложение А), А. Беккерелем – явления радиоактивности (Приложение Б) и М. и П. Кюри в 1898 – выделение радия (Приложение В).

Сообщение об открытии Вильгельмом Конрадом Рентгеном (первая Нобелевская премия по физике, 1901) новых невидимых для глаза лучей, получивших название рентгеновских или X-лучей, датировано 28 декабря 1895 г. Более полутора месяцев ученый тщательно исследовал неведомые лучи. Ему удалось установить, что они сильно флюоресцируют под ударами катодных лучей.

Весной 1896 г. французский физик Антуан Анри Беккерель (Нобелевская премия по физике, 1903) сделал ряд сообщений об обнаружении им нового вида излучения, которое испускается солями урана. Подобно открытым за несколько месяцев до этого рентгеновским лучам, оно обладало проникающей способностью, засвечивало экранированную черной бумагой фотопластинку и ионизировало воздух.

Гипотеза, которая привела к открытию радиоактивности, возникла у Беккереля под влиянием исследований В.Рентгена.

Поскольку при генерации X-лучей наблюдалась фосфоресценция стеклянных стенок рентгеновской трубки, Беккерель предположил, что любое фосфоресцентное свечение сопровождается испусканием рентгеновского излучения. Он поместил на пакет фотографических пластинок, завернутых в плотную черную бумагу, люминесцентный материал (сульфат-уранил калия), имевшийся у него под рукой, и в течение нескольких часов подвергал этот сверток облучению солнечным светом.

После этого Беккерель обнаружил, что излучение прошло сквозь бумагу и воздействовало на фотографическую пластинку, что, очевидно, указывало на то, что соль урана испускала рентгеновские лучи, а также и свет после того, как была облучена солнечным светом. Однако, к удивлению Беккереля,

оказалось, что то же самое происходило и тогда, когда такой пакет с фотопластинками помещали в темное место без облучения солнечным светом.

Анри Беккерель, по-видимому, наблюдал результат воздействия не рентгеновских лучей, а нового вида проникающей радиации, испускаемой без внешнего облучения источника.

В мае 1896 г. Беккерель, проведя опыты с чистым ураном, обнаружил, что фотографические пластинки показывали такую степень облучения, которая в три-четыре раза превышала излучение первоначально использовавшейся соли урана. Загадочное излучение, которое, совершенно очевидно, являлось свойством, присущим урану, стало известно как лучи Беккереля.

Многочисленные контрольные опыты показали, что причиной засветки явилась не фосфоресценция, а именно уран, в каком бы химическом соединении он ни находился. Это явление самопроизвольного испускания солями урана лучей особой природы было названо радиоактивностью (от лат. radio – «излучаю»; radius-«луч» и activus - «действенный»).

Своим открытием Беккерель поделился с Пьером Кюри и Марией Склодовской-Кюри. Однажды для публичной лекции он взял у супругов Кюри пробирку с радиоактивным препаратом и положил ее в жилетный карман. На следующий день он обнаружил на теле покраснение кожи в виде пробирки. Беккерель рассказал об этом Пьеру Кюри, который ставит на себе опыт: в течение десяти часов носит привязанную к предплечью пробирку с радием. Через несколько дней у него развивается покраснение, перешедшее затем в тяжелейшую язву, от которой Кюри страдал два месяца. Так впервые опытным путем, было открыто биологическое действие радиации.

В 1896г. российский патофизиолог, биохимик и радиобиолог, профессор Е.С. Лондон начал многолетние широкие исследования по рентгенорадиологии и экспериментальной радиобиологии. Еще в 1901 г. в работе П. Кюри и А. Беккереля, появилась первая официальная информация о патологическом влиянии радиации на кожу, в которой авторы сообщали, что неосторожное обращение с радием вызывало у них ожоги кожи. Понимая необходимость элементарных дозиметрических знаний, Е.С. Лондон и его сотрудник врач-хирург С.В. Гольдберг проводили экспериментальные исследования действия радия на себе. Работа Е.С. Лондона «Радий в

биологии и медицине» (1911) стала первой в мире монографией по радиобиологии.

Основной и очень важной задачей в то время была необходимость точной количественной оценки дозы радиации. Дозиметрия, как раздел физики, количественно оценивающая испускаемую (экспозиционную) и поглощенную энергию излучений, а также активность радиоизотопов, появилась значительно позднее.

Открытие супругами Кюри радиоактивности тория и радиоактивных элементов - полония и радия, испускающих три вида лучей:  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  датировано 1898 годом. Радий заставлял фосфоресцировать многие вещества, неспособные сами по себе излучать свет.

За свои исследования Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри в 1903 г. были удостоены Нобелевской премии по физике. Спустя 8 лет последовала вторая Нобелевская премия по химии, присужденная Марии Кюри «за открытие элементов радия и полония, за выяснение природы радия и выделение его в металлическом виде». Так М. Склодовская-Кюри стала первой женщиной, удостоенной высшей награды, и первым ученым, удостоенным ею дважды.

М. Склодовская-Кюри скончалась в 1934 г. от лучевой болезни. В 1955 г. были обследованы записные книжки Марии Кюри. Они до сих пор излучают из-за радиоактивного загрязнения, внесенного при их заполнении. На одном из листков сохранился также радиоактивный отпечаток пальца ее супруга - Пьера Кюри.

Особенно интенсивно науки, имеющие отношение к ионизирующей радиации, начали развиваться в 30-40-х годах прошлого столетия.

В 1934 г. супругами Иреной и Фредериком Жолио-Кюри была открыта искусственная радиоактивность, за что им была присуждена Нобелевская премия по химии. Открытие искусственной радиоактивности явилось началом нового этапа развития ядерной физики.

Совместно с сотрудниками они изучали также различные ядерные реакции, вызванные действием альфа-частиц и дейтронов, и способы использования искусственных радиоактивных изотопов в качестве меченых атомов. Исследование супругами Жолио-Кюри свойств излучения, возникающего при бомбардировке атомов бериллия альфа-частицами, сыграло большую роль в развитии нейтронной физики.

Ф. Жолио-Кюри впервые доказал (1934), что масса нейтрона несколько больше массы протона.

В конце 30-х годов XX века итальянский физик Энрико Ферми с сотрудниками доказал возможность получения радиоактивности почти у всех элементов под воздействием нейтронной бомбардировки их ядер. Им же в 1942 г. был спроектирован и построен в США первый в мире ядерный реактор, что позволило широко использовать радиоизотопы в научных лабораториях, технике, медицине и сельском хозяйстве.

В 1938 г. Э.Ферми была присуждена Нобелевская премия по физике. В решении Нобелевского комитета говорилось, что премия присуждена ему «за доказательства существования новых радиоактивных элементов, полученных при облучении нейтронами, и связанное с этим открытие ядерных реакций, вызываемых медленными нейтронами». В том же году Энрико Ферми эмигрировал в США, став профессором Колумбийского университета, где руководил исследованиями в области исследования ядерной энергии, участвовал в создании проекта атомной бомбы. В декабре 1942 г. ему с сотрудниками впервые удалось осуществить цепную ядерную реакцию в ядерном реакторе, где в качестве замедлителя нейтронов использовался графит, а в качестве «горючего» – уран.

Что касается влияния радиации на живые организмы, то первые сведения о повреждающем действии ионизирующих излучений, в частности рентгеновского, были опубликованы в 1896 г., когда у ряда больных, которым производились рентгеновские снимки, а также у врачей, работающих с этими лучами, были обнаружены дерматиты.

Поражения кожных покровов возникали и после воздействия лучами радия. Пьер Кюри, желая выяснить их влияние на кожу, облучил собственную руку. В сообщении, сделанном им в Парижской академии наук, он подробно описал процесс поражения.

В те годы применение ионизирующих излучений для просвечивания организма и с лечебной целью имело эмпирический (основанный на опыте, изучении фактов, опирающийся на непосредственное наблюдение, эксперимент) характер, так как многие стороны физических свойств и механизмы биологического действия излучений не были известны. Применение рентгеновского излучения и препаратов радия было

произвольным, поэтому результаты лечения были малоэффективны, а осложнения в виде лучевых поражений наблюдались довольно часто.

Долгое время объектом наблюдения оставалась кожа, так как никто не предполагал, что рентгеновские лучи могут действовать и на глубоко расположенные ткани.

Среди самых ранних работ по изучению биологического действия ионизирующих излучений на животных широкую известность получили классические исследования Н. Ф. Тарханова (1898 г.), установившего в опытах наличие различных реакций на облучение во многих системах организма лягушек и насекомых. Он пришел к выводу, что «X-лучами можно не только фотографировать, но и влиять на ход жизненных функций».

В 1903 г. Альберс-Шонберг обнаружил дегенеративные изменения семяродного эпителия и азоспермию у морских свинок и кроликов, а в 1905 г. Хальберштадтер наблюдал атрофию яичников у облученных животных. Вскоре Броун и Осгоуд выявили азоспермию, явившуюся причиной бесплодия молодых рабочих завода рентгеновских трубок, проработавших на производстве более трех лет.

В 1903 г. в значительной степени под влиянием экспериментов русского исследователя Е. С. Лондона, который обнаружил летальное действие лучей радия на мышей. Хейнике (Германия) применил для этих целей рентгеновские лучи. Он впервые описал лучевую анемию и лейкопению, а также обратил внимание на поражение органов кроветворения, видимое даже невооруженным глазом (например, атрофия селезенки). Он детально описал типичные изменения клеток костного мозга и лимфоузлов при гистологическом исследовании.

В 1905 г. Корнике установил, что под влиянием ионизирующего излучения тормозится деление клеток. Бергонье и Трибондо выявили неодинаковую чувствительность разных клеток к облучению. На основании этих экспериментов они в 1906 г. сформулировали положение, вошедшее в радиобиологию как правила Бергонье и Трибондо: чувствительность клеток к облучению прямо пропорциональна митотической активности и обратно пропорциональна степени их дифференцированности. Позднее в правила Бергонье и Трибондо были внесены существенные коррективы.

В указанный период начали изучать действие ионизирующей радиации на эмбриогенез. Было обнаружено возникновение различных аномалий при облучении на определенных стадиях развития эмбриона.

В 1925 г. в опытах на дрожжевых клетках и плесневых грибах Г. Н. Надсон и Г. Ф. Филиппов выявили действие ионизирующих излучений на генетический аппарат клетки, сопровождающееся наследственной передачей вновь приобретенных признаков. Так, исследуя влияние рентгеновских лучей на половой процесс у низших грибов, они обратили внимание на появление отдельных колоний оранжевого цвета. Изучение этих новых форм грибов показало их резкое отличие от исходной культуры — они были способны образовывать жир и оранжевый пигмент. Наблюдая данные грибы в течение многих поколений, ученые твердо установили, что имеют дело с наследуемым изменением и что, таким образом, рентгеновские лучи обладают мутагенным действием. В 1927 г. это подтвердил Г. Мюллер на дрозофиле, а затем Л. Стадлер на кукурузе. В дальнейшем исследования были проведены на мышах и других организмах.

За период длиной всего в 120 лет, было получено немало знаний, создано много новых технических устройств и несколько раз менялось отношение человечества к радиоактивности и ядерной энергии.

Можно выделить три основных этапа на этом пути. Первый связан с изучением естественной радиоактивности, второй — с открытием цепной реакции деления, развитием военных ядерных программ и гонкой вооружений, третий — с разработкой и внедрением технологий мирного использования ядерной энергии.

В соответствии с этими этапами менялись и задачи радиационной экологии.

Сразу после открытия радиоактивности в мире возник огромный интерес к этому явлению, которое начали изучать с большим энтузиазмом во многих странах и лабораториях. Начались активные поиски радиоактивных минералов, изучение их распределения в почвах и природных водах, исследование их свойств, а также первые исследования биологического действия природных радиоактивных элементов на живые организмы.

Первые радиоэкологические исследования в Российской Империи были начаты под руководством выдающегося отечественного ученого академика В.И. Вернадского, который еще в начале XX в. поставил ряд общих задач,

заклучавшихся в изучении качественного и количественного распределения естественных радионуклидов ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и др.) в земной коре, а также в систематическом изучении радиоактивности воздуха, природных вод и других компонентов внешней среды. В тот период имело место огромное восхищение открывающимися возможностями использования энергии атомного ядра. Взять хотя бы следующее высказывание Владимира Ивановича Вернадского из его доклада Российской академии наук: «источники атомной энергии, их сила и мощь, превосходящие все ранее известное человеку».

Но, несмотря на всеобщую эйфорию, видные ученые хорошо понимали уже тогда, что обладание этой мощной силой представлять угрозу для человечества. К сожалению, именно так и случилось в истории. Первые впечатляющие примеры использования ядерной энергии относятся к военным применениям. С открытием цепной реакции деления начались интенсивные работы по созданию ядерного оружия. Ядерные испытания в значительном количестве проводились в 40-60-ых годах. Хорошо известно, что ведущую роль играли две державы – США и СССР. Наряду с огромным техническим прогрессом, этот период характеризуется рядом печальных событий.

Наиболее серьезные последствия для биосферы связаны с глобальными выпадениями продуктов деления, которые распространились на всю планету и привели к радиоактивному загрязнению атмосферы, мирового океана и земной поверхности.

Середина прошлого века – это ядерные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, сбросы радиоактивных отходов в окружающую среду, аварийные ситуации на оружейных производствах, в результате которых радиационному воздействию подверглись как люди, так и природные объекты. Сегодня эти последствия носят название ядерного наследия.

В этот период были начаты систематические радиоэкологические исследования по изучению поведения продуктов деления в экосистемах, накопления продуктов ядерного деления растениями и животными, действия на них ионизирующих излучений. Специальной задачей являлось моделирование и прогнозирование возможных последствий ядерной войны и ядерной зимы.

Особое место в становлении советской и мировой радиоэкологии заняли исследования на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, образовавшегося после аварии в 1957 г., и имевшего площадь около 30 тыс. кв. км. На этой территории были изучены закономерности миграции долгоживущих продуктов ядерного деления (в первую очередь,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ), особенности их накопления растениями и метаболизм в организме животных и человека, исследованы биологические эффекты ионизирующих излучений.

Здесь впервые изучали возможности получения продуктов питания на радиоактивно загрязненной территории.

Третий этап развития радиоэкологии, продолжающийся по настоящее время, связан со смещением акцентов в сторону мирного использования ядерной энергии, интенсивным развитием ядерной энергетики и использованием радиационных технологий в различных отраслях промышленности. Область радиоэкологических исследований в этот период связана с изучением воздействия на окружающую среду предприятий АТЦ в штатном режиме функционирования, а также при аварийных ситуациях. Опыт крупных радиационных аварий, в первую очередь Чернобыльской, показал всему миру проблемы, связанные с радиоактивным загрязнением внешней среды, решение которых невозможно без знаний фундаментальных и прикладных вопросов радиоэкологии. В этот период были детально изучены закономерности миграции техногенных радионуклидов в природных средах и механизмы действия ионизирующих излучений на живые организмы; разработаны эффективные контрмеры по ограничению вовлечения радионуклидов в пищевые цепочки и снижению уровней облучения населения.

Сегодня проблему обеспечения радиационной безопасности человечества необходимо рассматривать как в условиях продолжающихся активностей в военной области, так и в связи с развитием мирного использования атома как в энергетической, так в неэнергетической сферах. Во всех случаях обеспечение радиационной безопасности является самой приоритетной задачей.

Испытания ядерного оружия привели к локальному и глобальному загрязнению биосферы радиоактивными веществами, часть из которых является долгоживущими и будет продолжать оказывать воздействие на биосферу еще многие годы. Несмотря на достигнутые в мире договоренности

по прекращению ядерных испытаний и сокращению запасов ядерного оружия, опасность ядерной войны сегодня не исчезла. Всем хорошо известна ситуация с Северной Кореей, которая развернула собственную ядерную программу и провела ряд ядерных испытаний в последние годы. Существует опасность продолжения создания и применения ядерного оружия и со стороны других государств или отдельных террористических группировок. Продолжение ядерных испытаний может превратить потенциальную опасность радиоактивного загрязнения в реальную угрозу, если уровень радиоактивного загрязнения окружающей среды превысит допустимый. Среди мирных применений атомной энергии люди, пожалуй, лучше всего осведомлены о ядерной энергетике.

Сегодня 32 страны обладают АЭС, многие страны планируют построить новые атомные станции или новые энергоблоки. В процессе функционирования мирных отраслей атомной техники в окружающую среду также попадает некоторое количество радиоактивных веществ, т.к. при штатной работе АЭС, предприятий ЯТЦ, научных лабораторий проводятся разрешенные сбросы и выбросы радиоактивных веществ в допустимых пределах. Этот процесс неизбежен также, как неизбежно загрязнение окружающей среды другими отходами современной промышленности и цивилизации.

В этих условиях необходимо контролировать уровень радиоактивных загрязнений и принимать меры к ограничению воздействия на окружающую среду и уменьшению доз облучения живых организмов.

Растет число других областей мирного использования ядерных технологий. Среди них ядерная медицина и промышленность, сельское хозяйство и экология, наука и искусство.

Во всех случаях необходимо ясное понимание того, какие радиоактивные вещества могут поступать в окружающую среду, какими путями они могут перемещаться и включаться в биогеохимические циклы, какую опасность они могут представлять для живых организмов. Все это – задачи радиационной экологии на современном этапе. Очевидно, что понимание радиоэкологических процессов позволит аргументированно преодолевать как невежественную радиофобию, так и беспечное отношение к радиационной безопасности.

### **Вопросы для самоконтроля и самостоятельного изучения**

1. *Что изучает радиационная экология? Какие решает практические задачи?*
2. *История становления радиоэкологии, как науки, этапы ее развития.*
3. *Какие три открытия положили начало развитию знаний в области радиологии?*
4. *Какие ученые внесли наиболее существенный вклад в становление радиоэкологии, как науки?*
5. *Как менялось отношение человечества к радиоактивности и ядерной энергии?*
6. *Задачи радиоэкологии в настоящее время.*

## ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОЙ ЭКОЛОГИИ

*Глава содержит сведения о строении атома (с историей открытия) и ядра, основных силах, удерживающих частицы в ядре, разновидностях атомов с одинаковым зарядом ядра, также в главе обсуждаются актуальные проблемы, связанные с явлением радиоактивности, распространением естественных и техногенных радионуклидов в различных природных средах.*

### 2.1 Строение атома и ядра. Ядерные силы сцепления

Еще в V веке до нашей эры греческие мыслители Левкипп и Демокрит сформулировали результаты своих размышлений о структуре материи в виде атомистической гипотезы: вещество невозможно бесконечно делить на все более мелкие части, существуют «окончательные», неделимые частицы вещества. Все материальные предметы состоят из разнообразных атомов (от греч. atomos - «неделимый», «неразрезаемый»).

Атом – это наименьшее структурное образование любого из простейших химических веществ, называемых элементами. Хотя понятие атома, как и сам термин, имеет древнегреческое происхождение, только в XX веке была твердо установлена истинность атомной гипотезы строения веществ.

Размер и масса атомов чрезвычайно малы. Так, диаметр самого легкого атома (водорода) составляет всего  $0,53 \cdot 10^{-8}$  см, а его масса  $1,67 \cdot 10^{-24}$  г.

Развитие исследований радиоактивного излучения, с одной стороны, и квантовой теории - с другой, привели к созданию квантовой модели атома Резерфорда - Бора. Но созданию этой модели предшествовали попытки построить модель атома на основе представлений классической электродинамики и механики.

Ученик Джозефа Томсона Эрнест Резерфорд (Нобелевская премия по химии, 1908) в результате знаменитых экспериментов по рассеянию золотой фольгой  $\alpha$ -частиц «разделил» атом на маленькое положительно заряженное ядро и окружающие его электроны. Согласно ей он напоминал миниатюрную солнечную систему, в которой «планеты» - электроны вращаются вокруг «Солнца» - ядра.

Благодаря работам Резерфорда стало ясно, как устроены атомы: в середине атома находится крохотное массивное ядро, а вокруг ядра «роятся» электроны и образуют легкую оболочку атома. При этом электроны, располагаясь и вращаясь в разных плоскостях, создают отрицательный суммарный заряд, а ядро - положительный. В целом же атом остается электронеутральным, так как положительный заряд ядра полностью компенсируется отрицательным зарядом электронов.

Однако, согласно законам классической механики и электродинамики, вращение электрона вокруг ядра должно сопровождаться электромагнитным излучением с непрерывным спектром. Но это противоречило известным еще с 1880 г. линейчатым спектрам газов и паров химических элементов. Противоречие разрешил в 1913 г. ученик Резерфорда датский физик Нильс Бор (Нобелевская премия по физике, 1922), разработав квантовую модель строения атома на основе квантовой теории излучения и поглощения света, созданной Максом Планком (Нобелевская премия по физике, 1918) и Альбертом Эйнштейном (Нобелевская премия по физике, 1921).

При этом Бору удалось объяснить и рассчитать теоретически линейчатые спектры испускания атомов водорода, а также серии линий в рентгеновских спектрах элементов.

В 1932 г. наш отечественный физик Дмитрий Дмитриевич Иваненко и немецкий ученый Вернер Гейзенберг (Хайзенберг) независимо друг от друга высказали предположение, что нейтрон является наряду с протоном структурным элементом ядра. Однако, протонно-нейтронная модель ядра была встречена большинством физиков скептически. Даже Э. Резерфорд полагал, что нейтрон - это лишь сложное образование протона и электрона.

В дальнейшем протон и нейтрон стали рассматриваться как два состояния одной частицы - нуклона, и идея Иваненко стала общепринятой, а в 1932 г. в составе космических лучей была открыта еще одна элементарная частица - позитрон.

В настоящее время существует гипотеза о делимости ряда элементарных частиц на субчастицы – кварки.

Кварки - это гипотетические частицы, из которых, как предполагается, могут состоять все известные элементарные частицы, участвующие в сильных взаимодействиях (адроны).

Итак, атомы состоят из трех видов элементарных частиц. В центре атома имеется ядро, образованное протонами и нейтронами. Вокруг него быстро вращаются электроны, образуя так называемые электронные облака. Количество протонов в ядре равно количеству электронов, движущихся вокруг него. Масса протона примерно равна массе нейтрона. Масса электрона гораздо меньше их масс (1836 раз).

Электрон (e-) - это устойчивая элементарная частица массой  $9,1 \cdot 10^{-28}$  г. Напомним еще раз, что он был открыт в 1897 г. английским физиком Джозефом Джоном Томсоном.

Название «электрон» первоначально предложенное английским учёным Джорджем Стони (1891) для заряда одновалентного иона происходит от греческого слова *elektron*, означающего «янтарь». Его заряд, измеренный в свое время американским физиком Робертом Милликеном (Нобелевская премия по физике, 1923), представляет собой наименьшее количество отрицательного электричества, существующее в природе. В зависимости от своей энергии, с которой электроны удерживаются вокруг ядра, они распределяются по электронным оболочкам или орбитам, которые обозначаются цифрами или буквами, начиная от ядра: 1-K, 2-L, 3-M, 4-N, 5-O, 6-P, 7-Q.

Максимальное количество электронов, вращающихся на каждой орбите, строго определено. Так, на орбите K их только 2, L-8, M-18, N-32 и т.д. Атомы, у которых внешняя электронная оболочка заполнена полностью, обладают особенно высокой устойчивостью и образуют группу химически неактивных инертных («благородных») газов (He, Ne, Ar, Kr, Xe и Rn).

Под действием бомбардировок элементарными частицами или квантами извне электроны способны переходить с одних орбит на другие или покидать пределы атома, присоединяясь к электронным оболочкам других атомов.

В первом случае возникает возбуждение, а во втором - ионизация атома.

Электрон участвует в электромагнитных, слабых и гравитационных взаимодействиях и проявляет многообразие свойств в зависимости от типа взаимодействий. Электрон - представитель единого обширного семейства элементарных частиц, и ему в полной мере присуще одно из основных свойств элементарных частиц - их взаимопревращаемость.

Ядро атома имеет в среднем размер  $10^{-13}$  см, что меньше диаметра самого атома от 10 до 100 тысяч раз. В его состав входят ядерные частицы -

нуклоны (от греч. nucleos – «ядро»), которые представлены протонами и нейтронами.

Протон (p) – это устойчивая элементарная частица массой 1,008 а.е.м., что превышает массу электрона в 1836 раз. Эта частица несет в себе положительный одинарный заряд. Как известно, за одну атомную единицу массы в химии принята масса 1/12 части ядра изотопа C12, что составляет  $1,66 \cdot 10^{-27}$  кг.

Протон является сильно взаимодействующей частицей (адрон) и относится к «тяжёлым» адронам - барионам. Важнейшим примером сильного взаимодействия с участием протона являются ядерные силы, связывающие нуклоны в ядре.

Нейтрон (n) был открыт в 1932 г. английским физиком Джеймсом Чедвиком (Нобелевская премия по физике, 1935) при облучении бериллиевой мишени потоком альфа-частиц, создаваемых полонием. Чедвик установил, что обнаруженное ранее немецкими физиками В.Боте и Г.Бекером проникающее излучение, которое возникает при бомбардировке атомных ядер  $\alpha$ -частицами, состоит из незаряженных частиц массой, близкой к массе протона.

Нейтрон устойчив только в составе стабильных атомных ядер. В свободном состоянии - это нестабильная частица, распадающаяся на протон, электрон и электронное антинейтрино.

Итак, протоны, входящие в ядро, определяют его заряд, а сумма масс протонов и нейтронов – его массу, которая практически и составляет массу самого атома ввиду ничтожности величины масс электронов.

Число протонов в ядре всегда равно числу электронов. В ядрах легких и устойчивых изотопов число p и n совпадает (H- 1p и 1n, He – 2p и 2n, O – 8p и 8n и т.д.). В ядрах же тяжелых элементов количество нейтронов существенно превышает число протонов.

Для характеристики соотношения нуклонов в ядерной физике и химии принята следующая запись элементов:

$${}^A_ZX, \text{ где}$$

X - символ элемента;

A - массовое число;

Z - заряд ядра (порядковый номер).

Таким образом, число протонов соответствует величине  $Z$ , а число нейтронов можно рассчитать по формуле:

$$n = A - Z.$$

Например,  ${}_{92}^{238}\text{U}$        $A = 238; Z = 92; n = 238 - 92 = 146$

Нуклоны в ядре могут взаимно переходить друг в друга:

1)  $p \rightarrow n + e^+$  (позитрон) +  $\nu$  (нейтрино) +  $Q$

2)  $n \rightarrow p + e^-$  (электрон) +  $\bar{\nu}$  (антинейтрино) +  $Q$

В результате этих переходов нейтроны и протоны остаются в ядре, а позитроны, электроны, нейтрино и антинейтрино вылетают из него.

Протоны ядра, неся положительный заряд, испытывают силу взаимного отталкивания, которая выражается законом Кулона: электрическая сила взаимодействия двух точечных элементарных зарядов прямо пропорциональна их величине и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Так как расстояние между протонами в ядре ничтожно мало, величина силы отталкивания чрезвычайно велика. Что же удерживает протоны в ядре?

Нейтрон не обладает электрическим зарядом, и электрические силы на него не действуют. Поэтому физики предположили, что внутри ядра действуют какие-то неизвестные до сих пор силы, которые «склеивают» протоны и нейтроны в единое ядро. Вскоре стали известны свойства этих сил, и в 1935 г. японский физик-теоретик Хидэки Юкава создал мезонную теорию ядерных сил взаимодействия.

Ядерные силы сцепления существуют благодаря наличию двух основных факторов:

1) нейтроны ядра выполняют роль своеобразного «разбавителя-буфера» протонов, не давая им взаимодействовать между собой;

2) между протонами и нейтронами действуют силы взаимного притяжения, которые отличны от электромагнитных и гравитационных сил.

Эти силы отличны от хорошо известных электростатических и гравитационных сил, не исчезающих даже на очень больших расстояниях.

Ядерные силы являются силами притяжения, что прямо следует из факта существования устойчивых ядер, вопреки электростатическому отталкиванию находящихся в них протонов. В пределах своего радиуса действия (до 10-13 см) ядерные силы достигают очень большой величины.

## 2.2 Эффект насыщения и дефект массы ядра

Эффект насыщения ядра связан с силами взаимного сцепления нуклонов. Последние определяются соотношением числа протонов и нейтронов в ядре. В стабильных (нерадиоактивных) ядрах соотношение  $p$  к  $n$  составляет обычно 1:1-1,2. В ядрах тяжелых радионуклидов это соотношение существенно сдвигается в сторону нейтронов и достигает значения 1:1,6.

Нуклоны в ядрах находятся в состояниях, существенно отличающихся от их свободных состояний. За исключением ядра обычного водорода во всех ядрах имеется не менее двух нуклонов, между которыми существует особое ядерное сильное взаимодействие - притяжение - обеспечивающее устойчивость ядер, несмотря на отталкивание одноименно заряженных протонов.

Энергией связи нуклона в ядре называется физическая величина, равная той работе, которую нужно совершить для удаления нуклона из ядра без сообщения ему кинетической энергии.

Энергия связи ядра определяется величиной той работы, которую нужно совершить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны без придания им кинетической энергии. Из закона сохранения энергии следует, что при образовании ядра должна выделяться такая же энергия, какую нужно затратить при расщеплении ядра на составляющие его нуклоны. Отсюда, энергия связи ядра является разностью между энергией всех свободных нуклонов, составляющих ядро и их энергией в ядре.

Еще в 1927 г. английский химик Фрэнсис Астон, измеряя атомные веса различных элементов, экспериментально доказал, что фактическая масса любого стабильного или нестабильного ядра меньше расчетной суммы масс входящих в него частиц на несколько десятых долей процента. Эта разница между теоретической (расчетной) и фактической массами ядра получила название дефекта массы, что выражается следующей формулой:

$$\Delta m_{\text{ядра}} = m_{\text{ядра теоретическая}} - m_{\text{ядра фактическая}}$$

Таким образом, при образовании ядра происходит уменьшение его массы: масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов. Уменьшение массы ядра при его образовании объясняется выделением энергии связи.

Одной атомной единице массы соответствует атомная единица энергии связи (а.е.э.):  $1 \text{ а.е.э.} = 931,5016 \text{ МэВ}$ .

Например, необходимо рассчитать  $\Delta m$  ядра гелия, состоящего из 2 протонов и 2 нейтронов. Находим расчетным путем массу ядра, подставляя уже известные нам величины масс протона и нейтрона:  $m_{\text{я}}\text{He} = 2,1,008 + 2,1,009 = 4,034 \text{ а.е.м.}$  Фактическая же масса ядра гелия составляет  $4,003 \text{ а.е.м.}$ , т.е. меньше расчетной примерно на  $0,03 \text{ а.е.м.}$

Этот дефект массы указывает на то, что при образовании ядра гелия часть масс нуклонов преобразуется в энергию связи, необходимую для существования ядра.

Ее расчет по формуле Эйнштейна ( $E_{\text{св}} = \Delta m c^2$ ) приводит к следующему:  $0,03 \cdot 931,5016 = 27,945 \text{ МэВ}$ . Получаем огромную величину. Образование всего 1 г гелия сопровождается выделением энергии порядка  $10^{12} \text{ Дж}$ . Примерно такая же энергия выделяется при сжигании почти целого вагона каменного угля.

### 2.3 Понятие о стабильных и нестабильных изотопах

Одним из главных открытий выдающегося английского радиохимика Фредерика Содди стало открытие явления изотопии элементов (Нобелевская премия по химии, 1921). Изотопы - это разновидности атомов одного и того же элемента, занимающие в периодической системе одно и то же место. Термин «изотоп» был предложен Содди в 1910 г. на основе двух греческих слов: *isos* - «равный», «одинаковый» и *topos* - «место».

Другими словами, изотопы это разновидности атомов одного и того же химического элемента, имеющие одинаковый заряд ядра, но разную атомную массу. Ф.Содди говорил, что изотопы одинаковы «снаружи», но отличаются «внутри».

Сначала Ф.Содди нашел изотопы нескольких радиоактивных элементов, а потом обнаружил и нерадиоактивные. Отличить изотопы друг от друга Содди смог из-за различия их физических свойств.

Большой вклад в развитие учения об изотопах внес также выдающийся английский химик Фрэнсис Астон. В 1913 г. он совместно с Дж.Томсоном

впервые получил подтверждение существования стабильных изотопов у неона.

Им был сконструирован первый масс-спектрометр, с помощью которого были открыты 213 устойчивых изотопов химических элементов и определена их относительная распространенность. В 1922 г. ученому была присуждена Нобелевская премия по химии «за сделанное им с помощью им же изобретенного масс-спектрографа открытие изотопов большого числа нерадиоактивных элементов и за формулирование правила «целых чисел».

Итак, практически все элементы периодической системы Д.И. Менделеева имеют несколько изотопов. При этом их химические свойства довольно близки. А физические могут кардинально отличаться. Это связано с различным эффектом насыщения ядер, и, следовательно, величиной дефекта массы ядра и ядерных сил сцепления между нуклонами.

В связи с этим изотопы одного и того же химического элемента могут быть как стабильными, так и нестабильными, т.е. радиоактивными.

Стабильные изотопы не подвергаются радиоактивному распаду, поэтому они и сохраняются в природных условиях.

Примерами стабильных изотопов являются  $^{16}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{19}\text{F}$ . Большинство природных элементов состоит из смеси двух или большего числа стабильных изотопов. Стабильных (нерадиоактивных) изотопов известно около 300. Из них состоит большинство химических элементов периодической системы элементов. Из всех элементов наибольшее число стабильных изотопов имеет олово (10 изотопов). В редких случаях, например у алюминия, в природе встречается только один стабильный изотоп, а остальные изотопы неустойчивы. У некоторых элементов, наряду со стабильными, имеются и долгоживущие радиоактивные изотопы. Это  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{115}\text{In}$  и др.

Радиоактивные изотопы подразделяются, в свою очередь, на естественные и искусственные — и те и другие самопроизвольно распадаются, испуская при этом  $\alpha$  - или  $\beta$ -частицы до тех пор, пока не образуется стабильный изотоп. Искусственные радиоактивные изотопы получают с помощью ядерных реакций. Все они неустойчивы и в результате радиоактивного распада превращаются в изотопы других элементов. Радиоактивные изотопы получены для всех химических элементов. Их известно около 1500. Элементы, состоящие только из радиоактивных изотопов, называются радиоактивными. Это элементы с порядковым

номером 43 (технеций), 61(прометий) и 84 – 107 (полоний, астат, радон, франций, радий, актиний...). Относительные атомные массы нестабильных элементов указаны в периодической системе химических элементов в квадратных скобках. По химическим свойствам радиоактивные изотопы почти не отличаются от стабильных. Поэтому, они служат в качестве “меченых” атомов, позволяющих по измерению их радиоактивности следить за поведением всех атомов данного элемента и за их передвижением. Радиоактивные изотопы широко применяются в научных исследованиях, в промышленности, сельском хозяйстве, медицине, биологии и химии. В настоящее время их получают в больших количествах.

## 2.4 Явление радиоактивности

Работами В.Рентгена, А.Беккереля и супругов Кюри было открыто явление радиоактивности. По предложению Марии Склодовской-Кюри все вещества, обладавшие способностью испускать лучи, были названы радиоактивными. Под радиоактивностью понимают явление самопроизвольного превращения одних ядер в другие с выделением ионизирующих излучений.

Открытие радиоактивности оказало огромное влияние на развитие науки и техники. Оно ознаменовало начало эпохи интенсивного изучения свойств и структуры вещества. Новые перспективы, возникшие в энергетике, промышленности и многих других областях человеческой деятельности благодаря овладению ядерной энергией, были вызваны к жизни обнаружением способности химических элементов к самопроизвольным превращениям.

За работы, связанные с исследованием и применением радиоактивности, было присуждено более десяти Нобелевских премий по физике и химии, в том числе Анри Беккерелю, супругам Кюри, Энрико Ферми, Эрнесту Резерфорду, супругам Жолио-Кюри, Дьёрдю Хевеши, Отто Гану, Эдвину Макмиллану, Гленну Сиборгу, Уилларду Либби и др.

Радиоактивный распад – статистическое явление, имеющее вероятностный характер. Нельзя точно сказать, когда ядро распадётся, но можно предсказать вероятность распада за некоторый промежуток времени.

Введем постоянную радиоактивного распада  $\lambda$ : вероятность распада ядра за единицу времени равна доле ядер, распадающихся за 1 с. Таким образом, из числа ядер  $N$  в среднем распадется  $\lambda N$  ядер. Величина  $A$ , равная  $\lambda N$  называется активностью нуклида. Это число распадов, происходящих с ядрами образца за 1 с (скорость распада). Единица активности в системе СИ – беккерель (Бк). 1 Бк – активность нуклида, при которой за 1 с происходит 1 распад. внесистемная единица – кюри. 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

Закон радиоактивного распада будет иметь вид:

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

где  $N_0$  – начальное число нераспавшихся ядер в момент времени  $t = 0$ ;  $N$  – число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ . Согласно этому закону число нераспавшихся ядер убывает экспоненциально. Интенсивность процесса радиоактивного распада характеризуется периодом полураспада ( $T_{1/2}$ ) – временем, за которое в среднем число нераспавшихся ядер уменьшается вдвое. Таким образом,

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda.$$

Также можно показать, что среднее время жизни радиоактивного ядра есть величина, обратная постоянной радиоактивного распада  $\tau = 1/\lambda$ , например у полония  $\tau = 200$  сут, у урана  $^{235}\text{U}$   $\tau = 109$  лет.

С открытием в начале XX века явления радиоактивного распада появилась возможность установления абсолютного возраста любых геологических образований.

В 1896 году А. Беккерель открыл явление радиоактивности. В 1905 году А. Эйнштейн установил, что в ядерных реакциях массу можно рассматривать как чрезвычайно концентрированную форму энергии, и вывел свою знаменитую формулу их эквивалентности:  $E = mc^2$ , где  $c$  – скорость света. Величина  $c^2$  чрезвычайно велика, а потому даже небольшое количество массы эквивалентно огромному количеству энергии: 1 г массы = 21,5 млрд ккал (столько энергии выделится, если сжечь два с половиной миллиона литров бензина).

Открытие радиоактивности имело большое прикладное значение, в том числе это позволило определять возраст геологических образований и археологических находок. Радиоизотопным методом был определен возраст нашей планеты. Суть этого метода заключается в следующем. Известно, что атом урана нестабилен: он испускает энергию, потоки частиц, и со временем

превращается в атом свинца - устойчивого элемента, не подверженного дальнейшим превращениям. Природа этого типа реакций такова, что скорость ядерного распада абсолютно постоянна, и никакие внешние факторы (температура, давление) на нее не влияют. Значит, если экспериментально определить темп этих изменений за короткий промежуток времени, то его можно совершенно точно предсказать и для более длительного промежутка. Так вот, было установлено, что в любой порции урана (точнее - изотопа  $^{238}\text{U}$ ) половина составляющих его атомов превратится в свинец за 4,5 млрд лет; соответственно, через 9 млрд лет урана останется  $1/2$  от  $1/2$ , то есть четверть, и т.д. Срок в 4,5 млрд. лет называют периодом полураспада  $^{238}\text{U}$ .

Пусть мы имеем горную породу, содержащую соединения урана. Если она остается нераздробленной, то все атомы свинца (в которые постоянно превращаются атомы урана) остаются внутри породы, и в результате уран все более "загрязняется" свинцом. Поскольку, как мы помним, внешние факторы не влияют на скорость этого процесса, степень "загрязнения" будет зависеть только от времени, в течение которого порода оставалась монолитной. Последнее обстоятельство весьма важно: таким способом можно устанавливать время образования изверженных пород, но не осадочных - те всегда разрушены, и уран/свинцовое соотношение в них необратимо нарушено миграцией этих элементов в окружающую среду.

Определять возраст изверженных пород уран-свинцовым методом (впоследствии появились калий-аргоновый, рубидий-стронциевый и некоторые другие) начали в 1907 году, и очень скоро обнаружили граниты с возрастом 1 млрд лет. По мере дальнейших поисков этот "максимальный известный возраст" быстро увеличивался, пока не достиг 3,5 млрд лет, после чего, несмотря на все усилия, почти не прирастал; древнейшие же из известных минералов были недавно найдены в Австралии - 4,2 млрд лет (известный Сибирский "рекорд" - 4,5 млрд лет - не подтвердился повторными анализами). Значит, Земля никак не моложе 4,2 млрд лет; но, может быть, она еще старше, и породы с возрастом 7 или, скажем, 20 млрд лет просто пока не найдены? Судя по всему, нет - и вот почему. Дело в том, что возраст всех изученных на этот предмет метеоритов составляет 4,5-4,6 млрд лет; возраст всех горных пород, собранных в девяти районах Луны американскими экспедициями "Аполлон" и советскими автоматическими станциями "Луна",

также варьирует от 4 до 4,5 млрд лет. Все это свидетельствует о том, что цифра "4,6 млрд лет" верно отражает реальный возраст не только Земли, но и всей Солнечной системы.

### ***Вопросы для самоконтроля и самостоятельного изучения***

- 1. Какие существовали модели строения атома? Какая модель строения атома принята в настоящее время?*
- 2. Какие элементарные частицы входят в состав атома?*
- 3. Мезонная теория ядерных сил взаимодействия Хидэки Юкава*
- 4. Понятие возбуждения и ионизации атома.*
- 5. Что такое дефект массы ядра? Какой формулой он выражается?*
- 6. Явление изотопии элементов. Понятие стабильных и радиоактивных изотопов элементов.*
- 7. Открытие явления радиоактивности. Влияние этого открытия на развитие науки и техники.*
- 8. Радиоактивный распад. Закон радиоактивного распада.*
- 9. В чем практическое значение закона радиоактивного распада?*

## ГЛАВА 3. РАДИОНУКЛИДЫ В БИОСФЕРЕ

*В главе приводятся характеристики видов радионуклидов различного происхождения, источников радиоактивности, основных радиоактивных изотопов в окружающей среде, путей поступления радионуклидов в растения и организм животных. Освещаются вопросы влияния радиоактивности и радиоактивных элементов на биоту и человека.*

### 3.1 Радиоактивность окружающей среды

Изучению естественной радиоактивности окружающей среды были полностью посвящены первые 40 лет радиационной экологии. Согласно современной науке, вещество состоит из атомов, которые состоят из ядра и вращающихся вокруг него электронов. Ядра атомов некоторых химических элементов, называемых нестабильными, могут делиться, распадаться. Этот процесс называется радиоактивностью. При распаде атома высвобождается большая энергия, которая испускается в виде элементарных частиц, фотонов и осколков деления.

Очень важно понимать, что радиоактивность – это природное явление, которое существует с момента рождения Вселенной и ее возникновение, конечно, никак не связано с деятельностью человека. Источники радиоактивности естественного происхождения находятся абсолютно во всех объектах окружающей среды: в почве и скалах, воде, воздухе, растениях и животных, человеческих телах. Население земного шара постоянно подвергается воздействию естественных источников радиации, которые подразделяют на две основные группы: космического и земного происхождения.

К первой группе относятся космические излучения и космогенные радионуклиды.

Также существуют естественные радионуклиды земного происхождения, называемые первичными радионуклидами.

Космическое излучение состоит из потоков частиц с высокими энергиями. В основном это ядра легких элементов – водорода, гелия и

других. При прохождении через атмосферу первичные космические частицы создают мощные потоки вторичного излучения.

Средняя доза, создаваемая космическим излучением для основной части населения земного шара, составляет 0,37 мЗв/год, но она отличается в разных местах нашей планеты. Интенсивность космического излучения немного выше на полюсах, чем на экваторе (примерно на 15%), из-за того, что заряженные частицы отклоняются магнитным полем Земли. Но гораздо сильнее уровень космического излучения зависит от высоты над уровнем моря, т.к. с увеличением высоты снижается защитное действие атмосферы. Доза излучения увеличивается в 2 раза при подъеме на каждые 1500 м. Поэтому для людей, живущих в горах, дозы облучения повышены. Интересно подчеркнуть, что на Земле есть крупные города с населением в несколько миллионов чел., расположенные на большой высоте. Самый яркий пример – это город Ла Пас в Боливии, расположенный почти на 4000 м. Годовые дозы космического излучения здесь в 4 раза превышают нормальный уровень.

При взаимодействии космического излучения с ядрами атомов в атмосфере образуются космогенные радионуклиды –  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{14}\text{C}$  и др. Их 14 штук. Наиболее важными для человека и других живых организмов среди них являются  $^{14}\text{C}$  и  $^3\text{H}$ , которые включаются в биогеохимические циклы в процессе фотосинтеза, поступают по пищевым цепям в компоненты экосистем и к человеку и вносят вклад в дозу облучения. Космогенные радионуклиды рождаются непрерывно, и их количество впечатляет. Например, каждую секунду над каждым квадратным метром земной поверхности в среднем образуется 16-19 тыс. атомов углерода-14.

К первичным радионуклидам относятся долгоживущие радионуклиды, существовавшие на Земле со времени ее возникновения. К настоящему времени сохранились лишь те радионуклиды, период полураспада которых сопоставим с возрастом Земли. Среди них выделяют три радиоактивных семейства, родоначальниками которых являются уран-238, уран-235 и торий-232. С момента получения искусственных радионуклидов было выделено еще одно семейство. Его родоначальником является изотоп нептуний-237. При распаде материнских радионуклидов образуется более 30-ти дочерних радионуклидов (Приложение Д).

Наибольшее значение среди продуктов распада с точки зрения радиоэкологии и радиационной безопасности имеют радон и его изотоп торон.

Радон и торон – это радиоактивные газы, они поступают из земной коры на поверхность Земли, в Мировой океан и атмосферу. Оба радионуклида являются альфа-излучателями с довольно коротким временем жизни, и поэтому они вносят очень значительный, определяющий вклад – от 50 до 75% – в дозу облучения человека от естественных источников радиоактивности. Их концентрации могут значительно возрасти в некоторых ситуациях: при поверхностном расположении урановых или ториевых месторождений, в плохо проветриваемых помещениях, при использовании некоторых строительных материалов и артезианской воды.

Другая группа радионуклидов включает долгоживущие радиоизотопы, не образующие семейств. К ним относятся 11 радионуклидов. Наибольшее значение среди них играет  $^{40}\text{K}$  – как биогенный элемент, входящий в состав живых организмов. Калий имеет 3 изотопа – 2 стабильных и 1 радиоактивный. Из изотопного соотношения можно определить, какую радиоактивность создает нестабильный изотоп. А именно, каждый грамм калия имеет радиоактивность в 31 Бк, обусловленную K-40. Калий, и соответственно, K-40 содержится в почве и воде, в продуктах питания. Некоторые растительные продукты, например, картофель, бобовые, орехи, содержат повышенное количество калия. Калий-40 в значительной части отвечает за радиоактивность тела человека. Примерный расчет показывает, что в теле человека массой 70 кг каждую секунду происходит около 5000 распадов. Бета-излучение K-40 облучает само тело, лишь на 1-2 см выходя за его пределы. Так что каждый человек немного «сияет».

Распределение естественных радионуклидов в биосфере неравномерно. В разных местах земного шара есть районы с повышенным естественным радиационным фоном, обусловленным высоким содержанием в почве или воде естественных радионуклидов земного происхождения. Одно из самых известных – это местечко Гуарапари в Бразилии. Это курорт с прекрасным пляжем, но в состав пляжного песка входят радиоактивные минералы, преимущественно торий. Радиационный фон здесь до 100 раз выше обычного, эффективные дозы могут достигать 170 мЗв/год. Другой яркий пример – местечко Рамсар в Иране. Здесь имеются воды, обогащенные

радием, благодаря чему годовые эффективные дозы могут достигать 400 мЗв. Интересно упомянуть, что во многих случаях известные бальнеологические курорты располагаются на территориях, где природные источники воды содержат повышенное количество естественных радионуклидов.

В результате деятельности человека происходит перераспределение природной радиоактивности и возникают ситуации, которые принято называть техногенно-повышенным естественным радиационным фоном. Таких видов деятельности достаточно много. Естественные радионуклиды поступают на поверхность земли при добыче полезных ископаемых и откладываются в хвостохранилищах, с шахтовыми водами выносятся в поверхностные водоемы, загрязняют технологическое оборудование. Это происходит не только при добыче урановых руд, но и всех традиционных видов топлива (уголь, нефть, газ). Например, пруда-отстойник, созданный при добыче каменного угля. Уровень загрязнения донных отложений часто достигает такой величины, что их классифицируются как радиоактивные отходы; такие территории требуют деконтаминации.

Повышение естественного радиационного фона имеет место при использовании минеральных удобрений, строительных материалов, сжигании углеводородов, и т.д. При всех этих видах деятельности возрастают уровни естественной радиоактивности; эти ситуации не имеют никакого отношения к искусственным источникам радиоактивности. По современным оценкам, для большинства жителей планеты Земля эффективная доза облучения от природных источников радиоактивности лежит в диапазоне от 1 до 10 мЗв/год, составляя за период жизни в 70 лет до 7 Зв.

Средняя доза облучения жителя планеты Земля составляет 2,4 мЗв/год. Однако, есть ситуации, где уровни природной радиоактивности в десятки и сотни раз выше.

Таким образом, к основным компонентам естественного радиационного фона относятся космические лучи, космогенные радионуклиды и первичные радионуклиды земного происхождения. В тоже время существуют примеры ситуаций повышенного естественного радиационного фона, возникающие как по естественным причинам, так и в результате деятельности человека.

Необходимо помнить, что средняя доза облучения жителя планеты Земля составляет 2,4 мЗв/год, а также понимать, что радиоактивность - это природное явление, источники естественного радиационного фона являются

постоянно действующим фактором, при котором миллионы лет существовало, развивалось и развивается все живое на планете.

### 3.2 Искусственные источники излучения

С момента получения искусственных радионуклидов, использующихся в военных и мирных целях, на Земле появилось много искусственных источников излучения. Особенно большое воздействие на окружающую среду внесли те радионуклиды, которые стали результатом использования и испытания ядерного оружия на Земле. За счет использования атомной энергии в ходе второй мировой войны и в послевоенное время естественный радиоактивный фон повысился за счет попадания в биосферу искусственных источников радиации. В качестве ядерного «горючего» используются изотопы  $U^{238}$ ,  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$ .

Атомные бомбы, сброшенные на Хиросиму и Нагасаки, состояли из двух докритических масс урана-235, которые при соединении превысили критическую массу.

Критической массой называют такое количество оружейного изотопа, при котором нейтроны, выделяющиеся при самопроизвольном делении ядер, не вылетают наружу, а попадают в соседние ядра и вызывают их искусственное деление. К примеру, критическая масса металлического урана-235 составляет 52 кг. Это шар диаметром 18 см. Критическая же масса металлического плутония-239 - 11 кг (по некоторым публикациям - 9 и даже 6 кг). Это шар диаметром приблизительно 9-10 см. Но сейчас они затерялись бы в огромных ядерных арсеналах сверхдержав как ничтожные мелочи. Если тротильный эквивалент бомбы, сброшенной на Хиросиму, составлял 13 килотонн, то взрывная мощь крупнейших ядерных ракет, появившихся в начале 90-х годов прошлого столетия, например отечественной стратегической ракеты СС-18 достигает 20 мегатонн (млн. т), т.е. примерно в 1540 раз больше.

Из всей выделившейся энергии при ядерном взрыве 50% расходуется на образование ударной волны, 35% - на световое излучение, 10% - на проникающую радиацию и 5% - на образование радиоактивных продуктов взрыва. Последние представляют собой сложную смесь более чем 200

радиоактивных изотопов 36 элементов с массовым числом от 85 до 148 (от цинка до гадолиния) и в основном являются источниками  $\beta$ -излучения. Кроме дочерних элементов происходит также выброс в атмосферу не прореагировавших атомов урана или плутония, отличающихся  $\alpha$ -активностью. В течение первых суток после взрыва уровень радиоактивности на местности снижается примерно в два раза.

При взрыве все нуклиды за счет огромной температуры переходят в газообразное состояние в атмосферу, где, остывая, образуют мелкодисперсные аэрозоли, способные легко перемещаться с воздушными потоками и выпадать на поверхность земли и взаимодействуют с ядрами ряда элементов почвы и воды. В результате этого происходит не только радиоактивное загрязнение местности, но также возникает наведенная радиоактивность.

В период моратория на ядерные взрывы разный период полувыведения радионуклидов из атмосферы обусловлен различием их фракционирования при подъеме огненного шара и забросом в стратосферу на разную высоту. Цепная ядерная реакция происходит в считанные секунды и приводит к выделению огромного количества энергии: 1 кг урана-235 эквивалентен 20 тыс. т тротила! Таким образом, сейчас у человечества имеется два делящихся, оружейных изотопа: уран-235 и плутоний-239.

Другими источниками искусственных радионуклидов являются атомные электростанции.

В ряде технологически развитых стран они являются альтернативой традиционным тепловым электростанциям, сжигающим мазут, природный газ или угольную пыль. Атомные электростанции утилизируют энергию распада изотопов тяжёлых элементов (урана-235, урана-233 и плутония-239). Все атомные электростанции мира производят примерно 399 ГВт электроэнергии.

Первая атомная электростанция была построена в 1960 году. К 1970 г. их было 116, к 1980 г. - 135, а к 1990 г. - уже 328. Максимальное число атомных электростанций было введено в строй в середине 70-х годов.

По данным МАГАТЭ в 31 странах мира эксплуатируется 192 атомных электростанции с 451 энергоблоками общей электрической мощностью около 398 677 МВт. 54 энергоблока находятся в стадии строительства. 174

энергоблока закрыты. В России сегодня работает 11 АЭС, на которых эксплуатируется 38 реакторов.

В 2018 году российские АЭС установили рекорд по выработке электроэнергии. Было выработано 204,275 млрд кВт·ч. Доля ядерной электрогенерации составила 19 % от общей по стране. Для сравнения, абсолютный рекорд по выработке, достигнутый в СССР в 1989 году, составил 212,58 млрд кВт·ч (с учетом АЭС Украины, Литвы и Армении).

В результате радиационных аварий на атомных реакторах АЭС происходит выброс в окружающую среду радионуклидов. Радиационные выбросы классифицируются по шкале МАГАТЭ INES по одному из 7 уровней. Большие уровни соответствуют большей опасности. Так, риск облучения населения возникает на уровнях INES 4 и выше, и, начиная с этого уровня — INES 4 — ядерный или радиологический инцидент квалифицируется как авария.

### **3.3 Радионуклиды в наземных экосистемах: поступление в экосистемы и поведение в почве**

При анализе особенностей поведения радионуклидов в экосистемах на примере наземных экосистем традиционно рассматривают несколько последовательных этапов перемещения радионуклидов в экосистеме: почва-растение-животное.

Изучая поступление радионуклидов в экосистему, возникает вопрос, откуда появляются радиоактивные элементы в биосфере. На известно, что в природе существуют естественные радионуклиды. Примордиальные возникли при формировании Вселенной, космогенные продолжают рождаться в атмосфере Земли каждую секунду. Также, деятельность человека приводит к поступлению в биосферу так называемых искусственных радионуклидов, большинство из которых всего 100 лет назад практически отсутствовали на Земле.

Самым значительным источником искусственных радионуклидов являются глобальные испытания ядерного оружия (Приложение Г). Крупные радиационные аварии можно уверенно поставить на второе место. Другие виды деятельности, которые рассматривают как источники искусственных

радионуклидов: обращение с радиоактивными отходами и отработавшее ядерное топливо, ядерная медицина, использование радионуклидов в промышленности и сельском хозяйстве, научные исследования.

Вклад этих видов деятельности в радиоактивное загрязнение экосистем является небольшим и локальным. Радиационный фон вокруг атомной станции определяется природным фоном; выбросы и сбросы АЭС жестко регламентируются, их практически невозможно зарегистрировать. Наибольшее число испытаний ядерного оружия проводилось в 1954-1962 гг. При ядерных взрывах часть радиоактивных веществ, попавших в атмосферу, выпадает вблизи района испытаний. Однако значительная доля радиоактивных веществ задерживается в воздухе и под действием ветра перемещается на большие расстояния. Часть радиоактивного материала выбрасывается в стратосферу (на высоту 10–15 км), где он остается многие месяцы, медленно опускаясь и рассеиваясь по всей поверхности земного шара. Радиоактивные осадки содержат несколько сотен различных радионуклидов, однако большинство из них быстро распадаются. На сегодняшний день основными дозообразующими радионуклидами глобальных выпадений являются  $^{14}\text{C}$  и тритий как биогенные элементы, а также  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  из-за их длительного периода жизни и высокой подвижности в биосфере.

Серьезность радиационных аварий принято оценивать согласно Международной шкале ядерных событий МАГАТЭ; в соответствии с ней две аварии отнесены к максимальному, 7-му уровню (Чернобыльская и Фукусимская) и одна – к 6-му (Кыштымская). Суммарные выбросы радиоактивности в этих случаях составляли миллионы кюри, а загрязненные площади – более 300 тысяч км<sup>2</sup>. Также, в истории случались и другие, менее крупные аварии и инциденты на объектах использования атомной энергии. Если сопоставить природные и искусственные источники радиоактивности, то с уверенностью можно сказать, что подавляющую часть дозы облучения человека сегодня создает природный радиационный фон. Основной вклад (более 80%) вносит радон. Вторым по вкладу источником облучения является медицина, использующая источники излучения и радиоактивные вещества для диагностики и терапии. Вклад медицины составляет 20% в дозы облучения человека. Однако отметим, что загрязнение окружающей среды при использовании ядерной медицины практически не происходит. Не более

1% годовой дозы вносят глобальные ядерные испытания, радиационные аварии и другие компоненты искусственного радиационного фона, включая ядерную энергетику. Искусственные радионуклиды, которые могут поступать в окружающую среду, по составу и происхождению можно условно разделить на 3 группы: радиоактивные продукты деления тяжелых ядер U и Pu (изотопы Sr, Cs, Se и другие), радионуклиды наведенной активности (обычно изотопы металлов), трансурановые элементы, имеющие более тяжелые ядра, чем уран. Это изотопы Pu, Am, Cm и др. При ядерном взрыве может образовываться до 200 радионуклидов, однако период полураспада 70% изотопов составляет менее 1 дня, поэтому они не представляют опасности для почвенно-растительного покрова. С течением времени в смеси продуктов деления начинают преобладать долгоживущие радионуклиды, в частности,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Радионуклиды наведенной активности образуются при взаимодействии нейтронов с ядрами стабильных элементов. В целом они не представляют большой опасности, т.к. возможность их появления в окружающей среде в значительных количествах невысока, а период полураспада в большинстве случаев меньше года.

Трансурановые элементы также имеют большие периоды полураспада и обычно являются альфа-излучателями. Однако возможность их попадания в почвенный покров незначительна, и они практически не поступают из почвы в растения. Радиоактивные вещества могут присутствовать в выбросах в разных физико-химических формах: газообразной, аэрозольной, и в форме топливных твердых частиц.

В газообразной форме поступают инертные радиоактивные газы, йод и его соединения, летучие окислы рутения. Аэрозоли образуются при испарении твердых топливных материалов непосредственно при тепловом взрыве; в атмосфере происходит конденсация испарившихся радионуклидов на различных носителях: примесях, капельках воды, частицах пыли. Так,  $^{137}\text{Cs}$  выпадает в основном в виде аэрозольных частиц конденсационного типа. Топливные твердые частицы – это основная часть выпадений в ближней зоне; они обеднены летучими и легкоплавкими нуклидами, но содержат значительное количество тугоплавких и химически устойчивых радионуклидов (Zr, Nb, Se, Pu и др. редкоземельные и трансурановые элементы). При поступлении искусственных радионуклидов в окружающую среду первичным резервуаром чаще всего служат нижние слои атмосферы.

В результате процессов очищения приземного воздуха от примесей радионуклиды быстро оседают на почвенный покров и водную поверхность. Осаждение радиоактивных примесей происходит тремя основными способами. Гравитационное осаждение особенно эффективно для крупнодисперсных частиц с размерами  $> 5$  мкм. Мокрое осаждение – это вымывание радионуклидов из атмосферы осадками (дождем, снегом). Сухое осаждение происходит путем захвата аэрозольных частиц и газов подстилающей поверхностью в ходе турбулентного перемешивания атмосферы. Эффективность сухого осаждения сильно зависит от типа подстилающей поверхности и является наиболее высокой для лесных, особенно хвойных, экосистем. Для описания уровней радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды используют ряд количественных показателей. Основными являются удельная активность и поверхностная плотность загрязнения. Удельная активность или концентрация радионуклида в любой среде (воздухе, почве, жидкостях, газах, биологической ткани) определяется как активность радионуклида в единице массы или объема конкретной природной среды. Единицами измерения удельной активности в системе СИ являются Бк/кг и Бк/м<sup>3</sup>.

Плотность радиоактивного загрязнения характеризует поверхностное загрязнение и определяется как активность, отнесенная к единице поверхности. Она измеряется в Бк/м<sup>2</sup> или Ки/км<sup>2</sup> и обычно используется в радиоэкологии для характеристики уровня загрязнения больших территорий. Перевод удельной активности в поверхностную плотность можно сделать по простой формуле для пахотного слоя, используя информацию о глубине слоя и плотности почвы. В общем случае, потребуется информация о вертикальном распределении удельной активности.

Формирование радиоэкологической обстановки зависит от ряда факторов: общей активности веществ, поступивших в природную среду; радионуклидного состава и физико-химической формы выпадений, динамики поступления радионуклидов в атмосферу и метеорологических условий, сезона года, пространственного распределения радионуклидов, биогеохимических характеристик территории (ландшафт, тип почвы, особенности растительного покрова), особенностей ведения агропромышленного производства.

Перейдем к рассмотрению поведения радионуклидов в почве. Почва – один из основных компонентов в природе, где происходит локализация искусственных радионуклидов, и откуда они начинают долговременное передвижение по пищевым цепям. Почва обладает исключительно большой сорбционной емкостью, что обеспечивает создание мощного депо искусственных радионуклидов. Однако эта особенность почвы имеет двоякое значение. Закрепление радионуклидов в верхних почвенных горизонтах обеспечивает существование длительно действующего источника радионуклидов, с одной стороны. С другой стороны, сорбция радионуклидов твердой фазой почвы ограничивает их поступление в растения и вовлечение в пищевые цепи. Благодаря сорбции имеют место две важнейших особенности, характеризующие поведение радионуклида в почвах и наземных экосистемах. Это относительно низкое поступление радионуклида из почвы в растение. Даже из песчаных почв с минимальной сорбционной способностью, за один вегетационный период в растения переходит всего несколько процентов радионуклида.

Также незначительная вертикальная миграция радионуклида в почвах и крайне низкая вероятность загрязнений грунтовых вод. В естественных почвах ненарушенного сложения благодаря сорбции около 90% поступивших на поверхность радионуклидов удерживаются слоем почвы толщиной 5-10 см в течение десятков лет.

В радиэкологии применяют два похожих термина – поведение радионуклидов и миграция радионуклидов. Миграция радионуклидов – это совокупность процессов, приводящих к их перемещению и количественному перераспределению по глубине и в горизонтальном направлении. Поведение радионуклидов (в экосистеме) – это участие в процессах физико-химической трансформации и массопереноса вещества, которые включают процессы сорбции и десорбции, растворения, осаждения, комплексобразования, поступления в биоту и включения в биогеохимические циклы, вынос из экосистем в результате эрозии и пожаров и т.д.

Таким образом, поведение радионуклидов является более широким термином, чем миграция. Изменение доступности радионуклидов, поступивших в экосистему, может происходить во времени и в пространстве. В связи с этим выделяют первичные процессы взаимодействия радионуклидов с почвой и другими компонентами экосистем и вторичные

процессы их трансформации и пространственного перераспределения (вертикального и горизонтального) в экосистемах, ландшафтах и биосфере в целом.

Первичные взаимодействия радионуклидов с почвой определяются их распределением между двумя основными фазами – твердой и жидкой, соотношение между которыми зависит от трех групп факторов: свойств радионуклида, свойств почвы и модифицирующих внешних условий. Среди физико-химических свойств радионуклидов очевидное значение имеет их исходная физико-химическая форма (газообразная, аэрозоли, гидрозоли, твердые частицы), которая в значительной степени определяет подвижность радионуклида в почве.

Изменение подвижности и доступности радионуклида со временем может уменьшиться в результате его диффузии в кристаллическую решетку отдельных минералов (так называемое «старение радионуклида», типично для  $^{137}\text{Cs}$ ). И наоборот, разрушение крупнодисперсных радиоактивных частиц под действием воды, кислорода, микроорганизмов и других факторов ведет к высвобождению радионуклидов и увеличению их подвижности. Химические свойства элемента определяют способность радионуклида к адсорбции или образованию комплексных соединений.

Поведение радионуклидов мало отличается от поведения стабильных изотопов или химических аналогов. Так, изотопы стронция имеют сходные свойства с щелочно-земельным кальцием, а изотопы цезия похожи на другие щелочные элементы, в первую очередь, на калий.

Состав и свойства почвы также влияют на подвижность радионуклида. При переходе от почв легкого гранулометрического состава (пески) к почвам тяжелого состава (глины), прочность сорбционного закрепления радионуклида увеличивается, а его концентрация в почвенном растворе снижается. Некоторые почвообразующие минералы, особенно монтмориллониты и слюды, имеют очень высокую сорбционную способность. Например,  $^{137}\text{Cs}$  прочно фиксируется в кристаллической структуре таких материалов. Такие агрохимические свойства почвы как кислотность, содержание гумуса, поглотительная емкость изменяют распределение радионуклида между жидкой и твердой фазами.

Наконец, такие условия внешней среды как ветровой подъем, температура и влажность также модифицируют подвижность радионуклида в

почве. Вторичные процессы перераспределения радионуклидов связаны с их включением в биогеохимические циклы, водной и ветровой эрозией, сельскохозяйственной обработкой почвы, которые могут приводить к вторичному рассеянию и перераспределению радионуклидных загрязнений между различными компонентами экосистем. Вертикальная миграция радионуклидов происходит под действием таких движущих сил как: конвективный перенос (фильтрация атмосферных осадков вглубь почвы, капиллярный перенос), диффузия свободных и адсорбированных ионов, перенос по корневым системам растений, роющая деятельность почвенных животных, хозяйственная деятельность человека. Горизонтальная миграция осуществляется под действием ветрового и водного переноса, переноса с биологическим веществом и деятельности человека.

### **3.4 Радионуклиды в наземных экосистемах: поступление в растения, метаболизм в организме животных**

Радионуклиды – это изотопы химических элементов, и механизм их поступления в растение сходен с поступлением питательных веществ – макро- и микроэлементов. Часть из них растение потребляет как необходимые вещества, для ненужных соединений возможности поступления внутрь растения биологически ограничены. Как и питательные вещества, радионуклиды могут поступать в растение двумя путями: аэралью – через непосредственное загрязнение наземных частей растений находящимися в воздухе радиоактивными частицами и из загрязненной почвы через корневую систему растений.

При аэральном поступлении, радиоактивные вещества, выпадающие из атмосферы на земную поверхность, осаждаются на поверхность растений в виде твердых частиц или жидких аэрозолей и поглощаются вегетативной массой. Проникнув в растение через поверхность листьев, радионуклиды могут перемещаться по всему растительному организму.

Аэральное поступление может играть большую роль в определенных условиях. Прежде всего, это начальный период выпадений, когда значительная часть радиоактивных веществ находится в воздухе. Аэральное загрязнение представляет опасность для культур, имеющих хозяйственно-

ценную надземную часть (зелень, капуста, салаты). При попадании нуклидов в растение на ранних сроках его развития происходит большее их накопление.

Вторичное загрязнение растений может происходить в результате подъема радиоактивных частиц ветром или дождем с почвенного покрова, а также при забрызгивании нижних частей растения при дожде. Антропогенная деятельность, например, подъем пыли транспортом или поливное земледелие, также может увеличивать аэральное поступление. Можно выделить три группы факторов, влияющих на внекорневое поступление. Свойства радионуклида, включая исходную форму поступления – газы, аэрозоли или твердые частицы, – и размер аэрозольных частиц. Химические свойства, такие как валентность и растворимость, транспортные свойства элемента, а также потребность растений в данном химическом элементе или его аналогах.

Задерживание и всасывание радиоактивных веществ листвой зависит от особенностей растения, в первую очередь от площади листовой поверхности, объема надземной фитомассы, морфологического строения. Накопление радиоактивных продуктов деления в органах растений в значительной мере определяется фазой развития растений и интенсивностью метаболизма. Причем, в период активного роста растений может наблюдаться эффект биологического разбавления, когда удельная активность в органах растения падает за счет быстрого увеличения биомассы.

Наконец, интенсивность аэральное поступления может быть модифицирована действием погодных и антропогенных факторов. Корневое поступление становится основным путем радиоактивного загрязнения растений в отдаленный период после выпадения радиоактивных осадков. Однако если выпадение радиоактивных аэрозолей на поверхность растений приводит к их загрязнению всеми возможными радионуклидами, то при корневом пути поступления почва выступает в роли мощного сорбционного фактора, а корневая система растений является селективным барьером, исключая поступление в надземную фитомассу биологически инертных элементов.

Очевидно, что величина поступления радионуклидов в растения из почвы зависит от свойств взаимодействующих компонентов: самого радионуклида, почвы и растения, а также некоторых модифицирующих

факторов. Относительно свойств радионуклида и почвы можно сказать, что здесь играют роль те же самые факторы, которые влияют на подвижность радионуклида в почве и их содержание в жидкой фазе: наиболее важны исходная форма радионуклида при поступлении в почву и его химические свойства, а также гранулометрический и минеральный состав почвы и ее агрохимические свойства, ответственные за сорбционную емкость почвы.

Со стороны растения имеет значение вид растения и его строение, в частности, архитектура корневой системы, особенности минерального питания, фаза онтогенеза и другие биологические особенности. Межвидовые различия в аккумуляции радионуклидов при корневом пути перехода могут достигать 30 раз, а различия между сортами – до 3-х раз.

Наконец, техника ведения сельского хозяйства, включая вспашку почвы, проведение таких мелиоративных мероприятий как орошение или осушение, внесение сорбентов, органических и минеральных удобрений, имеет огромное значение для перехода радионуклидов в растение. Путем подбора культур растений можно изменять переход радионуклида в десятки раз.

Для оценки поступления радионуклидов из почвы в растения широко применяют такие количественные показатели как коэффициент накопления и коэффициент перехода.

Коэффициент накопления – это отношение удельной активности радионуклида в растении к удельной активности почвы. Коэффициент перехода – это отношение удельной активности радионуклида в растении к поверхностной плотности загрязнения почвы.

Метаболизм веществ в организме животных складывается из нескольких последовательных и взаимосвязанных этапов: поступление в организм, всасывание в желудочно-кишечном тракте или через другие органы, распределение внутри организма по органам и тканям и накопление в них, выведение из организма.

Поступление радионуклидов в организм животных происходит тремя основными путями: через легкие при вдыхании загрязненного воздуха, с пищей и водой, через кожу и слизистые оболочки и раны. Ингаляция является преимущественным путем поступления радионуклидов только в период выпадения радиоактивных осадков. Основным путем инкорпорирования радионуклидов в организм животных следует считать пероральный – с кормом и водой. Поэтому будем рассматривать

последующие этапы метаболизма, считая, что поступление произошло в пищеварительный тракт.

Поведение радионуклидов в организме животных не отличается от обычных стабильных химических элементов, входящих в состав кормов. Попадая в ЖКТ, комовые продукты подвергаются механической, химической и биологической обработке, превращаясь в соединения, которые могут быть усвоены организмом.

Одним из наиболее важных этапов метаболизма является всасывание радионуклидов в желудочно-кишечный тракт. Интенсивность всасывания сильно зависит от химических свойств радионуклида, которые связаны с его положением в таблице Менделеева. Хорошо растворимые вещества всасываются практически полностью, двухвалентные ионы – несколько хуже, около 10%. Многие химические элементы и соответствующие радионуклиды, по-видимому, не нужные организму, практически совсем не всасываются из желудочно-кишечного тракта.

Известно, что всасывание достигает высоких значений для трития, йода-131 и цезия-137: все это одновалентные ионы. Для стронция-90 (щелочно-земельного элемента) значения значительно ниже, но все же составляют заметные величины. Для других радионуклидов очевидны барьеры – всасывание или очень низкое, или совсем не происходит.

Кроме того всасывание радионуклида зависит и от вида животного. Причем могут встречаться видовые особенности метаболизма. Например, поступление стронция-90 у цыпленка гораздо выше, чем у млекопитающих. Причина – потребность в кальции, аналоге стронция, для строительства скорлупы яйца.

Также известно, что у молодых животных всасывание гораздо выше, чем у взрослых, т.к. их метаболизм выше, и они нуждаются в большем количестве веществ для роста. Так, стронций-90 как аналог кальция, необходимого для роста скелета, очень активно потребляется у молодых животных.

Итак, на всасывание из ЖКТ оказывают влияние такие свойства радионуклида, как его растворимость, валентность и способность образовывать сложные соединения, а также вид, возраст и скорость метаболизма у животных. Всосавшиеся в кровь радиоактивные вещества разносятся по органам и тканям животного, где частично задерживаются,

избирательно концентрируясь в отдельных органах. Выделяют три основных типа распределения радионуклидов в организме животных: диффузный, скелетный (остеотропный) и ретикулоэндотелиальный.

Диффузный тип распределения присущ изотопам щелочных элементов: натрия, цезия, водорода. Скелетный тип характерен в первую очередь для радиоактивных элементов щелочноземельной группы, ярким представителем которой являются изотопы кальция и его химического аналога стронция. Изотопы бария, радия, плутония, урана также накапливаются в минеральной части скелета.

Ретикулоэндотелиальное распределение свойственно для радиоактивных изотопов редкоземельных металлов: церия, празеодима, прометия, а также цинка, тория и трансурановых элементов.

Некоторые органы могут накапливать отдельные, специфичные для них радионуклиды. Так, щитовидная железа поглощает йод, как сегодня всем хорошо известно. Орган, в котором происходит избирательная концентрация радионуклида, вследствие чего он подвергается наибольшему облучению и повреждению, называют критическим.

Например, для йода критическим органом является щитовидная железа, для стронция, кальция и радия — кости. Радионуклиды участвуют в обмене веществ аналогично их стабильным изотопам: они выводятся из организма через те же самые выделительные системы, что и их стабильные носители: через желудочно-кишечный тракт и почки, через легкие и кожу, с молоком и молоком (у беременных и лактирующих животных).

Основной фактор, определяющий скорость выведения радионуклидов из организма, это физико-химические свойства самого радионуклида и его соединений. Накопление в критических органах может снижать выведение радионуклида. Так, остеотропные радионуклиды почти не выводятся из организма, если они вошли в состав костной ткани. Очевидно, что выведение у разных животных происходит по-разному и зависит от биологических особенностей животных и их метаболизма. Также, состав рациона животных можно значительно модифицировать скорость выведения, если в пищу, например, добавить какие-то сорбенты или комплексообразователи.

Остается добавить, что снижение содержания радионуклидов в организме животных происходит благодаря двум экспоненциальным процессам – биологическому выведению веществ из организма и

радиоактивному распаду. Поэтому эффективный период полувыведения следует оценивать по данной формуле с учетом обоих процессов.

### **Вопросы для самоконтроля и самостоятельного изучения**

1. *Что такое естественная и искусственная радиоактивность?*
2. *Назовите и охарактеризуйте естественные источники радиации космического и земного происхождения.*
3. *Как отличается доза, создаваемая космическим излучением в разных местах нашей планеты?*
4. *Распределение естественных радионуклидов в биосфере.*
5. *Основные радиоактивные газы, поступающие из земной коры на поверхность Земли, в Мировой океан и атмосферу. Их характеристика.*
6. *Основные источники искусственных радионуклидов.*
7. *Какие искусственные источники излучения внесли наибольший вклад в радиационный фон нашей планеты?*
8. *Понятие критической массы радиоактивных элементов.*
9. *Международная шкала оценки ядерных событий МАГАТЭ.*
10. *Этапы перемещения радионуклидов в экосистеме.*
11. *В каких физико-химических формах радиоактивные вещества могут присутствовать в выбросах?*
12. *Способы осаждения радиоактивных примесей на почвенный покров и водную поверхность.*
13. *Поведение и миграция радионуклидов в почве.*
14. *Какие свойства почвы влияют на подвижность радионуклидов?*
15. *Вертикальная и горизонтальная миграция радионуклидов в почве.*
16. *Пути поступления радионуклидов в растения и организм животных.*
17. *Какие особенности строения растений влияют на поступление в них радионуклидов?*
18. *Какие количественные показатели (коэффициенты) применяют для оценки поступления радионуклидов из почвы в растения?*
19. *Поведение радионуклидов в организме животных.*
20. *Типы распределения радионуклидов в организме животных.*
21. *Факторы, влияющие на скорость выведения радионуклидов из организма животных.*

## ГЛАВА 4. РАДИОБИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ

*Глава содержит основные положения дозиметрии ионизирующих излучений, вопросы поступления радионуклидов в растения и организм животных и биологического воздействия ионизирующих излучений на живые структуры.*

### 4.1 Формирование дозовых нагрузок на растения и животных

Основной задачей радиобиологии является выяснение связи между уровнем воздействия излучения и биологическими эффектами, возникающими в облученном живом организме. Поэтому наиболее важными областями знаний в радиобиологии является изучение закономерностей формирования дозовых нагрузок на растения и животных в естественных условиях обитания, и биологические последствия облучения растений и животных.

Содержащиеся в объектах окружающей среды радиоактивные вещества создают вокруг себя радиационное поле, которое воздействует на живые организмы и формирует их дозы облучения. Для начала вспомним базовые дозиметрические величины, используемые при оценке радиационного воздействия.

Первой количественной мерой ионизирующего излучения была определена экспозиционная доза. Она отражает уровень ионизаций при взаимодействии фотонного излучения с молекулами воздуха (т.е. гамма-излучения или рентгеновского излучения). Экспозиционная доза равна отношению средней величины суммарного заряда всех ионов одного знака, созданных в элементарном объеме воздуха, к массе этого объема.

В системе СИ единицей экспозиционной дозы является кулон на килограмм. Однако во всем мире активно используется внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (Р). Экспозиционная доза 1 Кл/кг равна 3876 рентгенам. Напомним, что нормальные уровни естественного радиационного фона могут находиться в диапазоне от 5 до 30 мкР/час, а доза 600 Р является летальной для человека при остром облучении.

При оценке биологического действия ионизирующего излучения количество энергии излучения, переданное объекту облучения имеет более важное значение, чем величина электрического заряда.

Энергия, поглощенная в единице массы биологической ткани в форме ионизаций и возбуждений атомов и молекул, получила название поглощенной дозы.

В системе СИ единицей поглощенной дозы является грей (Гр), равный поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия излучения 1 Дж. Живые организмы подвергаются одновременному воздействию различных типов ионизирующей радиации как естественных, так и искусственных радиоактивных изотопов, например,  $\gamma$ -излучение Cs-137 и Ra-226,  $\beta$ -излучение K-40 и Sr-90,  $\alpha$ -излучение Rn-222, Pu-239, Am-241. При одинаковых поглощённых дозах различные виды радиации производят неодинаковое биологическое воздействие на организм. Радиобиологический эффект тем выше, чем плотнее ионизация, создаваемая излучением. Чтобы учесть этот эффект, введено понятие эквивалентной дозы, которая рассчитывается путём умножения средней поглощённой дозы в органе на коэффициент качества излучения, учитывающий относительную биологическую эффективность различных видов радиации. Например, при одинаковой поглощенной дозе биологический эффект от альфа-частиц в 20 раз выше, чем от рентгеновского или гамма-излучения. Эквивалентная доза предназначена для оценки радиационного риска стохастических эффектов, то есть вероятности возникновения рака и генетических заболеваний в результате радиационного воздействия.

В системе СИ единицей эквивалентной дозы является зиверт (Зв). Величина 1 Зв любого вида излучения, поглощённого в 1 кг биологической ткани, создает такой же биологический эффект, как и поглощённая доза 1 Гр фотонного излучения.

Следующая количественная мера излучения – эффективная доза, была введена, чтобы учесть разную радиочувствительность органов человека. Эффективная доза – величина, используемая как мера риска возникновения стохастических эффектов при локальном или неоднородном облучении тела человека. Она представляет собой сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты. Взвешивающие коэффициенты устанавливаются эмпирически и рассчитывают

таким образом, чтобы их сумма для всего организма составляла единицу. Единицы измерения эффективной дозы совпадают с единицами измерения эквивалентной дозы, она также измеряется в Зв.

Важно отметить, что понятия эквивалентной и эффективной дозы не применимы напрямую для расчета доз облучения растений и животных, т.к. величины коэффициентов качества излучений и взвешивающих коэффициентов установлены для человека. В целом, экологическая дозиметрия, т.е. оценка доз облучения растений и животных от источников ИИ в окружающей среде, недостаточно разработана. Однако можно сформулировать основные принципы, которые нужно учитывать при количественной оценке радиационного воздействия на растения и животных.

Во-первых, при определении величины дозы ионизирующего излучения в живом организме необходимо учитывать как внешнее облучение, когда источник радиоактивности находится вне организма, так и внутреннее облучение, когда радиоактивное вещество попадает в организм.

При внешнем облучении значимыми факторами, определяющими величину дозы, являются характеристики источника излучения и характеристики живого объекта. К важным характеристикам источника излучения следует отнести его геометрию, состав излучения и временной режим облучения. В окружающей среде источники излучения могут быть гомогенно или негомогенно распределены в разных средах: в воздухе, почве, воде. При оценке доз облучения для описания геометрии источников часто используют упрощенные модели, например, точечный источник, бесконечный или полубесконечный источник, тонкая или тонкая бесконечная пластина, и т.п. В зависимости от длительности облучения различают острое, пролонгированное и хроническое облучение. Под острым облучением понимают кратковременное облучение в течение секунд, минут, максимум – нескольких часов, когда организм за счет высокой мощности дозы может получить большую дозу. Пролонгированное облучение – продолжительное облучение в течение многих часов, суток, недель при низкой мощности дозы. Хроническое облучение можно рассматривать как вариант пролонгированного, оно происходит длительное время. Формирование дозы в этом случае осуществляется на протяжении всей вегетации растения, всей жизни животного и человека или, по меньшей мере, периода, составляющего значительную часть онтогенеза.

Различают также однократное и фракционированное (многократное) облучение. Во втором случае доза делится на две и более фракций, чередующихся с периодами, в течение которых организм не облучается.

Биологическое действие радиации при фракционированном облучении существенно зависит, с одной стороны, от количества фракций дозы, с другой – от продолжительности интервала между ними.

В периоды между фракциями происходит восстановление различных структур и функций клеток и организма. Пролонгированное облучение может происходить с постоянной или изменяющейся мощностью дозы. Так, при перемещении животного в сторону более высоких уровней загрязнения территории мощность дозы будет возрастать. С течением времени после выброса радиоактивных веществ мощность дозы уменьшается из-за радиоактивного распада радионуклидов.

Геометрия биологического объекта и его расположение относительно источника излучения также важны для оценки дозы облучения. Как правило, в дозиметрических моделях также используют простые геометрические фигуры для описания биологического объекта – шар, цилиндр, эллипсоид. На слайде показан пример взаимного расположения объекта и распределенного источника излучения в двух типах экосистем – водной и наземной. Организм может находиться внутри или вне источника, на его границе или перемещаться из одного места в другое. Внешний вид, размеры, поведение и радиочувствительность у животных и растений могут кардинально меняться на разных этапах хонтогенеза.

Огромное разнообразие онтогенетических особенностей живых организмов сильно осложняет задачу корректной количественной оценки величины радиационного воздействия. Оценка доз внутреннего облучения представляет еще большую сложность. Необходимо учитывать поступление радионуклидов внутрь организма разными способами: аэралью и корневым путем у растений, ингаляционно, перорально и через кожные покровы у животных. Необходима информация о метаболизме разных радионуклидов, их всасывании, распределении по организму, накоплению в органах и закономерностях выведения из организма.

Избирательное накопление радионуклидов в органах особенно важно для формирования доз облучения животных. Так, при равном по активности поступлении в организм Sr-90, I-131, Cs-137 максимальная дозовая нагрузка

от I-131 приходится на щитовидную железу, от Cs-137 – на мышечную ткань, от Sr-90 – на костную ткань.

В условиях радионуклидного загрязнения организмы подвергаются, как правило, смешанному – внешнему и внутреннему облучению. При формировании дозы внешнего облучения обычно важны гамма- и бета-излучение, тогда как вкладом альфа-излучения можно пренебречь. Распределения поглощенной дозы зависит от размера организма; так при больших размерах тела даже для гамма-излучения может наблюдаться значительная неоднородность распределения поглощенной дозы. Так, в центре тела таких животных как овца или корова поглощенная доза в 2-3 и 5-7 раз ниже, соответственно, чем на поверхности кожи. При внутреннем облучении, наоборот, наибольшую значимость приобретают альфа- и бета-излучения.

Источниками облучения растений в окружающей среде могут быть: почва и воздух, вода (особенно для водных растений, как морских, так и пресноводных), соседние растения, также содержащие радиоизотопы, поступившие в результате корневого и внекорневого поглощения.

Органы растений имеют неодинаковую радиочувствительность. Наиболее радиочувствительной частью растений является точка роста или апикальная меристема. Меристематические ткани могут быть расположены в побегах и корнях, а также интеркалярно или латерально. При высоких дозах облучения меристематические клетки легко повреждаются, и происходит угнетение точки роста с последующим увеличением кушения, роста боковых побегов, активизации спящих пазушных почек.

По мере роста растений происходит удаление их точки роста от поверхности загрязненной почвы, в результате чего дозовая нагрузка от внешнего облучения на конус нарастания снижается.

Для животных источниками внешнего облучения являются радионуклиды, распределенные в различных компонентах окружающей среды (воздух, вода, почва), а источниками внутреннего облучения – инкорпорированные радионуклиды, поступившие в организм с кормом и водой, с воздухом и через кожные покровы.

В естественных условиях на формирование дозы могут оказывать влияние разные факторы. Так, животное способно перемещаться. Для

некоторых животных этот фактор незначителен (например, почвенные беспозвоночные).

Другие животные могут перемещаться на большие расстояния (олень или перелетные птицы) или между разными средами (лягушки часть времени находятся в воде, часть – на суше).

Среди животных имеет место огромное биоразнообразие и большое разнообразие типов онтогенеза. Достаточно вспомнить жизненный цикл лягушки или бабочки. Геометрические и биологические особенности животных на разных этапах онтогенеза сильно различаются. Для гусеницы, проводящей все время на поверхности загрязненных листьев, наличие в этих листьях альфа- и бета-излучающих радионуклидов будет иметь большое значение, в то время как для порхающей в воздухе бабочки их роль значительно снизится. Проникающей способности бета-излучения достаточно для однородного облучения икринки, но для взрослой лягушки в тех же условиях распределение дозового поля в теле окажется очень неравномерным. Как уже упоминалось, оценка доз внутреннего облучения может быть наиболее сложной задачей. Для описания метаболизма радионуклидов в организме в ряде случаев применяют так называемые камерные модели. Они могут быть довольно сложными и детальными и описывать происходящие процессы в динамике. Движение радионуклидов между камерами описывают системой дифференциальных уравнений. Но для верификации таких моделей требуется большой объем экспериментальной информации.

В общем случае определение дозы облучения представляет сложную задачу, требующую применения специальных методов измерений и расчетов. На практике, для проведения скрининговых оценок применяют упрощенный подход, используя идеальные геометрические модели источника и объекта и набор предварительно установленных коэффициентов дозового преобразования для каждого радионуклида.

Такие коэффициенты позволяют рассчитать дозы внешнего и внутреннего облучения. В качестве исходной информации используются данные об удельной активности радионуклидов в природной среде или теле животного или растения.

Рассмотрим пример проведения таких скрининговых оценок, описанных в методическом руководстве, рекомендованном Министерством природных

ресурсов и экологии Российской Федерации для оценки радиационного воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Будем рассматривать водное млекопитающее, обитающее в речной экосистеме, где вода и донные отложения загрязнены радионуклидами. Мощность дозы облучения животного будет складываться из мощности дозы внешнего и внутреннего облучения, при этом источниками внешнего облучения являются вода и донные отложения. На следующем слайде показаны формулы для расчета дозы облучения. Чтобы их использовать, нам нужны данные об удельной активности воды, донных отложений и тела животного, а также значения соответствующих коэффициентов дозового преобразования. Также, в расчете используются дополнительные коэффициенты, учитывающие вклад разных источников облучения в зависимости от местонахождения и поведения организма в экосистеме.

#### **4.2 Этапы развития радиационного поражения**

Принято считать, что процесс биологического воздействия ионизирующих излучений на живые структуры включает три этапа: физический, радиохимический и общебиологический.

Физический этап, длящийся всего  $10^{-11}$  -  $10^{-13}$  с, включает в себя чисто физические явления взаимодействия энергии излучения с веществом, приводящие в итоге к одному из нестабильных состояний атомов и молекул: их ионизации или возбуждению.

Механизм передачи энергии всех заряженных частиц один и тот же. При прохождении через вещество заряженная частица теряет свою энергию, вызывая ионизацию и возбуждение атомов до тех пор, пока общий запас энергии уменьшится до такой степени, что частица теряет ионизирующую способность и обычно захватывается каким-либо атомом с образованием иона. При ионизации молекул воды и различных органических и неорганических соединений образуются ионы и свободные радикалы.

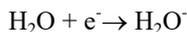
Радиохимический этап начинается с момента образования в облученных клетках активных радикалов и перекисей, которые активно вступают в химические реакции с ненарушенными молекулами других веществ клетки.

В ходе третьего - общебиологического - этапа действия радиации на живую клетку происходят различные радиационно-химические изменения в субстрате клеток, приводящие к изменению проницаемости мембран, цепным ферментативным процессам, нарушению синтеза АТФ, образованию радиотоксичных веществ. Это приводит к серьезным и часто необратимым изменениям структуры и функций всех клеточных органоидов, включая само ядро.

### 4.3 Теории косвенного и прямого действия

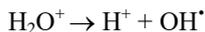
В настоящее время в радиобиологии существуют две концепции действия радиации на живые организмы. Чаще они называются теориями косвенного и прямого действия.

Согласно первой из них, ионизация, вызванная излучением, происходит в особых молекулах, входящих в состав чувствительных областей клеток. Их всех первичных процессов, происходящих в них под действием радиации, играют ионизация и связанные с ней химические изменения. Под действием ионизирующих излучений в воде образуются катионы и анионы:

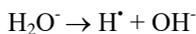


Эти ионы отличаются от ионов воды, образующихся в естественных условиях в процессе электролитической диссоциации. Они характеризуются неустойчивой электронной структурой, так как имеют нечетное число электронов на внешней орбите и свободную валентность. По этим причинам эти ионы не могут долго существовать и быстро диссоциируют с образованием свободных радикалов.

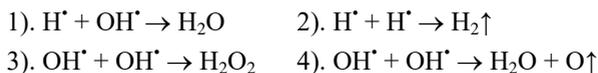
Положительный ион (катион) воды диссоциирует на протон и свободный радикал гидроксила:



А отрицательный ион (анион) воды образует при диссоциации свободный радикал водорода (атомарный водород) и анион гидроксильной группы:



Свободные радикалы водорода и гидроксила обладают очень высокой химической активностью и не могут существовать длительное время. Поэтому они начинают взаимодействовать как между собой, так и с другими биологически важными молекулами:



Свободные радикалы, перекись водорода и атомарный кислород обуславливают химические изменения в различных частях клеток, которые приводят к развитию радиобиологических эффектов.

До открытия свободных радикалов воды радиобиология объясняла действие радиации на живые клетки прямым эффектом.

В конце 20-х - начале 30-х гг. прошлого столетия Дж. Кроутер, а также Ф. Хольбек и А. Лакассань, анализируя кривые зависимости эффекта (гибель клеток) от дозы облучения, для объяснения его вероятностного характера вводят представление о наличии в клетке особого чувствительного объёма - «мишени». Попадание ионизирующей частицы в «мишень» и вызывает наблюдаемый эффект.

При изучении действия радиации на простейших и биологически активные молекулы Кроутер установил, что зависимость их инактивации от величины дозы облучения носит экспоненциальный характер. То есть, эффективность облучения резко падала, когда погибало около 90% объектов, а для оставшихся 10% необходимо было увеличить дозу в 2 раза. Это объяснялось тем, что вероятность попадания ионизирующих частиц или квантов в неповрежденные объекты уменьшается, так как в среде их содержание уменьшается в 10 раз от начального количества. На основе этой зависимости Кроутер пришел к выводу, что инактивация клеток или молекул происходит в результате одного попадания (одноударный механизм).

Теория «мишени» как формальное обобщение многих наблюдаемых явлений была окончательно сформулирована английским учёным Дугласом Ли (1946), немецким учёным К. Циммером и нашим выдающимся соотечественником биологом-эволюционистом, генетиком, одним из основателей радиобиологии Николаем Владимировичем Тимофеевым-Ресовским (1947).

Д. Ли в своих исследованиях развил гипотезу Кроутера и также сформулировал новое положение о многоударном механизме поражения. Он

предположил, что в клетках имеются особо чувствительные места, т.е. мишени, при попадании в которые частиц или квантов происходит инактивация ферментов или гибель клеток.

Было установлено, что оно вызвано не только попаданием самой частицы в клеточные структуры, но также и действием других факторов: температуры, содержанием воды и кислорода, pH среды и наличием защитных веществ-радиопротекторов.

Среди первых радиопротекторов были, в основном, вещества, содержащие в своей молекуле аминную (- NH<sub>2</sub>) и тиольную (- SH) группы. В дальнейшем, в экспериментах на лабораторных животных и клетках, были изучены защитные свойства десятков тысяч препаратов различной химической природы и было выявлено, что наиболее эффективными остаются упомянутые аминные и тиольные радиопротекторы.

#### **4.4 Радиохимические процессы в облученном организме.**

На основании проведенных многочисленных цитологических и микробиологических исследований было установлено, что радиохимические процессы, вызванные действием радиации, ведут к нарушениям во всех частях клеток и целого организма растений и животных. Прямое действие больших доз радиации на молекулы белка приводит к их денатурации. В результате молекула белка коагулируется и выпадает из коллоидного раствора, в дальнейшем подвергаясь под влиянием протеолитических ферментов распаду. При этом в клетке наблюдаются нарушения физико-химических процессов с деполимеризацией нуклеиновых кислот, что сопровождается изменением структуры поверхности клетки и проницаемости мембран.

Свободные окисляющие радикалы вступают в реакцию с ферментами, содержащими сульфгидрильные группы (SH), которые превращаются в неактивные дисульфидные соединения (S==S). В результате этих реакций и превращений нарушается каталитическая активность важных тиоловых ферментных систем, принимающих активное участие в синтезе нуклеопротеидов и нуклеиновых кислот, имеющих огромное значение для жизнедеятельности организма.

Прежде всего, это действие сказывается на молекулярных структурах ядер клеток, включая хромосомный аппарат, молекулы ДНК и РНК. Об этом можно судить по изменениям физико-химических свойств нуклеопротеидных комплексов, приводящих к нарушению согласованного процесса синтеза клеточных белков.

Поражение генетических структур (ДНК) обуславливает также мутагенное действие радиации, так как во время деления клетки на стадиях митофазы, анафазы и телофазы появляется «липкость» хромосом, их распад на отдельные фрагменты и нарушение расхождения к полюсам. Клетки, облученные в стадии интерфазы или профазы, не способны вступать в процесс дальнейшего деления в течение одного и более часов.

Повреждение внутриклеточных структур может происходить при прямом действии ионизирующих частиц, а также под влиянием различных радиотоксинов, образующихся под действием свободных радикалов, перекисей, атомарного кислорода и молекулярного водорода в ходе радиохимического этапа лучевого поражения.

Показательным моментом является также последствие облучения клеток со стороны митохондрий. При нарушении целостности их мембран угнетаются процессы окислительного фосфорилирования, лежащие в основе синтеза важнейшего клеточного макроэрга - АТФ. Так, при дозах облучения от 100 до 300 Р через 10-12 часов сначала наблюдается гипертрофия митохондрий, а затем их лизис. Это приводит к нарушению энергетических процессов в клетке.

При малых дозах ионизирующих излучений пострадиационные реакции заключаются в снижении концентрации и выведении из клеток радиотоксинов и восстановлении (репарации) функций всех органоидов клеток и, в особенности, их ядер.

Радиочувствительность клеток и тканей подчиняется действию закона (правила) Бергонье - Трибондо.

В 1906 году французские ученые Ж.Бергонье и Л.Трибондо, анализируя радиочувствительность клеток семенников у грызунов, выявили наибольшую радиочувствительность у сперматогоний и сперматоцитов I порядка, а наименьшую - у зрелых спермиев.

Ими было сформулировано правило: «Рентгеновские лучи действуют на клетки тем интенсивнее, чем выше воспроизводящая активность клеток, чем

длиннее период их кариокинеза и чем менее predeterminedены их морфология и функция». Другими словами, действие ионизирующих излучений на клетки и ткани тем выше, чем выше их способность к делению (росту) и ниже - к дифференцировке (развитию).

Особенно высока радиочувствительность клеток на ранних стадиях деления ядра.

На основе этого можно выделить 4 типа клеток:

1. Наиболее радиочувствительные клетки – это регулярно делящиеся, но не подвергающиеся дифференцировке между делениями (базальные клетки эпидермиса, бластоциты красного костного мозга).

2. Менее радиочувствительные клетки делятся регулярно, но в промежутках между делениями способны дифференцироваться (например, миелоциты).

3. Относительно радиорезистентные клетки в обычных условиях не делятся, но сохраняют способность к делению после стимуляции (например, клетки печени, стимулированные к делению путем частичной гепатэктомии или воздействием СС14).

4. Радиорезистентные клетки - высокодифференцированные, утратившие способность к делению (например, нейроны).

В последнее время большое внимание исследователей привлекает проблема эффектов малых доз радиации на биологические объекты в связи с увеличивающимся радиоактивным загрязнением окружающей среды.

Популяционные исследования, проведенные на модельных объектах, говорят о том, что после разового радиационного воздействия в популяции через малое число поколений происходит рост генетических повреждений, а в случае хронического воздействия появляются радиоустойчивые формы.

Таким образом, если механизмы репарации при малых дозах облучения могут довольно быстро ликвидировать незначительные нарушения и восстановить функции всех компонентов клетки, то при больших дозах в ответ проявляется патологическая реакция, приводящая либо к частичному, либо полному нарушению жизнедеятельности клеток и всего организма, приводящая его к гибели.

#### 4.5 Механизм гибели клетки

Большие дозы радиации убивают клетку, останавливают ее деление, угнетают ряд биохимических процессов, лежащих в основе жизнедеятельности, повреждают структуру ДНК и тем самым нарушают генетический код и лишают клетку информации, лежащей в основе ее жизнедеятельности.

Конечный эффект облучения является результатом не только первичного повреждения клеток, но и последующих процессов их восстановления. Предполагается, что значительная часть первичных повреждений в клетке возникает в виде так называемых потенциальных повреждений, которые могут реализовываться в случае отсутствия восстановительных процессов. Реализация этих процессов способствуют процессы биосинтеза белков и нуклеиновых кислот.

Пока реализация потенциальных повреждений не произошла, клетка может восстановиться. Это, как предполагается, связано с ферментативными реакциями и обусловлено энергетическим обменом.

Считается, что в основе этого явления лежит деятельность систем, которые в обычных условиях регулируют интенсивность естественного мутационного процесса.

Мутагенное воздействие ионизирующего излучения впервые установили русские ученые Р.А. Надсон и Р.С.Филиппов в 1925 г. в опытах на дрожжах. В 1927 г. это открытие было подтверждено Р. Мёллером на классическом генетическом объекте – мушке-дрозофиле.

В настоящее время существует гипотеза, объясняющая лучевое поражение клетки нарушениями пространственной координации ферментов в облученном субстрате. Обычно ферментные системы отделены мембранами от органоидов, что способствует нормальному ходу обменных процессов. Из-за повреждения лизосомальных мембран происходит увеличение активности и высвобождение ферментов, которые путем диффузии достигают любой органеллы клетки и легко в нее проникают, вызывая ее лизис. Поэтому при очень больших дозах облучения происходит нарушение метаболизма, разрушение жизненно важных макромолекул клетки, что приводит ее к гибели.

Хотя клетка реагирует на действие радиации как единое целое, отдельные ее структурные образования могут быть более или менее чувствительными к ней. Так, цитоплазма отличается сравнительно высокой устойчивостью, а ядро и содержащаяся в нем основная масса ДНК проявляет высокую чувствительность даже при действии невысоких доз облучения.

#### **4.6 Радиочувствительность растений и факторы ее определяющие**

Конечным результатом действия радиации на клетки и ткани живого организма являются различные патологические реакции. Степень лучевого поражения зависит от дозы и длительности облучения.

Под радиочувствительностью понимают степень нарушения различных процессов или поражения тканей и организма в целом при одной и той же дозе облучения.

При хроническом облучении общая доза растягивается на длительный период. А если та же общая доза занимает короткий промежуток времени, говорят об остром облучении. Повреждение растений и животных при таком облучении обычно наступает при меньших дозах, чем при хроническом облучении. Так, сильное угнетение вегетации растений наблюдается при остром облучении в 30 раз меньшем, чем при хроническом, а гибель организмов происходит в 15 раз чаще.

При хроническом облучении важное значение имеет общая доза, накопленная за митотический цикл, продолжительность которого тесно связана с температурой окружающей среды. При более высокой температуре клетки делятся интенсивнее, поэтому длительность митоза и общая хроническая доза изменяются.

Существенную роль в развитии лучевых поражений играет также и мощность поглощенной дозы облучения. Это та доза, которую поглощает тот или иной организм за единицу времени.

Так, доза 40 кР при мощности 5-10 рентген в минуту у пшеницы и ячменя практически не повлияли на рост растений, а гамма-облучение мощностью 50 Р/мин вызывает резкое торможение вегетации.

Радиочувствительность растений различных видов, разновидностей и сортов может различаться в 100 и более раз. При этом наиболее молодые в

филогенетическом отношении формы более устойчивы, чем эволюционно старые.

Степень поражения тканей и организма в целом зависит от многих факторов, которые подразделяются на три группы:

- 1). генетические;
- 2). физиологические и
- 3). паратипические.

К числу первых относятся видовые и сортовые особенности растений, которые определяются размерами ядер, числом хромосом и количеством ДНК. Наиболее надежным показателем радиочувствительности служит отношение объема ядра в расчете на одну хромосому (объем хромосомы).

Чем эта величина больше, тем радиочувствительность меньше. Поэтому на устойчивость растений к действию радиации влияет степень их полиплоидности: более чувствительными являются три- и тетраплоидные формы, а менее – диплоидные.

К физиологическим относятся фазы и стадии роста растений в период облучения, скорость вегетации и уровень обмена веществ. При остром облучении зависимость радиочувствительности от скорости митоза, а значит и роста организма, подчиняется действию закона Ж.Бергонье - Л.Трибондо.

Растения при остром облучении обладают повышенной радиочувствительностью в стадиях наиболее интенсивного роста. А при хроническом облучении проявляется обратная зависимость: чем выше интенсивность роста, тем меньше тяжесть лучевого поражения. Быстро делящиеся клетки поглощают за время одного акта клеточного цикла деления меньшую дозу и повреждаются слабее. Поэтому любой фактор, приводящий к увеличению продолжительности митоза или мейоза, усиливает радиационное поражение, вызывая рост частоты хромосомных перестроек под действием облучения, и в большей степени угнетает рост и развитие растительного организма.

К факторам внешней среды относятся погодно-климатические условия в период облучения, минеральный состав и плодородие различных видов почв и ряд других.

К общим критериям радиочувствительности растений относятся:

- 1) степень подавления митоза (мейоза);
- 2) процент поврежденных клеток при первом делении;
- 3) число хромосомных перестроек на одну клетку;
- 4) процент всхожести семян;

- 5) депрессии роста и развития растения;
- 6) радиоморфозы;
- 7) процент хлорофильных мутаций;
- 8) выживаемость растений;
- 9) урожайность.

Количественная оценка радиочувствительности растений по критерию выживаемости устанавливается по показателям ЛД<sub>50</sub>, ЛД<sub>70</sub> и ЛД<sub>100</sub>. Это величины доз, при которых погибает 50, 70 или 100% из числа облученных объектов.

В процессе роста радиочувствительность растений меняется. Считается, что к наиболее чувствительным периодам относятся прорастание семян и переход растения от вегетативного состояния к генеративному, когда закладываются органы плодоношения.

Злаковые культуры более радиочувствительны в фазы выхода в трубку, кущения и колошения. Зерновые бобовые наиболее чувствительны в период бутонизации, а самое резкое снижение урожайности овощных культур и картофеля наблюдается при их облучении в период появления всходов.

В целом растения наиболее устойчивы к действию радиации в период созревания и физиологического покоя семян. При облучении растений в период от всходов до начала цветения урожай снижается на 50% при следующих дозах:

- 1) горох и озимая рожь – 2 кР;
- 2) пшеница, ячмень, горох, подсолнечник – 3 кР;
- 3) гречиха, просо, томаты – 5 кР;
- 4) лен – 10 кР;
- 5) картофель – 15 кР;
- 6) сахарная свекла, турнепс – 20 кР;
- 7) капуста, морковь, столовая свекла – 25 кР.

Различия касаются не только разных культур, но и сортов одного и того же вида. При этом сортовая радиочувствительность может отличаться от полутора до пятнадцати раз. Сорта твердой пшеницы отличаются более высокой чувствительностью к радиации, чем сорта мягкой. Например, наиболее устойчивым у пшеницы является сорт Краснозёрная.

Из сортов гороха можно выделить Торсдаг, Немчиновский и Капитал. Из сортов картофеля наибольшей чувствительностью обладает Белорусский

ранний, а наименьшей - сорт Лорх, хотя относительно высокая средняя урожайность последнего делает эти различия в хозяйственном плане незначительными.

#### 4.7 Действие ионизирующих излучений на животных

В общей радиобиологии существует понятие радиобиологического эффекта, который включает в себя ряд явлений, охватывающих первичные и конечные результаты действия радиации.

Радиобиологические эффекты — функциональные и морфологические изменения, развивающиеся в организме в результате воздействия на него излучения. Биологические эффекты ионизирующих излучений различны, и зависят от вида и интенсивности облучения. Биологические эффекты различных излучений изучаются радиобиологией.

Применительно к сельскохозяйственным животным действие ионизирующих излучений оценивается по следующим критериям:

- 1) гибель животных;
- 2) продолжительность жизни после облучения летальной дозой;
- 3) продуктивность;
- 4) воспроизводительная способность.

Для реализации каждого из указанных критериев необходима соответствующая доза облучения животных. Эффекты, отнесенные к продуктивным и воспроизводительным качествам, могут быть получены под действием небольших доз.

Большое значение имеет не только мощность дозы облучения, но и его вид. Например, было установлено, что диапазон доз  $\alpha$ -облучения от накопленных (инкорпорированных) радиоизотопов  $\text{Pu}^{239}$  и  $\text{U}^{232,233}$ , вызывающих появление наибольшего числа злокачественных опухолей в костях, составлял от 0,5 до 4 килорад. Тогда как аналогичный эффект при действии  $\beta$ -излучений  $\text{Sr}^{90}$ ,  $\text{Ce}^{144}$  и  $\text{Y}^{90}$  наступал при дозах от 13 до 70 крад.

Поэтому в радиобиологии существуют коэффициенты относительной биологической эффективности или взвешивающие коэффициенты (согласно НРБ) для отдельных видов излучения, которые позволяют определять

качество ионизирующего излучения по развитию радиобиологического эффекта.

В качестве эталона принято рентгеновское излучение энергией 180-250 кэВ. Коэффициент ОБЭ для гамма-, рентгеновского и бета-излучений принят, равным 1. Для  $\alpha$ -излучения он равен 10-20, а для нейтронного излучения энергией от 5 кэВ до 10 МэВ находится в пределах от 3 до 6.

При воздействии ионизирующего излучения на живые организмы наблюдаются радиационные повреждения клеток. В 1920 г. А. Надсон (СССР) и в 1925 г. П. Анцель и П. Винтембергер (Франция) пришли к выводу, что наблюдаемые радиационные повреждения клетки – это результат двух противоположных процессов: развития повреждения и одновременно идущего процесса восстановления.

Соотношение между ними определяет степень тяжести лучевого поражения, что, в конечном итоге, отражается на общем результате облучения организма, включая ближайшие и отдаленные последствия.

Поражающий эффект облучения при одной и той же поглощенной дозе существенно зависит от временных условий воздействия, т.е. его продолжительности, зависящей при непрерывном облучении от мощности дозы. При этом различают облучение кратковременное или «острое» и хроническое.

При разделении дозы на фракции тяжесть поражения зависит как от продолжительности самих фракций, так и интервалов между ними.

В большинстве случаев увеличение продолжительности облучения или разделение его на фракции при одной и той же суммарной дозе приводит к уменьшению повреждающего действия. Объективным критерием оставшейся величины поражения к любому моменту времени после облучения является устойчивость к повторному воздействию радиации.

Эту устойчивость (радиорезистентность) можно оценить в эксперименте, определяя дозу облучения, вызывающую заданный биологический эффект, например, ЛД<sub>50/30</sub> - дозу, приводящую к гибели 50 % животных в течение 30 суток после облучения.

Любые радиационные эффекты строго зависят от интенсивности облучения.

Поражение максимально выражено при остром облучении и ослабляется при его пролонгировании. Это объясняется тем, что за миллионы лет в

процессе эволюции животные и человек приобрели огромное количество ферментов, защищающих от большого числа вредных факторов. Эти репарационные ферменты восстанавливают клетки и от радиационных повреждений. При пролонгированном облучении условия для репарации облегчаются, благодаря чему вероятность проявления эффектов и степень их выраженности сильно снижаются.

Репарация (восстановление) радиационных повреждений - это общебиологическое явление, обнаруженное при проведении опытов на всех лабораторных и сельскохозяйственных животных. На основании большого экспериментального материала американским ученым Г. Блэром (1952) была разработана теория «повреждения-восстановления», которая формулируется следующим образом: «Лучевое поражение развивается пропорционально интенсивности облучения, а процессы восстановления идут со скоростью, пропорциональной величине этого поражения. При этом остается необратимая часть поражения, которая пропорциональна величине общей накопленной дозы».

Таким образом, радиационное воздействие на организм, кроме прямого действия на его функциональные подсистемы, индуцирует или активизирует и защитные системы (репарации, адаптации), регулирующая роль которых состоит в компенсации воздействия, минимизации прямого действия облучения, восстановлении функций и репарации повреждений. Результирующий, остаточный эффект воздействия после реализации восстановительных процессов зависит от соотношения «прямого» и «обратного» процессов, своего для каждой дозы.

Ядро клетки более чувствительно к действию радиации по сравнению с цитоплазмой. Прямые доказательства этого факта были получены в опытах с прицельным облучением ядра. Оказалось, что попадание уже одной альфа-частицы в ядро оплодотворенного яйца насекомого вызывает гибель зародыша, тогда как при прохождении частиц через цитоплазму для достижения такого же эффекта необходимо 15 млн. альфа-частиц.

Внутриядерной структурой, ответственной за жизнеспособность клетки, является ДНК. Известно, что ДНК, уложенная в ядрах, представляет собой вещество наследственности, в ее цепях записана огромная по объему генетическая информация. Облучение вызывает различные повреждения ДНК и ее комплексов. К их числу относятся разрывы молекул ДНК, сшивки

ДНК-ДНК, ДНК-белок, потеря оснований, изменение состава оснований. Разрывы цепей ДНК являются основной причиной гибели делящихся клеток. В клетке существует система репарации наследственного материала, которая исправляет часть разрывов ДНК, удаляет измененные участки генетического «текста», однако не всегда полностью «излечивает» молекулу ДНК.

Критерием для изучения зависимости «доза – эффект» служит выживаемость клетки или организма.

Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением дозы излучения увеличивается не только (и даже не столько) степень поражения всех облученных клеток, сколько доля пораженных, т.е. погибших клеток.

По мнению ряда исследователей, восстановительные процессы наиболее выражены после облучения в сублетальных дозах (достаточно больших, но еще не приводящих организм к гибели). При дозах выше и ниже этого уровня темп восстановления замедляется. Считают, что при малых дозах воздействия радиации количество возникающих дефектов недостаточно для возникновения максимально возможного уровня восстановления. Облучение в высоких дозах повреждает сами механизмы восстановления. Важно отметить, что восстановление радиорезистентности может происходить на фоне прогрессирующего развития лучевого поражения, оцениваемого по клиническим проявлениям, картине крови и т.д.

В опытах на животных было установлено, что необратимая часть лучевого поражения составляет 10% общего повреждения, а интенсивность процессов репарации, определяемая по величине ЛД50 или по картине восстановления гематологических показателей, существенно различается у животных разных видов.

Период полувосстановления (время, в течение которого восстанавливается 50 % повреждений) для мышей составляет 3-8 суток, крыс- 6-9, собак- 14-18, ослов- 20-28, а человека - 25-45 суток.

Таким образом, чем крупнее организм или больше продолжительность его жизни, тем длительнее период полувосстановления.

При этом следует учитывать:

- 1) место нахождения самого источника радиации относительно облучаемого организма (внешнее, внутреннее или комбинированное);
- 2) его вид ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $x$ - или  $n$ -излучение)
- 3) кратность и длительность облучения;

4) радиочувствительность организма в целом и отдельных его органов и тканей в частности.

Для млекопитающих и, в частности, человека, достаточно шести месяцев, чтобы свести до минимума генетические последствия, вызванные радиационным воздействием. Расчеты показывают, что удвоение частоты самопроизвольных, спонтанных мутаций находится в диапазоне 0,5-2,5 Зв. На дрозофиле величина удваивающей дозы была установлена на уровне 0,05 Зв.

В зависимости от дозы и длительности облучения у животных и людей развивается лучевая болезнь разной формы и степени тяжести. При длительном облучении малыми дозами развивается хроническая форма лучевой болезни. Она может возникнуть у животных в результате многократно повторяющегося в течение длительного времени внешнего облучения малыми дозами, а также при попадании внутрь организма радиоактивных изотопов, надолго депонирующихся его тканями и органами.

Оно может быть также следствием острого течения лучевой болезни. При хроническом течении лучевой болезни поражаются все системы и органы животного. Если же организм подвергается за относительно короткий промежуток времени мощному облучению (десятки и сотни рентген в сутки), то развивается острая форма.

Острая лучевая болезнь - общее заболевание, при котором поражаются все системы организма, вызываемое однократным воздействием больших доз внешнего общего облучения или поступивших в организм радиоактивных веществ.

У взрослых животных облучение дозами 100-200 Р вызывает острую лучевую болезнь легкой степени тяжести, при дозах 200-500 Р – средней степени тяжести, а дозы свыше 500-600 Р влекут за собой развитие острой лучевой болезни тяжелой и крайне тяжелой степени тяжести, которая заканчивается гибелью.

Острая лучевая болезнь включает четыре периода:

1) период первичных реакций (1-3 дня). Характеризуется повышенной возбудимостью животных, сменяющейся депрессией, нервно-мышечными реакциями, частичной потерей аппетита, небольшим повышением температуры тела и учащением пульса;

2) латентный период (3-14 дней)- это период мнимого благополучия. Чем тяжелее облучение, тем он короче, а при крайне тяжелой степени болезни он чаще всего отсутствует. В начале этого периода наблюдается восстановление аппетита, затем он снижается. Температура тела возвращается к норме. К концу периода возникают симптомы желудочно-кишечных расстройств, появляются истечения крови из ноздрей и рта, нарушается привычный ритм дыхания (одышка, хрипы);

3) период разгара (клинических признаков) начинается обычно на 8-10-й день после облучения при средней степени тяжести, на второй-третий день - при крайне тяжелой и 20-й день - при легкой степени тяжести. Его продолжительность составляет около 5 суток. Основными симптомами являются: резкое повышение температуры тела, обильное истечение крови, подкожные кровоизлияния, отеки кожи и конечностей, хромота и нарушение координации движений, одышка, общая слабость, отсутствие аппетита на фоне повышенной жажды, развитие пневмонии и язвенной болезни желудочно-кишечного тракта (особенно тонкого отдела кишечника).

4) период исхода (разрешения) болезни наступает к 30-60-му дню и заканчивается либо гибелью организма, либо его выздоровлением, когда у животных постепенно восстанавливаются основные физиологические функции и частично или полностью – работоспособность и продуктивность.

Особенно чувствительны к действию радиации развивающиеся зародыши и плоды млекопитающих и человека. По мнению С.П. Ярмоненко (1988) основными последствиями такого воздействия являются:

- гибель плода, новорожденных или младенцев;
- отсутствие (анцефалия) и/или уменьшение размеров (микроцефалия) головного мозга и черепно-мозговых нервов;
- заболевания мозга (нейробластома, водянка); умственная отсталость и идиотия;
- отсутствие или недоразвитие одного или обоих глаз (аноптальмия, микрофтальмия), поражение (вплоть до отсутствия) хрусталика; поражение радужной оболочки, сетчатки; незакрывающиеся веки, косоглазие, дальновзоркость, врожденная глаукома;
- нарушения роста и формы тела: карликовость, задержка роста и снижение массы тела; изменение формы черепа и грудной клетки;

- деформация и атрофия конечностей; врожденный вывих бедра; сращение и расщепление фаланг пальцев;
- нарушения в расположении и строении зубов;
- нарушения в развитии (вплоть до отсутствия) и расположении внутренних органов (сердца, почек, яичников, семенников и др.).

Итак, ионизирующая радиация при воздействии на организм человека или животного может вызвать два вида эффектов, которые клинической медициной относятся к болезням: детерминированные пороговые эффекты (лучевая болезнь, лучевой дерматит, лучевая катаракта, лучевое бесплодие, аномалии в развитии плода и др.) и стохастические (вероятностные) беспороговые эффекты (злокачественные опухоли, лейкозы, наследственные болезни).

Всех животных, подвергшихся радиационному облучению, делят на четыре группы:

- 1) предназначенные к использованию по прямому назначению;
- 2) нуждающиеся в лечении;
- 3) предназначенные к убою;
- 4) подлежащие убою и утилизации.

Животные первой группы с легкой степенью тяжести лучевой болезни нуждаются только в хорошем кормлении и содержании.

Ко второй группе относят молодняк животных со средней степенью тяжести лучевой болезни и полноценной продуктивностью, а также высокоценных животных с тяжелой степенью лучевой болезни.

Третья группа включает в свой состав животных с тяжелой и крайне тяжелой степенью тяжести лучевой болезни, а также со средней степенью (ослабленные, старые и низкопродуктивные). Этим животным лечат для продления жизни до убоя.

Все остальные животные входят в состав четвертой группы. При ее многочисленности определяют очередность убоя.

В принципе, животных, подвергшихся только внешнему облучению, следует убивать как можно раньше из-за потери упитанности. При внутреннем облучении убой задерживают для снижения удельной радиоактивности за счет выведения нуклидов из организма.

### **Вопросы для самоконтроля и самостоятельного изучения**

1. Какие научно-практические задачи решает радиобиология
2. Что такое доза излучения, какие существуют виды доз и единицы их измерения?
3. Какие этапы включает процесс биологического воздействия ионизирующих излучений на живые структуры?
4. Какие в настоящее время существуют концепции действия радиации на живые организмы?
5. Прямое и косвенное действие ионизирующих излучений на живой организм.
6. Понятие радиочувствительности. Какие различают типы клеток в зависимости от их радиочувствительности?
7. От чего зависит степень поражения облученных тканей и организма в целом?
8. Как проявляется механизм гибели клетки при воздействии высоких доз радиации?
9. Понятие мощности поглощенной дозы облучения.
10. От чего зависит радиочувствительность растений?
11. Понятие радиобиологического эффекта.
12. По каким критериям оценивается действие ионизирующих излучений на сельскохозяйственных животных?
13. Что такое репарация радиационных повреждений?
14. Понятие периода полувосстановления. От чего зависит его продолжительность у животных?
15. Понятие лучевой болезни. Степени тяжести и стадии заболевания.
16. На какие группы делят сельскохозяйственных животных, подвергшихся радиационному облучению?

## **ГЛАВА 5. КРУПНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ АВАРИИ И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ**

*В главе представлены результаты анализа крупных радиационных аварий, а также радиобиологические и радиоэкологические последствия этих событий, проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в зонах радиоактивного загрязнения.*

### **5.1 Международная шкала ядерных и радиационных событий. Крупные радиационные аварии**

Международная шкала ядерных событий (англ. INES, сокр. International Nuclear Event Scale) разработана Международным агентством по атомной энергии в 1988 году и с 1990 года использовалась в целях единообразия оценки чрезвычайных случаев, связанных с аварийными радиационными выбросами в окружающую среду на атомных станциях, а позднее стала применяться ко всем установкам, связанным с гражданской атомной промышленностью. МАГАТЭ рекомендует оповещать страны-участники в 24-часовой срок о всех авариях выше 2 уровня опасности, когда имеются хотя бы незначительные выбросы радиации за пределы производственной площадки, а также в случаях событий 0 и 1 уровней, если того требует общественный интерес за пределами страны, в которой они произошли. Такой подход позволяет оперативно и согласованно оповещать общественность о значимости с точки зрения безопасности событий на ядерных установках, о которых поступают сообщения. Информация передаётся в СМИ странами-участниками и самим МАГАТЭ, в том числе посредством интернета.

Шкала применима к любому событию, связанному с перевозкой, хранением и использованием радиоактивных материалов и источников излучения и охватывает широкий спектр практической деятельности, включая радиографию, использование источников излучения в больницах, на любых гражданских ядерных установках и т. д. Она также включает утрату и хищения источников излучения и обнаружение бесхозных источников.

По шкале INES ядерные и радиологические аварии и инциденты классифицируются 7 уровнями, а также областью воздействия:

- население и окружающая среда — в ней учитываются дозы облучения, полученные населением, а также выбросы радиоактивных материалов из установки;

- радиологические барьеры и контроль — в ней учитываются события, не оказывающие прямого воздействия на население и окружающую среду и касающиеся только происходящего в пределах площадки ядерной установки, сюда входят незапланированные высокие уровни облучения персонала и распространение значительных количеств радиоактивных веществ в пределах крупной ядерной установки, например АЭС;

- глубокоэшелонированная защита — сюда входят события, связанные с тем, что комплекс мер, предназначенных для предотвращения аварий, не был реализован так, как это задумывалось.

Под шкалу подпадают только радиоактивные утечки и нарушения мер безопасности, а не случаи переоблучения больных в результате процедур, военные инциденты и намеренные преступления. Нерадиационные аварии на ядерных установках (например, выброс нерадиоактивного газа, разрушение турбины, падение с высоты) также не попадают под шкалу. Шкала неприменима и для сравнения уровня безопасности у государств и проектных организаций — из-за небольшого количества аварий второго уровня и выше.

В Российской Федерации по этой шкале с 1990 года классифицируются все аварии и нарушения в работе АЭС, предварительную оценку события производят специалисты АЭС совместно с представителями Ростехнадзора и направляют её в концерн Росэнергоатом и во ВНИИАЭС, где производится дополнительное рассмотрение с участием всех вышеуказанных сторон, в результате которого даётся окончательная оценка произошедшего на АЭС события по шкале INES, которая рассылается в различные заинтересованные организации.

На сегодняшний день только две аварии оценены по максимальному, 7-му уровню (Чернобыль и Авария на АЭС Фукусима I), и одна по 6-му (авария на ПО «Маяк»).

Авария на ядерном объекте в Чернобыле всеми экспертами признана как самая худшая катастрофа в истории атомной энергетики.

Крупнейшая техногенная катастрофа произошла 26 апреля 1986 года, на 4-м блоке Чернобыльской атомной электростанции, находящейся в городе Припять. Разрушение носило взрывной характер, реактор был полностью разрушен, и в окружающую среду было выброшено большое количество радиоактивных веществ. Авария расценивается как крупнейшая в своём роде за всю историю атомной энергетики, как по предполагаемому количеству погибших и пострадавших от её последствий людей, так и по экономическому ущербу.

В результате аварии произошёл выброс в окружающую среду радиоактивных веществ, в том числе изотопов урана, плутония, йода-131 (период полураспада — 8 дней), цезия-134 (период полураспада — 2 года), цезия-137 (период полураспада — 30 лет), стронция-90 (период полураспада — 28,8 лет). Суммарная активность выброса, включая инертные радиоактивные газы, составила, по данным НКДАР и МАГАТЭ, до  $14 \cdot 10^{18}$  Бк (примерно  $38 \cdot 10^7$  Ки, для сравнения: при взрыве ядерного заряда мощностью 1 Мт образуется  $\approx 1,5 \cdot 10^5$  Ки стронция-90 и  $1 \cdot 10^5$  цезия-137).

В результате аварии из сельскохозяйственного оборота было выведено около 5 млн. га земель, вокруг АЭС создана 30-километровая зона отчуждения, уничтожены и захоронены (закопаны тяжёлой техникой) сотни мелких населённых пунктов, а также личный авто- и мототранспорт эвакуированных жителей, который тоже подвергся загрязнению и людям не разрешили уехать на нём.

Загрязнению подверглось более 200 тысяч км<sup>2</sup>. Радиоактивные вещества распространялись в виде аэрозолей, которые постепенно осаждались на поверхность земли. Благородные газы рассеялись в атмосфере и не вносили вклада в загрязнение прилегающих к станции регионов. Загрязнение было очень неравномерным, оно зависело от направления ветра в первые дни после аварии. Наиболее сильно пострадали области, находящиеся в непосредственной близости от ЧАЭС: северные районы Киевской и Житомирской областей Украины, Гомельская область Белоруссии и Брянская область России. Радиация задела даже некоторые значительно удалённые от места аварии регионы, например Ленинградскую область, Мордовию и Чувашию — там выпали радиоактивные осадки. Большая часть стронция и плутония выпала в пределах 100 км от станции, так как они содержались в

основном в более крупных частицах. Йод и цезий распространились на более широкую территорию.

Авария на АЭС Фукусима-1 началась 11 марта 2011 года в результате сильнейшего в истории Японии землетрясения и последовавшего за ним цунами. Затопление подвальных помещений, где располагались распределительные устройства, резервные генераторы и батареи, привело к полному обесточиванию станции и отказу систем аварийного охлаждения. Произошло расплавление ядерного топлива в реакторах энергоблоков 1—3, накопление водорода в результате парциркулиевой реакции и взрывы гремучей смеси на энергоблоках 1, 3 и 4. В окружающую среду попали в основном летучие радиоактивные элементы, такие как изотопы йода и цезия, объём выброса которых составил до 20 % от выбросов при Чернобыльской аварии.

Первоначальный выброс радиоактивных веществ в атмосферу произошел в период с 12 по 14 марта, и был обусловлен сбросом давления из гермооболочек и взрывами на блоках 1 и 3. Этот выброс протянулся в восточном направлении и был рассеян над океаном. Основной вклад в загрязнение сухопутной территории Японии внесли радиоактивные вещества из контейнента второго энергоблока после его разгерметизации 15 марта. Следуя за переменной ветра, направление выброса сменилось с южного на северо-западное, а вечером 15 марта, начавшийся дождь привёл к осаждению радиоактивных веществ на поверхность. После 23 марта атмосферные выбросы значительно снизились и уже мало сказывались на загрязнении территории Японии.

Большую часть выброса составили инертные газы и летучие элементы, полностью вышедшие из топлива при его плавлении. Выход в окружающую среду более тугоплавких компонентов ядерного топлива, таких как стронций и плутоний, был крайне ограничен. Всего в атмосферу было выброшено до 32 ПБк криптона-85, до 12 тысяч ПБк ксенона-131, до 400 ПБк йода-131, до 20 ПБк цезия-137. Около 80 % атмосферного выброса было вынесено далеко за прибрежную зону где радиоактивные вещества постепенно осели на поверхность океана и были подхвачены трансокеаническими течениями.

Основной объём сброса радиоактивной воды в океан произошел в течение первого месяца с начала аварии. Всего было сброшено до 20 ПБк йода-131 и до 6 ПБк цезия-137, вклад иных изотопов оказался значительно

ниже. Загрязнению подверглись, прежде всего, прибрежные воды: концентрация радиоактивных веществ в воде на расстоянии 30 км от АЭС оказалась в 1000 раз меньше чем вблизи неё. В 2013 году цезий-137 фукусимского происхождения был обнаружен в водах континентального шельфа Канады в концентрациях  $0,5 \text{ Бк/м}^3$ , что ниже глобальной концентрации радиоцезия в океане равной  $1 \text{ Бк/м}^3$ .

В декабре 2013 года АЭС была официально закрыта. На территории станции продолжают работы по ликвидации последствий аварии. По оценке ТЕРСО, на приведение объекта в стабильное, безопасное состояние может потребоваться до 40 лет.

## **5.2 Радиобиологические последствия радиоактивного загрязнения природных экосистем**

Влияние радиоактивных веществ на все живые организмы колоссально. Они проникают в почву, атмосферу, водоемы, тем самым становятся неотъемлемой частью экосистемы.

Таким образом, основными последствиями радиоактивного загрязнения окружающей среды, наступившего в результате использования ядерного оружия, эксплуатации атомных электростанций, добычи природных ископаемых, может быть не только угроза всей жизни на земле, но и изменение природного фона планеты.

К основным негативным последствиям относятся:

*Негативное воздействие радиации на организм человека.* На здоровье человека радиоактивные элементы могут оказывать самые негативные последствия. При этом тяжесть заражения напрямую зависит от полученной организмом дозы радиации. Большие дозы облучения приводят к тяжелым формам лучевого поражения. Что, как правило, заканчивается летальным исходом. Для лучевой болезни характерны такие проявления: поражение кроветворной системы, костного мозга, разрушение костных тканей, изменение кожных покровов, ухудшение работы кишечника, сердца. Более легкие формы радиоактивного поражения проявляются следующей симптоматикой: ослабление иммунной системы, гормональный сбой, нарушение репродуктивных функций, развитие аллергических реакций.

Последствием этих патологий может быть развитие других, более серьезных заболеваний: злокачественные опухоли, лейкемии, бесплодие, психические расстройства.

*Радиоактивное загрязнение растительного и животного мира.* У растений, подвергшихся радиации, наблюдается замедление роста, низкая урожайность, изменение пигмента, увядание. И чем выше загрязнение, тем существенней происходят изменения. Обитание диких животных на зараженной территории приводит к увеличению заболеваемости и повышенной смертности, видовому исчезновению и развитию генетических перерождений.

*Мутации.* Известно, что радиация обладает сильной мутагенностью. Радиоактивное облучение проявляется нарушениями в кроветворной системе, это обусловлено тем, что период жизни клеток крови достаточно короткий, в следствии этого в них быстрее проявляется результат радиоактивного заражения, иными словами – мутационные изменения. Таким образом, влияние радиации меняет гомеостаз системы и функционирование отдельных органов мутагенным путем. Адаптируясь, проявившиеся мутации могут надолго сохраниться в наследственной информации, что послужит изменению видового состава экосистемы.

*Загрязнение почв.* Зараженные частицы могут попадать в почву и накапливаться в ней в результате выпадения осадков от ядерных взрывов, аварий на АЭС, при утилизации отходов промышленных предприятий, научно-исследовательских институтов, связанных с изучением и применением атомной энергии. Загрязнение почвы не дает возможности использования земельных ресурсов для сельскохозяйственных целей. Поскольку продукция, полученная с таких земель, будет иметь высокий уровень концентрации радиоактивных веществ. Таким образом, заражение почв радионуклидами оказывает непосредственное воздействие на животных, растительность и человека.

*Загрязнение гидросферы.* Испытания ядерного, атомного и водородного оружия являются основной причиной заражения водных масс. Следствием этого может быть уничтожение среды обитания для большинства представителей морской флоры и фауны. Для здоровья человека загрязнение водоемов радионуклидами представляет серьезную опасность, поскольку рыба, обитающая в зараженной водной среде, может оказаться у него на

столе. Более того, сильное загрязнение водных масс не дает возможности использования пресной воды не только для питья и приготовления пищи, но и для сельскохозяйственных нужд.

*Загрязнение атмосферы.* Максимальное загрязнение атмосферы активными радиоизотопами осуществляется в результате техногенных катастроф, ядерных взрывов. Облако радиоактивной пыли, возникшее из-за подобных взрывов, держится в атмосфере достаточно долго, поглощая значительную часть солнечного излучения.

*Радиоактивное заражение местности* – выпадение продуктов взрыва и осадков на местность по следу движения радиоактивного облака. Таким образом, местность остается зараженной до полного полураспада вредных веществ. А на это может потребоваться несколько сотен лет. В результате чего осуществляются мероприятия по уничтожению и захоронению таких территорий, а иногда и целых населенных пунктов. Ситуация осложняется тем, что активные радиоизотопы, попадая в почву и воду, распространяются на новые территории.

*Последствия для питания.* Высокий уровень содержания радионуклидов в ягодах, грибах, рыбе, дичи, а также радиоактивное загрязнение сена и травы, предназначенных для откормки крупнорогатого скота, на сегодняшний день является основной причиной попадания вредных частиц в пищу человека. При этом не секрет, что внутренне облучение гораздо опаснее внешнего. Поскольку, попадая в организм, зараженные частицы напрямую воздействуют на жизненно важные органы, вызывая тем самым необратимые процессы.

Полностью ликвидировать последствия заражения не представляется возможным. Поэтому, чтобы уберечь человека и окружающую его среду от радиоактивного заражения, должны быть проведены предупредительные меры, которые обеспечат сохранение уровня загрязнения радиоактивными веществами в пределах допустимой нормы. Для этого необходимо ограничить выброс радиоактивных загрязнений, изолировать зараженные зоны, ограничить сферы распространения радиации, чтобы уровень загрязнения оставался в пределах безопасных для окружающей среды.

### **Вопросы для самоконтроля и самостоятельного изучения**

- 1. По какому принципу составлена международная шкала ядерных и радиационных событий?*
- 2. Какие радиационные аварии были оценены по международной шкале ядерных и радиационных событий по максимальному уровню?*
- 3. Назовите последствия крупнейших радиационных аварий.*
- 4. Назовите основные последствия радиоактивного загрязнения окружающей среды.*
- 5. Какое негативное воздействие оказывает радиация на организм человека?*
- 6. К каким последствиям приводит радиоактивное загрязнение растительного и животного мира?*
- 7. Как проявляется радиоактивное загрязнение почв, атмосферы и гидросферы?*

## ГЛАВА 6. ВЕДЕНИЕ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

*Глава содержит вопросы ведения сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения, способы снижения загрязнения радиоактивными изотопами продукции животноводства, радиоэкологические аспекты реабилитации территорий, загрязненных радионуклидами.*

### 6.1 Особенности ведения животноводства в условиях загрязнения радионуклидами

Поступление радионуклидов в организм животных происходит тремя путями:

- ингаляционным (с вдыхаемым воздухом);
- пероральным (с пищей и питьевой водой);
- перкутанным (через кожные покровы).

Всасывание радионуклидов через ЖКТ (желудочно-кишечный тракт) животных зависит от физико-химических свойств элемента, химической формы соединения и вида и возраста животных.

Распределение радионуклидов по организму животного зависит от его свойств. Так, для  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  характерно равномерное распределение, для  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{140}\text{Ba}$  – скелетное, для  $^{131}\text{I}$  – тиреотропное.

Рассмотрим пути снижения поступления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в продукцию животноводства.

Основным первичным источником загрязнения животноводческой продукции являются корма и этим определяются приемы, направленные на уменьшение поступления радионуклидов в продукцию, а, следовательно, и дозовой нагрузки внутреннего облучения, получаемой населением при потреблении молока и мяса. Основные мероприятия можно условно разделить на три группы:

1. Изменения в режиме содержания крупного рогатого скота (КРС) и других сельскохозяйственных животных.

2. Рациональное использование кормов и кормовых добавок; изменения в технологии кормопроизводства.

3. Перепрофилирование отдельных звеньев или всей отрасли животноводства.

Приведенные выше группы мероприятий по снижению содержания радионуклидов в продукции животноводства касаются работ непосредственно в хозяйстве при получении сырого мяса и молока. Существуют, однако, и достаточно эффективные приемы дезактивации, заключающиеся в переработке этих продуктов.

На накопление радионуклидов в продукции животноводства влияет также режим содержания животных.

Увеличение длительности стойлового периода является действенным мероприятием по снижению поступления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в продукцию животноводства. В этом случае достигается сокращение дозовой нагрузки как внутреннего, так и внешнего облучения животных. При стойловом содержании устраняются возможность попадания в корма наиболее загрязненных радионуклидами нижних частей растений (высокий срез при заготовке сена, см. далее) и попадание загрязненной почвы в организм животных (ежегодно с травой в организм коровы может попадать до 600 кг почвы). Снижение дозы внешнего облучения достигается за счет сокращения времени пребывания животных под воздействием гамма-излучения радиоцезия на загрязненных пастбищах, хотя этому по сравнению с внутренним облучением, как правило, уделяют меньшее значение в связи с тем, что при наиболее распространенных уровнях загрязнения территории России угроза лучевой болезни сельскохозяйственных животных маловероятна.

Стойлово-выгульное содержание крупного рогатого скота (КРС) по сравнению с пастбищным уменьшает поступление  $^{137}\text{Cs}$  в рацион животных в 3-5 раз, снижает переход этого радионуклида в мясо в 2-3 раза, в молоко – в 3-5 раз. При наличии временных экономических трудностей с чистыми кормами при стойловом содержании скота допускают краткосрочные 4-8-суточные периоды голодания животных.

С целью снижения поступления радионуклидов в продукцию животноводства вносят изменения в кормление животных.

Эта комплексная проблема включает ряд мероприятий как тривиальных, связанных с переводом животных на незагрязненные корма, так и нетрадиционных – применение кормовых добавок, способствующих выведению радионуклидов из организма животных. Использование кормов, не содержащих радиоактивные изотопы, является весьма эффективным мероприятием при получении продукции, соответствующей санитарным регламентам. Это простейший и наиболее результативный способ сокращения поступления радионуклидов в организм животных, а, следовательно, в мясо и молоко. Снижение содержания радионуклидов в организме животных зависит от ряда факторов: породы животных, их возраста, пола, физиологического состояния, вида радионуклида, его концентрации и транслокации в организме.

Следует отметить, что  $^{90}\text{Sr}$  выводится из животного организма гораздо медленнее по сравнению с  $^{137}\text{Cs}$ , так как локализуется в костной ткани, поскольку является химическим аналогом кальция. В этой связи перевод животных с загрязненных кормов на чистые корма в условиях значительного загрязнения радиостронцием гораздо менее эффективно, чем в случае загрязнения радиоцезием.

Несмотря на явные преимущества использования чистых кормов для получения радиоэкологически чистой продукции животноводства, этот прием не всегда применим по экономическим, организационным и другим причинам. В этом случае целесообразно скармливать животным хотя бы часть кормов, не содержащих радионуклиды, а также подбирать рацион, включая в него растения, в наименьшей степени накапливающие радиоактивные изотопы – зерно культурных злаков и зернобобовых, клубни картофеля, кормовой свеклы и др., что, однако, требует соблюдения пищевой сбалансированности кормов. При дефиците чистых кормов применяют также прием только предубойного кормления (“дооткорма”) животных такими кормами.

Для снижения поступления радионуклидов в продукцию животноводства применяют также кормовые добавки. В качестве них можно использовать естественные компоненты кормов, увеличивая их долю в рационе. Так, для уменьшения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в мясе и молоке целесообразно использовать корма, обогащенные кальцием. Для этого к стандартному рациону добавляют бобовые травы, отличающиеся высокими

концентрациями этого элемента. Оптимальное суточное содержание кальция в кормах составляет 40-80 г, при содержании его менее 40 г происходит более интенсивное накопление радиостронция в организме животных, а при увеличении количества Ca до 80-230 г поступление  $^{90}\text{Sr}$  в молоко сокращается в 8-11 раз. Минеральные кальциевые добавки (трикальций фосфат, известь, мел) менее эффективно выводят радионуклиды из организма животных по сравнению с кальцийсодержащими субстратами биологического происхождения.

В качестве кормовых добавок применяют также специальные препараты, снижающие поступление радионуклидов в продукцию животноводства – ферроцианидные и другие комплексоны, соли лития, альгинаты (препараты, вырабатываемые из бурых морских водорослей), цеолиты. Наиболее эффективными из них оказались аммоний-железоцианоферратные препараты (соль Гизе или берлинская лазурь, ферроцин, бифеж и др.), добавление которых в корм КРС в количестве 1,5-3 г дважды в сутки приводит к снижению содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе и молоке крупного рогатого скота на 75-85%. Для снижения содержания в продукции животноводства  $^{90}\text{Sr}$  применяют полисурьмин, альгинаты, сульфат бария. Механизмы действия этих препаратов различны: образование труднорастворимых или неусвояемых комплексных соединений, смещение ионного равновесия и др., что приводит к уменьшению всасываемости радионуклидов при прохождении их по пищеварительному тракту.

Для снижения содержания радионуклидов также проводится переработка продукции животноводства.

При традиционных способах переработки продукции животноводства достигается значительное снижение концентраций  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Так, сепарация молока позволяет отделить 85-90% этих радионуклидов, которые переходят в обрат, тогда как в сливках остается только 8-16%. При переработке сливок в сливочное масло основное количество  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  переходит в пахту и промывные воды; в масле остается, соответственно, 36 и 49% от исходной концентрации этих радионуклидов в молоке. Перетопка сливочного масла позволяет получить продукт, практически свободный от радионуклидов. Целесообразно для снижения содержания радионуклидов в молоке приготовление кисломолочных продуктов – сыра, творога, сметаны. В твороге содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  составляет не более 10% от содержания их

в исходном молоке; еще меньшие количества радиоцезия и радиостронция переходят в сыр – концентрации их снижаются в 90 и 40 раз, соответственно. Весьма эффективна заготовка консервированных долго хранящихся продуктов животноводства – концентрированного и сгущенного, а также порошкового молока.

При переработке мяса для снижения содержания радионуклидов используют в основном способы вываривания и засола. Вываривание мяса обеспечивает переход в бульон 50-90%  $^{137}\text{Cs}$  непосредственно из мяса и 70-80% – из костей. Радиостронций из костей практически не вываривается, поэтому кости от мяса целесообразно отделить и использовать, например, для приготовления костной муки или для скармливания на зверофермах. При мокром засоле мяса с периодической сменой рассола в рассол переходит 30-60%  $^{137}\text{Cs}$ . Сало, как правило, содержит небольшие количества радионуклидов, а при его перетопке практически все радионуклиды остаются в шкварках.

В целях снижения поступления радионуклидов в животноводческую продукцию возможно репрофилирование отраслей животноводства.

В различных отраслях животноводства производится неодинаковая по уровню загрязнения радионуклидами продукция. Выходом наиболее грязной продукции животноводства отличаются овцеводство и козоводство. Наиболее чистыми отраслями животноводства являются свиноводство и птицеводство. Сравнительно чистая продукция поступает также и от кролиководства. Выращивание крупного рогатого скота занимает в этом отношении промежуточное положение.

Репрофилирование в животноводстве возможно и при выращивании одного вида животных. Так известно, что некоторые радионуклиды, особенно радиойод быстро секретируются в молоко, в результате чего этот продукт становится опасным при употреблении, особенно детьми. В связи с этим при ведении животноводства КРС в условиях радионуклидного загрязнения кормовых угодий целесообразен переход к мясному скотоводству.

Таким образом, снижения загрязнения продукции животноводства радионуклидами намечаются два подхода репрофилирования:

1. Изменение состава поголовья скота (увеличение доли птицеводства, свиноводства);

## 2. Снижение доли молочного животноводства.

Таким образом, комплекс мероприятий по снижению содержания радионуклидов в продукции животноводства, включающий изменения в режиме содержания животных, рациональное использование кормов и кормовых добавок; изменения в технологии кормопроизводства, а также технологические приёмы по переработке продукции позволяют значительно уменьшить содержание радионуклидов в готовом продукте.

При очень высоких уровнях загрязнения животноводческой продукции могут быть эффективны репрофилирование отдельных звеньев или всей отрасли животноводства.

## **6.2 Использование кормовых угодий, загрязненных радионуклидами**

Использование загрязненных кормовых угодий следует рассматривать в тесной связи с радиационной обстановкой на сенокосах и пастбищах. При выпадении короткоживущих, долгоживущих радионуклидов или их смеси она может существенно различаться. При выпадениях короткоживущих радионуклидов наибольшую опасность представляют радионуклиды йода, и прежде всего  $^{131}\text{I}$ . 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 большую 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 и скормливать их не ранее чем через 1,5...2 месяца после заготовки.

Скашивание и уборка трав и через 10 суток после однократного аэрального загрязнения лугов и пастбищ позволяют удалить с растениями до 50%  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , 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 из рациона животных. Обработка естественных лугов и посевов многолетних или других кормовых культур позволяет в отдельных кормовых продуктах уменьшить содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  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, больше 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 наиболее неблагоприятных условиях, чем свиноводство и птицеводство, так как их 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 количество кормов 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  $^{137}\text{Cs}$  в кормах, получаемых с этих угодий, в 10 раз и более.

Накопление радионуклидов в сельскохозяйственных культурах существенно различается для различных почвенно-климатических зон и почв различного гранулометрического состава. Для одного и того же типа почв в зависимости от гранулометрического состава накопление радионуклидов

изменяется от 1,5 до 7 раз. Максимальные значения коэффициентов накопления определены для торфяно-болотных почв и дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава — песчаных и супесчаных (такие почвы преобладают в Брянской и Калужской областях). Минимальные коэффициенты накопления определены для более тяжелых по гранулометрическому составу почв. В растениях накопление с таких почв радионуклидов происходит в 1,1...3 раза ниже по сравнению с легкими почвами. На серых лесных почвах, а также на оподзоленных и выщелоченных черноземах (Тульская и Орловская области) накопление  $^{137}\text{Cs}$  растениями в 4...5 раз ниже по сравнению с легкими по гранулометрическому 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 учитывать особенности почв.

Мероприятия по снижению поступления радионуклидов в кормовые культуры в загрязненных районах прежде всего должны обеспечить получение кормов с их минимальным содержанием. Это важнейший и зачастую решающий фактор в снижении накопления радионуклидов в продукции растениеводства.

В настоящее время 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. Алексахиным, 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 обследование 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 корректируется структура посевных площадей, изменяются существующие севообороты и вводятся кормовые севообороты 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 предусматривают применение высоких доз калийных удобрений; внесение глинистых минералов и местных глин для увеличения емкости поглощения почвой радиоактивного цезия и снижения его биологической подвижности.

Специальные технологические приемы включают применение приёмов уборки урожая, снижающих вторичное загрязнение: уборку 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.

Рассмотрим основные агротехнические мероприятия, направленные на снижение поступления радионуклидов в продукцию животноводства.

*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 Белоруссии 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 него без оборота или с оборотом. По пласту 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 глубокозалежных 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. 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/км<sup>2</sup> (555 кБк/м<sup>2</sup>) по <sup>137</sup>Cs и менее 1 Ки/км<sup>2</sup> (37 кБк/м<sup>2</sup>) по <sup>90</sup>Sr 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/км<sup>2</sup>, или 555...1480 кБк/м<sup>2</sup>, по <sup>137</sup>Cs и 1...3 Ки/км<sup>2</sup>, или 37... 111 кБк/м<sup>2</sup>, по <sup>90</sup>Sr) 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 предпочтительнее локальное внесение минеральных удобрений. Повышение эффективности и уменьшение потерь удобрений обеспечивается при закладке их на глубину 5...9 см с боковой ориентацией относительно рядков семян в пределах 3...4 см.

Коренное улучшение — наиболее эффективный способ снижения поступления радионуклидов из почвы в луговые травы малопродуктивных естественных кормовых угодий. Первичную обработку дернины осуществляют тяжелыми дисками в два-три следа. Слабозадерненные луга пашут обычными плугами на глубину 18...20 см, а сильнозадерненные и луга на торфяно-болотных почвах — кустарниково-болотным плугом на глубину 30...35 см, 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  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Осоково-злаковые и особенно осоковые травы на постоянно переувлажненных почвах накапливают  $^{137}\text{Cs}$  в 5... 100 раз больше, чем злаковые травы из ежи сборной и мятлика лугового. Различия в накоплении  $^{90}\text{Sr}$  также существенны. По степени уменьшения поступления радионуклида они располагаются в следующем порядке: разнотравье, осоки, ежа сборная, мятлик. Среди злаковых многолетних трав по накоплению  $^{137}\text{Cs}$  установлен следующий убывающий ряд: костер безостый, тимopheевка, ежа сборная, овсяница, мятлик луговой, райграс пастбищный. Накопление  $^{137}\text{Cs}$  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  $^{90}\text{Sr}$  существенно отличается от такового по  $^{137}\text{Cs}$ : клевер, горох, рапс, люпин, однолетние бобово-злаковые

смеси, разнотравье суходольных сенокосов и пастбищ, многолетние злаковые травы, солома ячменя, солома овса, зеленая масса кукурузы и озимой 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  $^{90}\text{Sr}$  наблюдается при возделывании ранних и среднеспелых сортов картофеля Аксамит, Альтаир, Сайта и Синтез. По отношению к  $^{137}\text{Cs}$  эти различия незначительны.

Таким образом, путем подбора кормовых культур и использования их сортовых особенностей можно без каких-либо дополнительных затрат существенно снизить содержание радионуклидов в рационе животных.

*Известкование кислых почв.* Внесение извести — эффективный прием снижения поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  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 КИ), 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: половина дозы под вспашку и половина — под культивацию. Доза менее 8 т/га вносится одновременно под глубокую культивацию. На сенокосах и пастбищах известь вносится под предпосевную культивацию, при их перезалужении или коренном улучшении.

При плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  свыше  $370 \text{ Бк/м}^2$  почвы известкуют один раз в три года, а при меньших плотностях загрязнения — один раз в пять лет.

*Применение удобрений.* Внесение удобрений, с одной стороны, снижает накопление радионуклидов в продукции, а с другой — 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 радиоактивному цезию, что снижает его накопление в растениях, особенно на бедных калием дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах ( $\text{K}_2\text{O}$  вносят из расчета более  $240 \text{ кг/га}$ ). 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 стронция в растениях. Особенно эффективно внесение повышенных доз калийных удобрений под многолетние травы, корнеплоды и картофель. В опытах на супесчаных почвах с плотностью загрязнения  $^{90}\text{Sr}$   $0,3...0,5 \text{ Ки/км}^2$  повышение дозы калия от  $120$  до  $180 \text{ кг/га}$  сопровождалось снижением накопления  $^{90}\text{Sr}$  в клубнях картофеля различных сортов на  $33...57 \%$  при одновременном повышении урожая.

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  $1200 \text{ мг/кг}$  на торфяно-болотных почвах) калийные удобрения не применяют.

Фосфорные удобрения снижают поступление радионуклидов в растительную продукцию, особенно на почвах с низким содержанием подвижных фосфатов. На почвах с высоким содержанием подвижных фосфатов (более  $250 \text{ мг P}_{205}$  на  $1 \text{ кг}$  почвы на минеральных и  $1000 \text{ мг/кг}$  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. Дозы азотных удобрений необходимо рассчитывать исходя из потребности растений на планируемый урожай.

На посевах злаковых многолетних трав эффективно применение бактериальных препаратов на основе ассоциативных штаммов азотфиксирующих бактерий. Доза 1 кг/га позволяет получать прибавку урожая, равноценную внесению на 1 га посева 30...60 кг азота минеральных удобрений, и снизить загрязнение урожая  $^{137}\text{Cs}$  на 20...30%. Применение бактериальных удобрений возможно как при предпосевной обработке семян, так и при обработке почвы в начальные фазы вегетации растений.

Микроудобрения также снижают поступление 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 поступление радионуклидов в сено тимopheевки луговой снижается на 20...40 %. Однако внесение микроэлементов в почву в форме хлористого калия с добавками меди и цинка целесообразно только на почвах первой группы обеспеченности; меди менее 1,5 мг/кг, цинка 3,0 мг/кг на минеральных и соответственно менее 5,0 и 9,0 мг/кг на торфяно-болотных.

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 радиоактивного цезия в траве в 1,5...5 раз, а внесение азота, наоборот, увеличивает его.

Перепашка 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  $^{137}\text{Cs}$  в 1,5...3 раза. При качественном проведении всех технологических мероприятий по залужению и созданию сеяных травостоев на естественных

кормовых угодьях (внесение извести 6 т/га, вспашка, внесение фосфорно-калийных удобрений, дискование, посев злаковых трав) накопление  $^{137}\text{Cs}$  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  $^{137}\text{Cs}$  в получаемой растительной продукции в 11...17 раз.

### **6.3. Режим питания и содержания животных при радиоактивном загрязнении среды**

Ведение животноводства в период выпадений радиоактивных осадков и в период преимущественно корневого поступления радионуклидов в корма будет отличаться.

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...6сут; 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 существующих 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 рекомендуют концентратный тип кормления и минимальное использование сеного рациона из естественных трав.

К подстилке для животных всех видов предъявляют 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  $^{131}\text{I}$ . Эти радионуклиды — основной источник 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  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

Учитывая резко выраженную органотропность щитовидной железы к накоплению радиоактивных изотопов йода, для защиты ее рекомендуют в первые недели давать всем животным препараты, блокирующие щитовидную железу, в частности йодистые, а также вводить в рацион содержащие тиоцианат кормовые культуры из семейства крестоцветных (капусту, брюкву, рапс). Лактирующим коровам ежедневно дают препарат KI в дозе 10 г на голову, а козам по 1 г. Введение в рацион животных KI позволяет снизить выделение радиоактивного йода с молоком и его содержание в щитовидной железе животных. Это означает, что обогащение рациона животных стабильным йодом — не только прием ограничения поступления радионуклида в молоко, но и мера профилактики радиационного поражения.

Кроме того, выделение с молоком радиоактивных изотопов йода можно снизить в 2 раза, если включить 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 очистить от радиоактивного загрязнения путем удаления пленок или створок.

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. 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 испражнениями, поэтому следует проводить своевременную и тщательную уборку помещений.

При ведении животноводства на зараженной 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 средства противопылевой защиты (ватно-марлевые повязки, респираторы, халаты, куртки, комбинезоны, головные уборы), которые в конце работы тщательно стирают и сушат.

При использовании техники работу следует проводить таким образом, чтобы избежать взаимного запыления. Кабины машин должны быть герметизированы. Все свежие фрукты и овощи перед употреблением в пищу тщательно промывают водой, и желательно после этого удалить верхний слой. Пищу принимают в специально отведенных местах; перед этим снимают спецодежду и тщательно соблюдают 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. Такая ситуация как раз и создалась после черновобильской 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 представляют  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . В первый год после выпадений корма загрязнены этими радионуклидами в основном за счет внешнего (первичного и вторичного) загрязнения. Используют такие корма по схеме, описанной ранее, стараясь свести к минимуму вторичное их загрязнение.

Ведение животноводства в период преимущественно корневого поступления радионуклидов в корма имеет свои особенности. В период корневого поступления долгоживущих радиоактивных изотопов в растения рацион животных нормируют по  $^{137}\text{Cs}$  или по  $^{90}\text{Sr}$ . Снижение поступления

радионуклидов в организм животных может быть достигнуто путем рациональной организации кормовой базы.

Поскольку радионуклиды в растения из почвы поступают по-разному, изменяя состав рациона, можно существенно снизить (в 2...5 раз) попадание их в организм животных и получаемую продукцию. При выпасе коров на скудном травостое интенсивно заглаживаются почва, а, следовательно, и инкорпорированные в ней радионуклиды. Количество поступающих таким образом радионуклидов (с почвой) бывает соизмеримо с их содержанием в корме. Поэтому выпасать коров можно 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 позволяет на 50% снизить содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в молоке по сравнению с выпасом 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  $^{90}\text{Sr}$  в скелете оказалась в 3 раза ниже, чем в группе животных, выпасаемых на естественных пастбищах. Кормление лактирующих коров силосно-концентратным рационом снижает поступление в молоко  $^{90}\text{Sr}$  в 5 раз, а  $^{137}\text{Cs}$  в 2 раза, в мышцы соответственно в 5 и 2 раза, чем при потреблении сена естественного луга. Скармливание коровам смешанных кормов искусственных кормовых угодий также снижает поступление радионуклидов в молоко и мышцы в 2...3 раза. В скелете ягнят, родившихся от овец, содержащихся на смешанных и концентратных кормах, накопление стронция и цезия было соответственно в 4,2 и 4,5 раза меньше, чем у ягнят, рожденных от овец, питавшихся сеном.

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 переваримой энергии и протеина.

Так, если в расчете на 100 г переваримого белка концентрация  $^{90}\text{Sr}$  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  $^{90}\text{Sr}$ .

На почвах с высокой загрязненностью  $^{90}\text{Sr}$  нельзя выращивать корма со значительным содержанием Са; Са в рацион должен поступать с кормами, собранными с земель, характеризующихся низкой концентрацией  $^{90}\text{Sr}$ . Рациональное размещение кормовых культур и составление рационов создают предпосылки для существенного снижения поступления  $^{90}\text{Sr}$  в организм животных и продукты животноводства.

В качестве иллюстрации эффективности этих мероприятий можно привести результаты, полученные Н. А. Корневым, Н. И. Буровым, А. Н. Сироткиным и др. Лактирующим коровам в рацион вводили люцерновое сено и муку из овса, полученные на экспериментальных участках с плотностью загрязнения  $^{90}\text{Sr}$ , равной соответственно 74 и 37 ГБк/км<sup>2</sup>. Одной группе коров в рационе ежедневно давали 8 кг люцернового сена, полученного на землях с загрязнением  $^{90}\text{Sr}$  75 ГБк/км<sup>2</sup> и 4 кг овсяной муки с участка, где плотность загрязнения составляла  $37 \cdot 10$  ГБк/км<sup>2</sup>. Для второй группы животных рацион составляли из тех же количеств люцернового сена и овсяной муки, но с участков, где содержание  $^{90}\text{Sr}$  было соответственно  $37 \cdot 10^3$  и 74 ГБк/км<sup>2</sup>. Использование в рационе коров люцерны, выращенной на участке с низким содержанием  $^{90}\text{Sr}$ , и зерна овса, полученного с участка с высокой плотностью загрязнения, способствовало уменьшению поступления этого радионуклида в рацион и молоко примерно в 18 и 16 раз соответственно по сравнению со вторым вариантом эксперимента.

Применение приемов, ограничивающих поступление радионуклидов 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  $^{90}\text{Sr}$  в организм человека в разные периоды его жизни. Поиск решения данной задачи в радиоэкологии 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 стронция в молоко резко снижается. За нормальную физиологическую потребность в кальции у коров можно принять содержание его в рационе, равное 40—80 г; при более низком количестве Са переход  $^{90}\text{Sr}$  в молоко увеличивается, а при 80—230 г снижается в 8...11 раз. Поскольку дефицит кальция в рационе коров приводит к росту загрязнения молока  $^{90}\text{Sr}$ , корма для таких животных должны быть полноценными по этому элементу, что достигается введением в рацион менее загрязненных или незагрязненных кормов с высоким содержанием кальция (бобовые культуры) и минеральных подкормок. Выделение  $^{90}\text{Sr}$  с молоком зависит не только от уровня кальциевого питания животных, но и от их продуктивности. Например, чем выше суточный удой коровы, тем меньше  $^{90}\text{Sr}$  в молоке (это различие может достигать 15—20-кратного значения). Следовательно, в условиях хронического поступления  $^{90}\text{Sr}$  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 гранулометрическому составу и недостаточно обеспеченных Са почв  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  поступают в растения в значительно больших количествах, чем из почв тяжелого гранулометрического состава и обеспеченных Са. Очевидно, на территории, загрязненной указанными радионуклидами, в первом случае желательно размещать кормовые культуры, которые вносят небольшой вклад в рацион животных, а во втором — культуры, с которыми связано основное поступление радионуклидов 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 позволяет в несколько раз снизить поступление  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в молоко и мясо. Фрезерование загрязненной почвы и посев трав обеспечивают снижение поступления  $^{90}\text{Sr}$  из почвы в растения в 2 раза, вспашка плугами на глубину 25 см — в 3...4 раза.

При концентратном типе питания  $^{90}\text{Sr}$  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 этому 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 радиоактивный цезий отличаются многолетние злаковые травы, наименьшей — кукуруза на силос и кормовая свекла.

Замена сена лугового, полученного на естественных неулучшенных угодьях, сеном многолетних сеяных трав снижает содержание радиоактивного цезия 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 радиоактивного цезия 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  $370 \text{ Бк/км}^2$  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 пригодное в пищу молоко на угодьях с плотностью загрязнения до  $1295 \text{ Бк/м}^2$ .

Концентрация радионуклидов в молоке находится в прямой зависимости от их содержания в суточном рационе и в обратной — от продуктивности животных. Чем выше суточный удой, тем меньше концентрация радионуклидов в молоке.

Существенно повышается содержание радионуклидов в молоке в ранневесенний период, в начале выгона скота на пастбище. В это время травостой слабый, загрязнен 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). Крупные

гурты животных даже на хорошем травостое интенсивно вытаптывают его и загрязняют частицами почвы, что особенно проявляется в периоды засухи и обильного увлажнения пастбищ. Поэтому гурт не должен включать больше 120 голов коров. Выпас начинать лучше после отрастания травы на 12 см, а летом животных содержать в выгулах и кормить из кормушек скошенной травой. Такие мероприятия позволяют снизить содержание радиоактивного цезия в молоке более чем в 10 раз.

На загрязненных территориях с целью снижения накопления в растениях  $^{137}\text{Cs}$  в почву вносят повышенное количество калийных удобрений, поэтому корма с таких угодий сильно обогащены калием. 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.

Водопой также имеет 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 запасенные чистые корма, т. е. на контролируемый по содержанию радионуклидов рацион. Таким образом, происходит прижизненная очистка организма животных от радионуклидов. При переводе животных на подобные рационы за 20...30 дней выводится половина радиоактивного цезия, а через 2...3 мес. его концентрация в мышечной ткани снижается до 10 раз. Однако окончательно сроки очистки организма от радиоактивного цезия зависят от исходной загрязненности, возраста и физиологических особенностей организма, от степени чистоты кормов. На практике используют прижизненный контроль загрязненности организма животных радиоактивным цезием.

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  $^{137}\text{Cs}$  в допустимых пределах (160 Бк/кг) намного сложнее, чем говядину, поскольку при сходном питании накопление радиоактивного цезия 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 покрытая; жиропотом шерсть сильно загрязняется радиоактивной пылью. Однако, если ее мыть по общепринятой технологии в мыльно-содовом растворе в соотношении шерсти к раствору 1:100, содержание  $^{137}\text{Cs}$  в ней будет низким.

При производстве *свинины* в качестве основных кормов необходимо использовать концентраты и картофель. При содержании в суточном рационе радиоактивного цезия менее 640 Бк можно вести откорм свиней без ограничений.

При выращивании *птицы* на мясо следует обращать особое 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 деятельность человека.

Для получения *пушнины* с содержанием радионуклидов в пределах нормативов количество  $^{137}\text{Cs}$  в суточном рационе не должно превышать: для норки 185 Бк, для лисицы 3700, для песца 4070, для соболя 222 Бк. Для зверей можно 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 на каждый гектар водной поверхности прудов 50 кг суперфосфата и столько же аммиачной селитры

дробными порциями (4...7 раз в сезон). Непременное условие при этих мероприятиях — внесение в пруд калийных удобрений (сульфат калия) 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. Эффективный способ снижения содержания радионуклидов в воде и грунтах рыбоводных прудов — разведение в водоисточниках (воде каналов и прудов) высшей водной растительности, которая выполняет роль биофильтра. Растительность должна занимать 15...20 % общей площади пруда.

В выростных прудах необходимо проводить глубокую (на 40...50 см) вспашку ила, 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 г.).

#### **6.4 Использование веществ, ускоряющих выведение радионуклидов из организма животных с целью получения пригодной в пищу продукции**

Эффективный способ снижения загрязнения радиоактивным цезием продуктов животноводства — использование в рационах кормовых добавок, избирательно связывающих радионуклиды в желудочно-кишечном тракте животных. К таким добавкам относят различные вещества. Их принято называть сорбентами. Сорбенты подразделяют по происхождению (природные и искусственные) 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 др. 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, богатых этими веществами продуктов (яблоки, некоторые виды водорослей и др.), и хитозан, получаемый из панцирей краба и др.

Следует отметить, что у жвачных сорбенты органической природы, как правило, неэффективны из-за разрушения их микрофлорой рубца.

Цеолиты представляют собой трехмерные кристаллы алюмосиликатов. В природе наиболее распространены шесть видов цеолитов: клиноптилолит, морденит, филлоспит, 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 радиоактивный цезий, 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 дороговизны перевозок сорбенты прекратили использовать в практике.

Суточная доза цеолитов составляет 100...300 г в виде мелкодисперсной формы в смеси с комбикормом. По данным А. Д. Белова и Н. П. Лысенко, цеолиты (клиноптилолиты) в этой дозе способны достоверно снижать содержание радиоактивного цезия 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 радиоактивного цезия. 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 радиоактивного цезия с мочой. На овцах этот эффект оказался слабее (С. Фортберг и др.)

Бентонит (глинистый минерал) активно использовали в Германии и Австрии после выпадения там радиоактивных осадков. При дозе 200...500 г/гол в сутки на 50% снижалось содержание радиоактивного цезия в молоке и мышечной ткани коров. Однако при длительном применении бентонит отрицательно влияет на баланс кальция, магния и фосфора в организме животных. У коз длительное применение бентонита вызывало увеличение концентрации железа в печени и почках и снижение уровня цинка и меди в организме (Г. 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 раза содержание радиоактивного цезия в молоке коров уже на 11-е сутки. Применение этого препарата на бычках в дозе 500 г/гол позволило снизить концентрацию радиоактивного цезия в мышечной ткани в 2... 2,8 раза. В дозе 500 г/гол хумолит снижал содержание радиоактивного цезия в молоке коров при стойловом их содержании в 2...4 раза. При пастбищном содержании коров применение хумолита в дозах 300...500 г/гол не влияло заметно на концентрацию радиоактивного цезия в молоке (Р. Г. Ильязов).

Наилучший эффект снижения радиоактивного цезия в продукции животноводства дают селективные сорбенты на основе ферроцианидсодержащих препаратов (ФСП). В России разработано несколько форм таких препаратов, таких как 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).

Бифеж в дозе 30...60 г/гол в сутки в производственных условиях загрязненных хозяйств снижает переход  $^{137}\text{Cs}$  в молоко в 5... 10 раз; ферроцин и ферроцин-2 (в виде порошка) в дозе 3 г/гол — в 4...6 раз; ферроциновые болюсы (однократно 3 шт. на животное) — в 1,5...2,5 раза с продолжительностью действия в течение 2...3 мес; ферроцианидсодержащие брикеты соли-лизунца — в 1,1... 1,5 раза; ХЖ-90 в дозе 10...30 г/гол — в 1,2...3,8 раза (А. Д. Пастернак, А. В. Васильев, В. А. Бударков и др.).

Бифеж смешивают с концентратами или зеленой массой, сенажом и силосом, порошковые формы ферроцина и ферроцина-2 — с концентратами в процессе их приготовления с помощью специальных дозаторов и задают только в таком виде.

Ферроциновые болюсы вводят животному в рубец с помощью специального болюсодавателя по методике, аналогичной введению магнитного зонда и позволяющей задавать одновременно три болюса.

Применение ФСП в составе болюсов, соли-лизунца и комбикорма на заключительных стадиях откорма крупного рогатого скота позволяет снизить

концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  в мясе от 2 до 5 раз в зависимости от уровня радиоактивного загрязнения кормов. 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 неактивны по отношению к другим радионуклидам.

Направленное изменение обмена веществ позволяет усилить скорость выведения радиоактивного цезия из организма животных. С этой целью можно использовать комплекс биологически активных веществ, разрабатываемых А. Д. Беловым и Н. П. Лысенко. Этот препарат одновременно способствует увеличению продуктивности животных. Наибольшую активность он проявляет при совместном применении с каким-либо сорбентом.

Для снижения содержания  $^{90}\text{Sr}$  в молоке следует контролировать рационы по содержанию минеральных веществ, особенно кальция и калия, и 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  $^{90}\text{Sr}$  можно использовать альгинат натрия и пектиновые вещества. Эти препараты особенно перспективны в виде пищевых добавок для снижения накопления  $^{90}\text{Sr}$  в организме человека.

## **6.5 Перепрофилирование отраслей сельского хозяйства с целью снижения загрязнения продукции**

Перепрофилирование отраслей растениеводства применяется для снижения загрязнения продукции радионуклидами и носит разноплановый характер.

Одним из важнейших мероприятий перепрофилирования отраслей растениеводства является производство технических культур, продукция которых либо не используется непосредственно в пищу, либо из неё производятся пищевые продукты после глубокой переработки. К собственно непищевым продуктам относятся прядильные культуры (хлопчатник, лен, конопля, кунжут и пр.), эфиромасличные культуры (мята, герань, и пр.),

картофель (переработка на более чем 200 технических продуктов, включая полимеры, детергенты и пр.). К культурам с необходимой глубокой переработкой относятся масличные культуры (подсолнечник, соя, рапс, рыжик, горчица, арахис, кукуруза, лен, конопля, хлопчатник, клещевина и пр.), сахарная свекла, картофель. При получении рафинированного растительного масла из семян масличных культур, рафинированного сахара из свеклы, этилового спирта и крахмала из картофеля радионуклиды практически не переходят в конечный продукт.

Другой пример перепрофилирования растениеводства в условиях радионуклидного загрязнения – семеноводство полевых и овощных культур с последующей реализацией семенного материала в радиоактивно не загрязненных районах. Основная идея этого мероприятия – резкое сокращение посевных площадей, что позволяет выбрать и использовать наименее загрязненные участки.

Выше приведенному примеру близок другой вариант перепрофилирования отраслей растениеводства – развитие плодовых питомников, выращивание саженцев. В этом случае саженцы так же реализуются на экологически безопасных территориях.

Оправданной и полезной сменой рода деятельности может стать развитие овощеводства закрытого грунта. Защитные пленки и стекла теплиц защищают овощную продукцию от аэральных выпадений. Этот вид деятельности предусматривает для выращивания овощей использование субстратов не загрязненных радионуклидами. Если субстраты местные, при их заготовке снимают верхний, как правило, загрязненный слой. В противном случае используют привозные субстраты.

Лесоразведение также можно использовать в качестве перепрофилирования отраслей растениеводства. Возраст спелого леса (ель, сосна) оценивается приблизительно в 100 лет. Для цезия-137 и стронция-90 за этот промежуток времени осуществится более 3 периодов полураспада, а значит гарантированное снижение уровня загрязнения почвы и древесины более, чем в 8 раз. При этом регламенты на содержание радионуклидов в древесине не такие жесткие как в продуктах питания.

Из других видов перепрофилирования отраслей растениеводства следует назвать цветочное хозяйство и кормопроизводство для звероферм.

Перепрофилирование отраслей животноводства на прямую связано с тем, что в различных отраслях животноводства производится неодинаковая по уровню загрязнения радионуклидами продукция. Выходом наиболее грязной продукции животноводства отличаются овцеводство и козоводство. Наиболее чистыми отраслями животноводства являются свиноводство и птицеводство. Сравнительно чистая продукция поступает также и от кролиководства. Выращивание крупного рогатого скота занимает в этом отношении промежуточное положение.

Перепрофилирование в животноводстве возможно и при выращивании одного вида животных. Так известно, что некоторые радионуклиды, особенно радиойод быстро секретируются в молоко, в результате чего этот продукт становится опасным при употреблении, особенно детьми. В связи с этим при ведении животноводства КРС в условиях радионуклидного загрязнения кормовых угодий целесообразен переход к мясному скотоводству.

Таким образом, снижения загрязнения продукции животноводства радионуклидами намечаются два подхода перепрофилирования:

1. изменение состава поголовья скота (увеличение доли птицеводства, свиноводства);
2. снижение доли молочного животноводства.

Следует отметить, что перепрофилирование – очень серьезный шаг в деятельности хозяйства, и для того, чтобы пойти на этот шаг, необходим детальный анализ всех условий и факторов, включая природные, экологические, хозяйственные, экономические, социальные и прочие.

### ***Вопросы для самоконтроля и самостоятельного изучения***

1. Пути поступления радионуклидов в организм животных.
2. Какие мероприятия применяют для снижения поступления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в продукцию животноводства?
3. Как изменяется режим питания и содержания животных при радиоактивном загрязнении среды?
4. Как влияет режим содержания животных на накопление радионуклидов в продукции животноводства?
5. Какие применяют кормовые добавки и сорбенты для снижения поступления радионуклидов в продукцию животноводства?

6. *Перепрофилирование отраслей животноводства в целях снижения поступления радионуклидов в животноводческую продукцию.*
7. *Особенности ведения различных отраслей животноводства в условиях радиоактивного загрязнения.*
8. *Какие приемы возделывания кормовых культур позволяют добиться снижения радионуклидов в получаемой продукции до безопасного уровня?*
9. *Какие агрохимические свойства почвы следует учитывать при размещении кормовых культур на загрязненных территориях?*
10. *Какие селективные сорбенты, позволяющие снизить поступление радиоактивного цезия в организм животных, разработаны в России?*
11. *Как изменяют рацион животных для снижения содержания  $^{90}\text{Sr}$  в молоке?*

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Что из перечисленного не является прямой задачей радиационной экологии?

- а) Исследование распределения радионуклидов в природных средах
- б) Оценка радиационного воздействия на растения и животных
- в) Изучение биологических эффектов у растений и животных, вызванных радиационным воздействием
- г) Разработка норм радиационной безопасности

2. Использует ли детерминированный подход понятие радиационного риска?

- а) да
- б) нет

3. На каком историческом этапе радиоэкологические исследования были в основном сосредоточены на экологических последствиях испытаний ядерного оружия?

- а) Первый
- б) Второй
- в) Третий
- г) Четвёртый

4. Термин "ядерное наследие" не включает в себя:

- а) последствия Чернобыльской аварии
- б) глобальные последствия ядерных испытаний воздействие на здоровье персонала производства ядерного оружия в период гонки ядерных вооружений
- в) вопросы обращения с радиоактивными отходами, возникшие на этапе создания ядерного оружия

5. Возможности использования радиоактивно загрязненных территорий для производства продуктов питания в Российской радиоэкологии впервые были изучены

- а) в 1900-1925 гг.
- б) после кыштымской аварии 1957 г.
- в) после Чернобыльской аварии 1986 г.
- г) когда международные экономические санкции против России были введены после 2014 года

6. В современный период в задачи радиоэкологии входит

- а) предотвращение применения ядерного оружия
- б) демонстрация несомненной ядерной безопасности АЭС
- в) изучение экологического эффекта мирного использования атомной энергии
- г) разработка новых методов в ядерной медицине

7. Какой природный радионуклид в настоящее время не образуется на земле?

- а)  $^3\text{H}$
- б)  $^{222}\text{Rn}$
- в)  $^{226}\text{Ra}$
- г)  $^{232}\text{Th}$

8. Содержание  $^{40}\text{K}$  в природной смеси калия составляет

- а) 93,1%
- б) 6,9%
- в) 0,012%
- г) 0

9. содержание  $^{40}\text{K}$  в пищевых продуктах составляет около

- а) 0
- б) 1-10 Бк/кг
- в) 10-100 Бк/кг
- г) 1 Ки/кг

10. Уровень космической радиации существенно выше днем, чем ночью

- а) да
- б) нет

11. Какой радионуклид не возникает как космогенный?

- а)  $^3\text{H}$
- б)  $^7\text{Be}$
- в)  $^{14}\text{C}-14$
- г)  $^{131}\text{I}$

12. Какой источник излучения вносит наибольший вклад в естественный радиационный фон на земле?

- а) Солнечный свет
- б) Радон
- г) Ядерная медицина

д) АЭС

13. Основной вклад в общественное облучение вносят

- а) Космические лучи
- б) Испытание ядерного оружия
- в) Природные источники земного происхождения
- г) Атомная энергетика

14. Какой искусственный источник излучения вносит наибольший вклад в облучение человека?

- а) Добыча полезных ископаемых
- б) Испытание ядерного оружия
- в) Радон
- г) АЭС

15. Техногенно-усиленной естественной радиационный фон формируется в результате

- а) Добыча полезных ископаемых
- б) Испытание ядерного оружия
- в) Ядерная медицина
- г) Распад радиоактивных семейств

16. Среднегодовая доза облучения обычного человека в среднем равна

- а) 0,37 мЗв
- б) 1 мЗв
- в) 2,4 мЗв
- г) 1 Гр

17. Коэффициент передачи для цепи " почва-растение " измеряется в

- а) (Бк/кг) / (Бк/кг)
- б) (Бк/кг) / (Ки/км<sup>2</sup>)
- в) Бк/кг
- г) он безразмерен
- д) нет ответа

18. Если удельная активность <sup>137</sup>Cs в зерне составляет 12 Бк/кг, а удельная активность <sup>137</sup>Cs в почве-24 Бк/кг, то коэффициент концентрации равен

- а) 0,002
- б) 0,5
- в) 2

- г) недостаточно данных для расчета
- д) нет ответа

19. Время, в течение которого половина радиоактивного вещества выводится из организма животного, называется

- а) период полураспада
- б) эффективное время экспозиции время
- в) полувыведения
- г) эффективное время полувыведения
- д) время жизни
- е) нет ответа

20. Внекорневое поглощение радионуклидов целесообразно учитывать только в течение первого периода времени после радиоактивных отложений

- а) да
- б) нет
- в) нет ответа

21. Какой радионуклид появляется в выбросах в газообразной форме?

- а)  $^{85}\text{Kr}$
- б)  $^{137}\text{Cs}$
- в)  $^{106}\text{Ru}$
- г)  $^{238}\text{Pu}$

22. Почвенная сорбция радионуклидов приводит

- а) к лучшей вертикальной миграции радионуклидов
- б) снижению поглощения радионуклидов растениями
- в) повышению доступности радионуклидов для растений

23. На каких почвах радионуклиды хуже усваиваются растениями?

- а) глинистая
- б) песчаная
- в) богатая гумусом

24. Сухое осаждение радионуклидов из атмосферы происходит под действием силы тяжести

- а) да
- б) нет

25. Какая единица СИ применяется для поверхностного загрязнения?

- а) Р/с
- б) Бк/кг

в) Ки/км<sup>2</sup>

г) Бк/м<sup>2</sup>

26. Тип излучения учитывается при расчете

а) облучения

б) поглощенной дозы

в) эквивалентной дозы

г) эффективной дозы

д) нет ответа

27. Мышь и собака подвергаются воздействию одного и того же источника внешнего гамма-излучения. Поглощенная доза будет равна

а) одинаковая для собаки и мыши

б) выше для собаки

в) выше для мыши

г) концепция поглощенной дозы неприменима

д) нет ответа

28. Какой радионуклид доставляет оленю наибольшую внешнюю дозу при равной удельной активности почвы?

а) <sup>90</sup>Sr

б) <sup>131</sup>I

в) <sup>137</sup>Cs

г) <sup>239</sup>Pu

д) нет ответа

29. Какая геометрическая модель лучше всего описывает источник излучения при расчете дозы облучения для культивируемого растения (напр. пшеница или помидор) растет на радиоактивно загрязненной пахотной почве?

а) точечный источник

б) бесконечный источник

в) полубесконечный источник

г) тонкий бесконечный слой

д) толстый бесконечный слой

е) нет ответа

30. Установите правильную последовательность слов: изотопами называются...

а) имеющие одинаковое число

- б) разное число
- в) нейтронов
- г) протонов
- д) разновидности атомов
- е) одного элемента

31. Установите правильную последовательность слов: радиоактивность - это...

- а) самопроизвольного распада
- б) электромагнитного излучения
- в) сопровождающееся испусканием
- г) ядра атома
- д) и (или)
- е) явление
- ж) частиц

32. Атом состоит из

- а) протонов и электронов
- б) электронов и нейтронов
- в) нейтронов и протонов
- г) протонов, нейтронов и электронов

33. Атомное ядро элемента состоит из

- а) протонов
- б) нейтронов
- в) протонов и нейтронов
- г) протонов, нейтронов и электронов

34. Изотопами называются разновидности атомов, имеющие

- а) одинаковое число протонов, одинаковое число нейтронов
- б) одинаковое число протонов, разное число нейтронов
- в) разное число протонов, одинаковое число нейтронов
- г) разное число протонов, разное число нейтронов

35. Верхний символ у химического элемента  $^{137}\text{Cs}$  означает:

- а) число нейтронов
- б) число протонов
- в) атомный номер
- г) массовое число

36. Массовое число изотопа равно сумме

- а) протонов
- б) нейтронов
- в) протонов и нейтронов
- г) протонов, нейтронов и электронов

37. Дополните: ядро атома  ${}_{15}^{32}\text{P}$  состоит из \_\_\_\_\_ протонов и \_\_\_\_\_ нейтронов.

38. Дополните: элементарные частицы, входящие в состав атома, называются \_\_\_\_\_ (с положительным зарядом), \_\_\_\_\_ (с отрицательным зарядом), \_\_\_\_\_ (не имеющие заряда)

40.  $\alpha$ -излучение представляет собой поток

- а) ядер атома гелия
- б) электронов или позитронов
- в) протонов
- г) электромагнитного излучения
- д) нейтронов

41.  $\beta$ -излучение представляет собой поток

- а) ядер атома гелия
- б) электронов или позитронов
- в) протонов
- г) электромагнитного излучения
- д) нейтронов

42.  $\gamma$ -излучение представляет собой поток

- а) ядер атома гелия
- б) электронов или позитронов
- г) протонов
- д) электромагнитного излучения
- е) нейтронов

43. При  $\alpha$ -распаде заряд ядра элемента уменьшается на

- а) 1
- б) 2
- в) 3
- г) 4

44. При ( $\beta^-$ )-распаде заряд ядра элемента

- а) уменьшается
- в) увеличивается

г) не изменяется

45. Превращение ядра  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \Rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn}$  относится к

а) делению ядра

б)  $\alpha$ -распаду

в)  $\beta^-$ -распаду

г) изомерному  $\gamma$ -переходу

46. Установите соответствие: закон радиоактивного распада имеет вид ( $A$  - активность,  $\lambda$  - постоянная распада,  $t$  - время)

а)  $A_t = A_0 * e^{-\lambda t}$

б)  $A_t = A_0 * \lambda t$

в)  $A_t = A_0 * 2^{-\lambda t}$

г)  $A_t = A_0 * e^{\lambda t}$

47. Установите правильную последовательность: период полураспада - это...

а) в течение которого

б) атомов

в) в два раза

г) число

д) время

е) уменьшается

ж) радиоактивных

48. Укажите вариант ответа, содержащий только естественные радионуклиды

а)  ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$  и  ${}^{90}\text{Sr}$

б)  ${}^{37}\text{Cs}$ ,  ${}^{90}\text{Sr}$  и  ${}^{131}\text{I}$

в)  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{40}\text{K}$  и  ${}^{232}\text{Th}$

г)  ${}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$  и  ${}^{90}\text{Sr}$

49. С увеличением высоты над уровнем моря космическое излучение

а) уменьшается

б) увеличивается

в) не изменяется

50. Авария на Чернобыльской АЭС произошла в

а) 1957 г.

б) 1979 г.

в) 1986 г.

г) 1989 г.

51. Наименьшую проникающую способность имеет

а)  $\alpha$ -излучение

б)  $\beta$ -излучение

в)  $\gamma$ -излучение

52. [мР/ч] - единица измерения

а) экспозиционной дозы

б) мощности экспозиционной дозы

в) поглощенной дозы

г) мощности поглощенной дозы

53. [Зв] - единица измерения

а) поглощенной дозы

б) мощности поглощенной дозы

в) эквивалентной дозы

г) мощности эквивалентной дозы

54. [мГр/с] - единица измерения

а) экспозиционной дозы

б) мощности экспозиционной дозы

в) поглощенной дозы

г) мощности поглощенной дозы

## ГЛОССАРИЙ

**Активность (нуклида)** – скорость, с которой происходит распад нуклеотида; в Международной системе единицей активности является беккерель (Бк); при активности в 1 Бк в данном количестве радионуклида происходит 1 распад в секунду; внесистемная единица активности – кюри (Ки).

**Альфа (  $\alpha$  ) – частицы** – частицы, состоящие из двух протонов и двух нейтронов, вылетающие из ядра при его радиоактивном распаде; обладают энергией до 8,8 МэВ, высокой ЛПЭ и пробегом в воде в несколько десятков мкм;  $\alpha$  – частицами называют и ядра гелия, также состоящие из двух протонов и двух нейтронов, которым на ускорителе тяжёлых частиц может быть придана энергия в сотни МэВ

**Анафаза** – фаза митоза, во время которой хроматиды «материнской» хромосомы отделяются друг от друга, превращаются в хромосомы дочерних клеток и направляются к полюсам деления – местам формирования ядер дочерних клеток

**Аноксия** – полное отсутствие кислорода в клетке или ткани

**Апоптоз, программируемая клеточная гибель** – гибель клетки в результате запуска специальной программы последовательной активации ряда ферментов, последние из которых разрезают ДНК на участки длиной в ~185 пар оснований; одним из сигналов к запуску апоптоза является обнаружение повреждений ДНК во время прохождения клеткой сверхточных точек генерационного цикла; эти повреждения ДНК, однако, не столь велики, чтобы вызвать некроз (см)

**Беккерель** – единица радиоактивности в СИ, соответствующая 1 распаду в секунду.

**Бета (  $\beta$  ) - частицы** – электроны, вылетающие из ядер при радиоактивном распаде.

**Бэр** – биологический эквивалент рентгена, доза излучения, по биологической эффективности равная действию рентгеновского излучения в расчёте на 1 Р экспозиционной дозы.

**Взвешивающий коэффициент (Wt)**, характеризует отношение стохастического риска для ткани Т к общему стохастическому риску при равномерном облучении всего тела.

**Восстановление** – восстановление исходной структуры или жизнеспособности клетки, ткани, органа, системы, организма после облучения.

**Гамма ( $\gamma$ )-излучение** – волновое (фотонное) излучение высокой энергии, возникающее при радиоактивном распаде или аннигиляции электрона и позитрона.

**Генотип** – совокупность всех наследственных факторов, входящих в геном.

**Гипоксия** – состояние пониженного (по сравнению с тем, что считается нормой) содержания кислорода в окружающей объект среде, без указания на степень такого понижения.

**Гомеостаз** – поддержание устойчивого равновесия в **системе клеточного обновления** или в организме.

**Грей** – единица поглощенной дозы в Международной системе единиц (в СИ, системе интернациональной), равная 1 Дж/кг массы; в литературе встречается написание грэй (Гр).

**Дейтрон** – ядро атома дейтерия, состоящее из протона и двух нейтронов.

**Доза поглощённая** – количество излучения, поглощённое облученным объектом, в расчёте на единицу массы. Единицей поглощённой дозы в Международной системе является грей (Гр), который соответствует поглощению 1 Дж/кг.

**Доза удваивающая** – доза излучения, при которой в потомстве облучаемого объекта вдвое возрастает частота мутирования определённого локуса по сравнению с фоновым значением.

**Доза эквивалентная** – доза излучения, поглощённая в органе или ткани и умноженная на взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, характеризующий его эффективность в индуцировании биологического эффекта; единицей эквивалентной дозы является зиверт (Зв).

**Доза экспозиционная** – доза излучения, измеренная в воздухе.

**Доза эффективная** – сумма произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты для этих тканей, учитывающие разную чувствительность тканей в отношении канцерогенного эффекта радиации; единицей эффективной дозы является зиверт (Зв).

**Зиверт** – единица эквивалентной дозы.

**Интерфаза** – промежуток времени между двумя последовательными делениями клетки.

**Ионизирующее излучение** – излучение, энергия которого достаточна для разрыва межатомных связей путём удаления электрона с орбиты (ионизации).

**Канцерогенное действие** – способность агента индуцировать образование злокачественных новообразований (от лат. Cancer – **рак, краб**).

**Катаракта радиационная** – помутнение роговицы, наступившее вследствие воздействия на нее ионизирующего излучения.

колонию; при этом в качестве произвольно выбранного критерия **Кислородный эффект** – увеличение степени радиационного поражения объекта по мере возрастания его концентрации в окружающей клетки среде от нулевых значений  $pO_2$  (аноксии) до 20 мм.

**Кишечный синдром** – гибель от поражения клеток эпителия тонкого кишечника, у мышей наступающая на 4-6-й день после облучения.

**Клеточный (генерационный) цикл** – время, а также последовательность событий от деления клетки до деления одной из двух ее дочерних клеток (для простоты об этом говорится как о промежутке времени между двумя последовательными делениями клетки).

**Клонообразование** – способность клетки образовать образования колонии служит наличие в ней 50 клеток (в случае животных клеток) или возможность ее увидеть невооруженным глазом; утеря способности к колониеобразованию рассматривается как показатель гибели клетки.

**Коллективная эффективная доза ( см. эффективная доза)** – доза, полученная группой людей от какого-либо источника радиации.

**Костно-мозговой синдром** – гибель от поражения стволовых клеток костного мозга, у мышей наступающая в период с 6-го ( в основном с 12-го) по 30-й день после облучения.

**Костный мозг** – ткань, в которой происходит образование всех форменных элементов крови; расположена в эпифизах трубчатых костей и в плоских костях таза, черепа и ребер.

**Критические органы (системы)** – жизненно-важные органы или системы, выходящие из строя первыми в исследуемом диапазоне доз

излучения, что обуславливает гибель организма в определенные сроки после облучения; примеры: система кроветворения, тонкий кишечник, ЦНС.

**Критический орган** – наиболее радиочувствительный из нескольких органов, оказавшихся в зоне воздействия ионизирующей радиации.

**Кюри** – внесистемная единица радиоактивности, равная  $3,7 \times 10^{10}$  Бк/с (распадов в секунду).

**ЛД<sub>50</sub>** – Летальная доза 50 – доза излучения, вызывающая гибель 50% особей.

**ЛД<sub>50/30</sub>** – доза излучения, вызывающая гибель 50% объектов в течение 30 дней после воздействия (соответствующих завершению гибели мышей от поражения кишечника и костного мозга).

**Линейные потери (передача) энергии (ЛПЭ)** – потери энергии на км пути, выраженные в эВ.

**Лучевая болезнь** – клинический синдром, развивающийся вследствие общего облучения.

**Лучевая болезнь (острая)** – наступившая вследствие однократного облучения.

**Лучевая болезнь (хроническая)** – наступившая вследствие длительного непрерывного или фракционированного воздействия.

**МАГАТЭ** – Международное агентство по атомной энергии, отвечает за ее безопасное использование; штаб-квартира расположена в Вене.

**Мейоз** – процесс «редукционного», без удвоения хромосом, деления зародышевых клеток, в результате которого дочерняя клетка приобретает половину хромосомного набора родительской клетки.

**Метафаза** – центральная фаза митоза, при которой хромосомы собираются в центре клетки, образуя метафазную пластинку; в метафазе каждая хромосома состоит из двух хроматид.

**Митоз** – деление клетки.

**Митотическая активность** – характеристика пролиферативной активности ткани или органа, определяемая процентом клеток, находящихся на стадии митоза в единицу времени.

**Мишени теория (принцип)** – высказанное в 30-ые годы XX в. представление о неравнозначности поражения различных частей клетки для ее судьбы; догадка о существовании в клетке радиочувствительных структур,

поражение которых и приводит к ее гибели; в настоящее время такой структурой является ДНК.

**Мощность (поглощенной) дозы** – (син. **интенсивность облучения**) – количество энергии излучения, поглощаемой массой вещества в единицу времени (1 с, 1 мин, 1 ч, 1 сут).

**Мутации** – изменения ДНК; соматические мутации могут передаваться в клеточных поколениях в тканях самого облученного объекта, генетические – наследуются в потомстве облученных родителей.

**Нейтрон** – нейтральная, не обладающая зарядом ядерная частица с массой, почти равной массе протона; источником нейтронов служат ядерные реакторы, где они возникают при делении ядер урана, или ускорители, в которых нейтроны возникают при взаимодействии ускоренных частиц (например, дейтронов с ядрами атомов мишени, сделанной, например, из бериллия).

**Некроз** – форма клеточной гибели, реализуемая в случае накопления в ДНК несовместимого с **жизнью** количества повреждений, а также вследствие повреждения мембран.

**Облучение** – воздействие ионизирующей радиации на биологические объекты.

**Облучение внешнее** – от наружных источников излучения.

**Облучение внутреннее** – от инкорпорированных в организм радионуклидов.

**Облучение локальное** – (син. **местное**) – облучение отдельных участков (сегментов) тела.

**Облучение многократное** (син. **фракционированное**) – облучение несколькими отдельными фракциями через различные промежутки времени.

**Облучение неравномерное** – следствие ослабления излучения по глубине тела или в результате **экранирования** (см.) его отдельных сегментов.

**Облучение общее** (син. **тотальное**) – облучение всего тела.

**Облучение острое** – облучение, длительность которого не превышает нескольких часов, чаще всего составляя минуты.

**Облучение пролонгированное** – (син. **протрагированное**) – облучение, продолжающееся в течение многих дней, месяцев и лет.

**Облучение хроническое** – длительное при низкой **мощности дозы**.

**Облучения отдаленные последствия** – развивающиеся через несколько месяцев или лет после облучения – нестохастические эффекты – эпилепсия, катаракта, стерильность, сокращение продолжительности жизни; **стохастические эффекты** (см.) - злокачественные новообразования, генетические (наследуемые в потомстве) болезни.

**ОБЭ** – относительная биологическая эффективность (ионизирующих излучений).

**Онкоген** – генетическая программа, способствующая возникновению опухолей, либо присутствует в геноме в репрессированном состоянии под контролем регуляторных генов, либо образуется из разобщенных фрагментов ДНК, каждый из которых в отдельности не может вызвать опухолевую трансформацию.

**Относительная биологическая эффективность (ОБЭ)** – отношение равноэффективных по биологическому действию доз рассматриваемого излучения и гамма или рентгеновского излучений, которые считаются стандартными.

**Пи-минус мезоны ( $\pi^-$ )** (син. отрицательные  $\pi$  – мезоны) – отрицательно заряженные элементарные частицы массой, в 273 раза превышающей массу электрона;  $\pi$  – мезоны создают в месте их захвата большое локальное энерговыделение («микровзрыв»).

**Поражения потенциально летальные** – способные к **восстановлению** (см.) при изменении условий в первые часы после облучения.

**Позитрон** – элементарная частица, в ядерной физике относимая к лептонам, которая имеет **положительный** заряд и массу, равную массе электрона, т. е.  $1/1837$  от массы протона (или нейтрона).

**Поражения сублетальные** – поражения клеток, которые могут быть репарированы, выявляемые по увеличению выживаемости клеток при разделении дозы однократного облучения на две фракции с интервалом между ними до нескольких часов.

**Порговая доза** – доза, ниже которой не отмечено проявления данного эффекта облучения.

**Принцип попаданий и мишени** – формальное объяснение первичных механизмов биологического действия ионизирующих излучений, в том числе явления, называемого **радиобиологическим парадоксом** (см.): принцип попаданий характеризует особенности действующего агента – дискретность

поглощения энергии, а принцип мишени учитывает особенность облучаемого объекта – клетки – высокую гетерогенность и значимость её структур в морфологическом и функциональном отношениях, а следовательно, различие в ответе на одно и то же попадание.

**Протон** – положительно заряженная ядерная частица с массой, практически равной массе нейтрона.

**Рад** – (rad – radiation absorbed dose) – старая (внесистемная) единица поглощённой дозы, соответствующая поглощению энергии  $10^{-2}$  Дж/кг; в Международной системе единиц используется грей (Гр);  $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$ .

**Радиационная безопасность** – система мероприятий, направленных на минимизацию последствий облучения, регламентацию радиационного воздействия в виде международных рекомендаций и национальных санитарных правил и норм радиационной безопасности для разных категорий профессионалов – работников атомной промышленности и населения.

**Радиационная стерилизация** – применение ионизирующих излучений (1) для половой стерилизации растительных и животных объектов; (2) для стерилизации различных материалов медицинского назначения, пищи и обеззараживания отходов.

**Радиационная терапия** (син. **радиотерапия, лучевая терапия**) – лечение различных (в основном онкологических) заболеваний разными видами ионизирующих излучений.

**Радиационное нормирование** – регламентация уровней облучения отдельных категорий людей (профессионалов и населения), предусмотренная международными рекомендациями и национальными законодательными органами и документами.

**Радиационное старение** – отдаленное последствие облучения, проявляющееся в склерозировании сосудов, поседении, ослаблении эластических свойств кожи и сокращении продолжительности жизни.

**Радиационные синдромы** – симптомокомплексы (костномозговой, кишечный, церебральный), развивающиеся вследствие поражения соответствующих **критических органов** (см.) после облучения в определённом диапазоне доз –  $1 - 10 \text{ Гр}$ ,  $> 100 \text{ Гр}$ , соответственно.

**Радиационный фон – естественный** – за счёт радионуклидов земного и космического происхождения; **технологически изменённый и техногенный** – за счёт антропогенной деятельности человека.

**Радияция (ионизирующая)** – электромагнитное или корпускулярное излучение, способное при взаимодействии с веществом прямо или опосредованно вызывать в нём образование ионов; примеры: рентгеновское излучение, фотоны, заряженные атомные частицы, нейтроны.

**Радикалы свободные** – короткоживущие продукты радиолиза воды и органических молекул, содержащие неспаренные электроны, а потому высоко реактивные и легко реагирующие с растворённым субстратом, что приводит к его повреждению.

**Радиоактивность** – способность всех нестабильных элементов к распаду с выделением энергии в форме фотонов ( $\gamma$  – излучение) или частиц (электроны,  $\alpha$  – частицы и др.); единицей радиоактивности служит беккерель (Бк) – одно ядерное превращение в 1 с.

**Радиоактивные изотопы** (син. **радионуклиды**) – одна из форм существования элементов, различающихся по атомному весу и содержащих нестабильное ядро, испускающее ионизирующее излучение.

**Радиобиологический парадокс** – несоответствие между ничтожным количеством поглощённой энергии и крайней степенью реакции биологического объекта, вплоть до летального эффекта.

**Радиомодификация** – искусственное изменение **радиочувствительности** (см.) с помощью **радиомодифицирующих агентов** (см.).

**Радиомодифицирующие агенты** – химические и фармакологические средства ослабления (см. **радиопротекторы**) или усиления (см. **радиосенсибилизаторы**) биологического действия ионизирующих излучений.

**Радиорезистентность** (син. **радиоустойчивость**) – низкая чувствительность к поражающему действию ионизирующих излучений.

**Радиотоксины** – различные неидентифицированные гуморальные токсические агенты, образующиеся в тканях под действием облучения, в частности, клеточный детрит и другие продукты распада тканей, возможно, определяющие дистанционное действие радиации, так называемый **абскопальный эффект** (см.).

**Радиочувствительность** – относительная восприимчивость клеток, тканей, органов или организмов к воздействию ионизирующего излучения, мерой которой служит доза излучения, вызывающая определённый уровень

гибели облучаемых объектов: для инактивации клеток – показатель  $D_{37}$  или  $D_0$  на кривой выживаемости, для организмов – доза, вызывающая гибель 50% особей за определённый срок наблюдения.

**Радиочувствительность видовая** – радиочувствительность отдельных биологических видов.

**Радиочувствительность индивидуальная** – варьирование степени радиочувствительности внутри одного вида.

**Радон ( $^{222}\text{Rn}$ )** – тяжёлый радиоактивный инертный газ (период полураспада 3,8 дня); возникает вследствие последовательного деления урана; выделяется из почвы, особенно из скальных пород, а также из строительных материалов, изготовленных из таких пород; опасность представляют радиоактивные продукты распада радона, не являющиеся газами и потому захватываемые пылевыми частицами, оседающими в верхних дыхательных путях.

**Регенерация** – восстановление численности популяции клеток после утраты некоторых из них.

**Репарация ДНК** – биохимические процессы, ведущие к восстановлению исходного состояния молекулы ДНК после разрыва в ней межатомных связей, вызванных воздействием ионизирующего излучения.

**Риск (канцерогенный, генетический)** – вероятность появления тех или иных стохастических и нестохастических последствий.

**$p\text{O}_2$**  – парциальное напряжение кислорода в окружающей клетку среде, выраженное в мм рт. ст.

**Синдром** – очерченный симптомокомплекс (группа симптомов), характерный для того или иного определённого заболевания.

**Смерть под лучом** – гибель организма во время или в первые минуты после облучения в дозах более 1000 Гр, обусловленная массивным поражением мембран и структурных белков клеток ЦНС («молекулярная гибель»).

**Стволовые (клоногенные) клетки** – недифференцированные предшественники специфических клеточных линий, составляющие самоподдерживающийся фонд, который обеспечивает постоянную скорость клеточного обновления.

**Стохастические эффекты** – вероятность развития злокачественных новообразований в отдалённые (годы, десятки лет) сроки после облучения животного или человека и /или наследственных заболеваний в потомстве.

**Тератогенные эффекты** – пороки развития и уродства, развившиеся вследствие облучения эмбриона или плода *in utero* (в матке).

**Тяжёлые ядерные частицы** – протоны, нейтроны, пи – минус мезоны ( $\pi^-$ ) (см.), ядра тяжёлого водорода (дейтерий),  $\alpha$  – частицы (ядра гелия) и тяжёлые ионы (ядра других элементов).

**Хроматида** – часть хромосомы; две хроматиды, объединённые центромерой, образуют одну хромосому.

**Хромосомы** – внутриклеточные структуры, хорошо видимые в световом микроскопе, в которых в суперспирализованной форме находится ДНК во время деления клетки.

**Хромосомные аберрации (перестройки)** - возникающие под влиянием облучения структурные повреждения ДНК, при которых разорванные концы хромосом соединяются неправильно, а отдельные их фрагменты могут при делении клетки утрачиваться.

**Эквивалентная доза – поглощённая доза** (см.), умноженная на взвешивающий коэффициент, отражающий поражающую способность данного вида излучения; используется в области радиационной безопасности.

**Экранирование (от облучения)** – физический способ ослабления действия излучений с помощью поглощающих энергию материалов, помещаемых между источником излучения и объектом воздействия.

**Электрон** – элементарная частица в ядерной физике относимая к лептонам, которая имеет отрицательный заряд и массу, равную 1/1837 от массы протона (или нейтрона).

**Электронно – позитронная пара** – взаимодействие ионизирующего излучения с веществом, при котором  $\gamma$  – квант большой энергии в поле атомного ядра превращается в пару заряженных частиц – электрон (см.) и позитрон (см.).

**Эффект детерминированный** – эффект, у которого с увеличением дозы облучения возрастает как частота появления, так и тяжесть; обычно возникает после превышения некоего дозового порога; часто рассматривается как ранний эффект облучения, однако как частота, так и

тяжесть детерминированного эффекта могут возрастать спустя многие годы после воздействия.

**Эффект стохастический** – эффект, у которого с увеличением дозы облучения возрастает только частота появления, но не тяжесть; к стохастическим эффектам облучения относят индукцию злокачественных новообразований и генетические изменения в потомстве облучённой особи.

**Эффективная доза – эквивалентная доза** излучения, умноженная на взвешивающий коэффициент, учитывающий роль поражения облучаемой ткани в развитии стохастических эффектов облучения; используется в области радиационной безопасности.

**Ядра отдачи** – сильноионизирующие протоны, образующиеся в результате упругого рассеивания в веществе быстрых **нейтронов**.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозерский, Г. Н. Радиационная экология : Учебник / Г. Н. Белозерский. – 2-е изд., пер. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2020. – 418 с. – (Высшее образование)
2. Деркова, М. А. Сельскохозяйственная радиобиология и радиология / М. А. Деркова, Э. К. Рахматуллин. – Ульяновск : Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2008. – 199 с.
3. Ким, Д. Б. Радиационная экология : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 020801 "Экология" / Д. Б. Ким. – Братск : Братский государственный университет, 2011. – 212 с.
4. Коновалов, А. В. Радиационная экология : учебное пособие / А. В. Коновалов, О. В. Калатурский ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2010. – 79 с.
5. Куликова, Е. Г. Сельскохозяйственная радиология : Учебное пособие для студентов агрономического факультета, обучающихся по направлению подготовки 35.03.03 - Агрехимия и агропочвоведение (квалификация – бакалавр) / Е. Г. Куликова. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2017. – 147 с.
6. Кундик, Т. М. Сельскохозяйственная радиология : Учебное пособие для СПО / Т. М. Кундик. – Санкт-Петербург : лань, 2020. – 88 с.
7. Радиационная экология / В. И. Павленко, Н. И. Черкашина, О. Д. Едаменко, А. И. Городов. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. – 114 с.
8. Радиационная экология : учебное пособие (электронная версия). – Воронеж : Воронежский государственный университет, 2015. – 66 с.
9. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности / Г. В. Козьмин, Н. И. Санжарова, И. И. Кибина [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29. – № 5. – С. 87-92.
10. Сафонова, В. Ю. Радиационная экология : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям 310800 "Ветеринария" и 320200 "Биоэкология" / В. Ю. Сафонова, В. А. Сафонова. – Оренбург : Оренбургский государственный аграрный университет, 2005. – 312 с.

11. Сельскохозяйственная радиология : Учебное пособие. – Новосибирск : Новосибирский государственный аграрный университет, 2013. – 230 с.

12. Смирнов, С. Н. Радиационная экология. Физика ионизирующих излучений : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140400 "Техническая физика" / С. Н. Смирнов, Д. Н. Герасимов ; С. Н. Смирнов, Д. Н. Герасимов. – Москва : Издат. дом МЭИ, 2006. – 325 с.

13. Старков, В. Д. Радиационная экология : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по экологическим и географическим специальностям / В. Д. Старков, В. И. Мигунов ; В. Д. Старков, В. И. Мигунов. – Изд. 2-е, доп.. – Тюмень : Тюменский дом печати, 2007. – 399 с. – (Высшее профессиональное образование. Естественные науки).

14. Стрельников, В. В. Радиационная экология : (учебник) : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по экологическим специальностям / В. В. Стрельников, А. И. Мельченко, А. Ф. Инюкин ; В. В. Стрельников, А. И. Мельченко, А. Ф. Инюкин ; М-во сельского хоз-ва Российской Федерации, Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Кубанский гос. аграрный ун-т. – Майкоп : Адыгея, 2005.

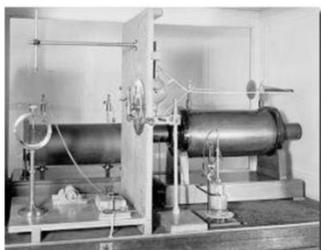
15. Фокин, А. Д. Сельскохозяйственная радиология : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям "Агрохимия и агропочвоведение", "Агрономия", "Садоводство", "Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции" / А. Д. Фокин, А. А. Лурье, С. П. Торшин ; А. Д. Фокин, А. А. Лурье, С. П. Торшин. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Санкт-Петербург : Издательство "Лань", 2011. – 415 с.

16. Щепетова, В. А. Радиационная экология : Учебное пособие для студентов направления 20.03.01 «Техносферная безопасность» / В. А. Щепетова. – Пенза : Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2015. – 136 с.

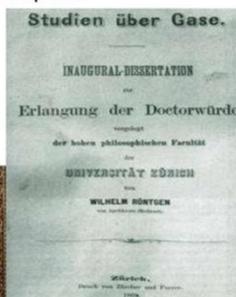


**Вильгельм Конрад Рентген** (27 марта 1845 - 10 февраля 1923) - немецкий физик, первый лауреат Нобелевской премии по физике

Рентгеновское излучение (X-ray) открыто  
8 ноября 1895 года



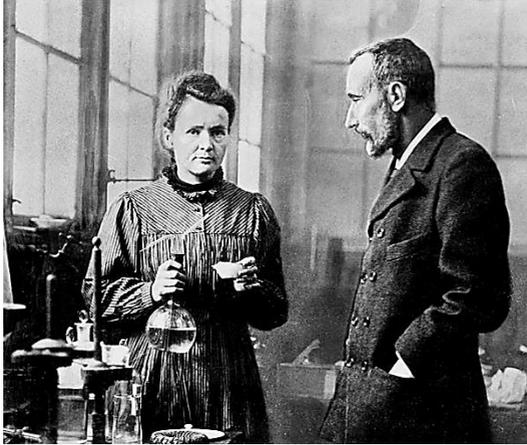
Рентгеновский  
экспериментальный  
аппарат



1901 г. - Нобелевская  
премия  
за открытие  
рентгеновского  
излучения

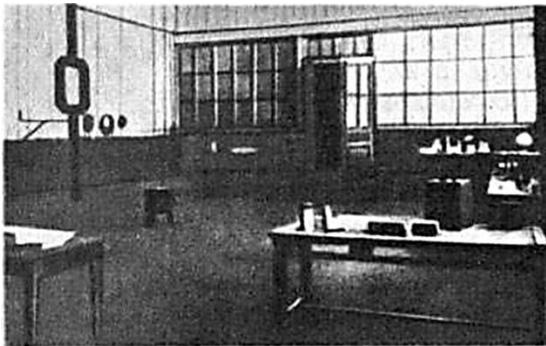


**Антуан Анри Беккерель** (15 декабря 1852 – 25 августа 1908) – французский физик, лауреат Нобелевской премии по физике, один из первооткрывателей радиоактивности

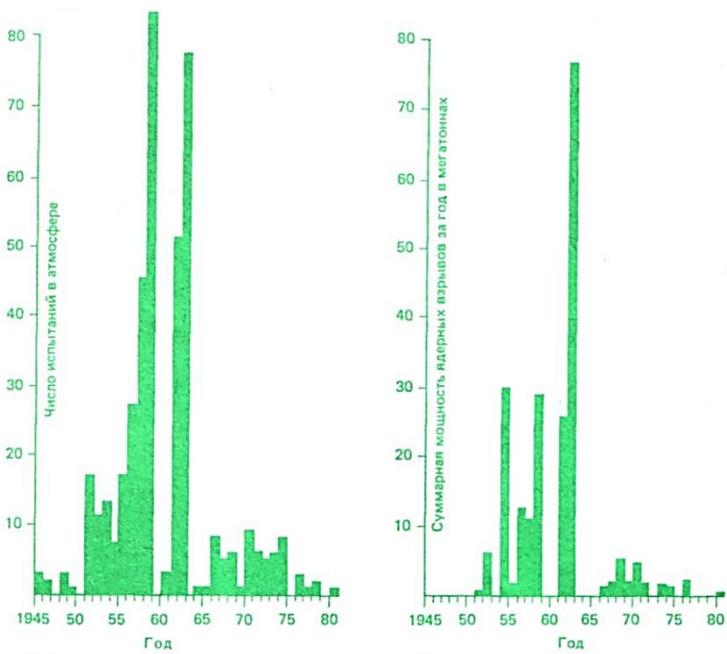


**Мария Склодовская-Кюри** (7 ноября 1867 - 4 июля 1934) — польская и французская учёная-экспериментатор (физик, химик), педагог, общественная деятельница. Первая женщина — преподавательница Сорбонны. Удостоена Нобелевских премий по физике (1903) и по химии (1911), является первой женщиной — нобелевским лауреатом в истории и первым ученым, получившим эту премию дважды.

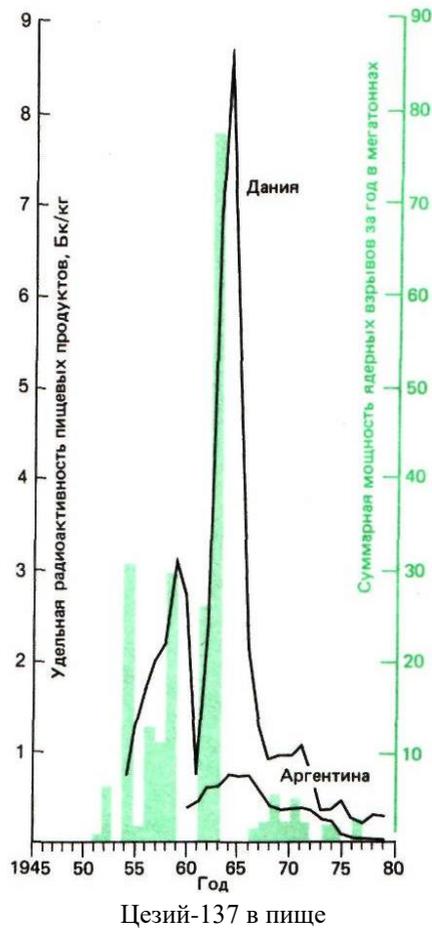
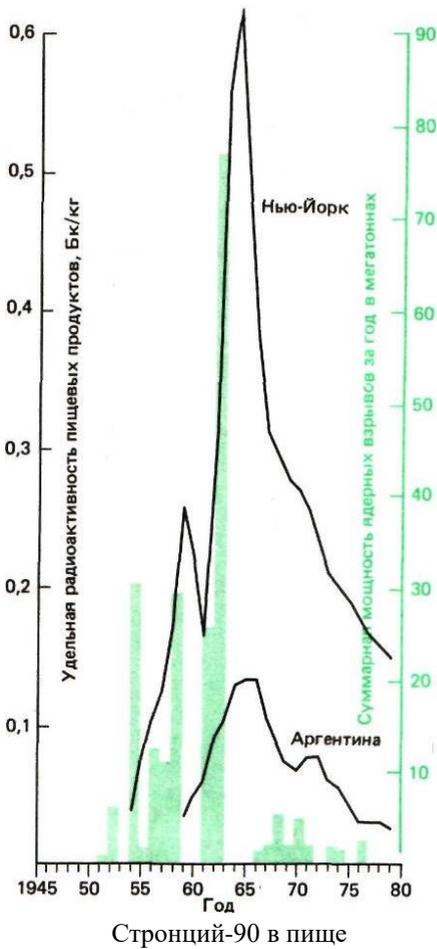
**Пьер Кюри** (15 мая 1859 - 19 апреля 1906) — французский учёный-физик, один из первых исследователей радиоактивности, член Французской Академии наук, лауреат Нобелевской премии по физике за 1903 год



Лаборатория П. и М. Кюри

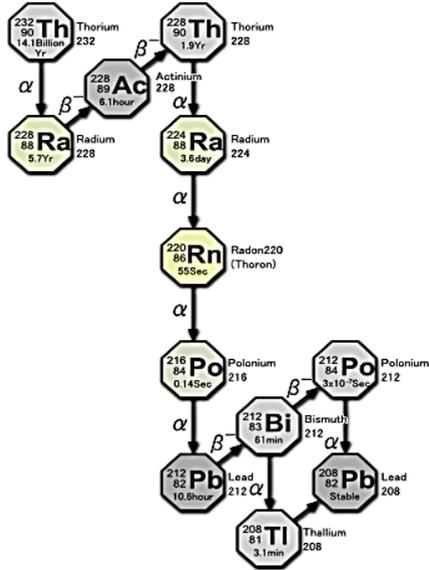


Испытания ядерного оружия в атмосфере

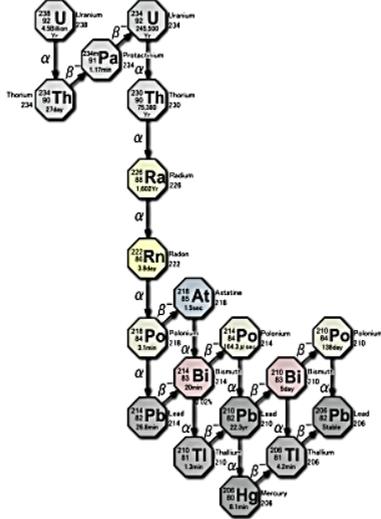


**Накопление радионуклидов в продуктах питания в период ядерных испытаний**

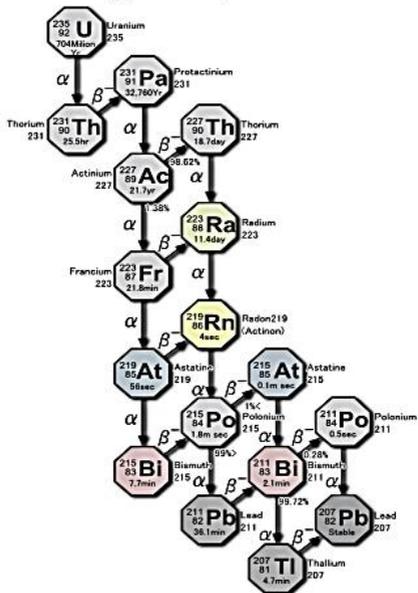
Семейство тория:



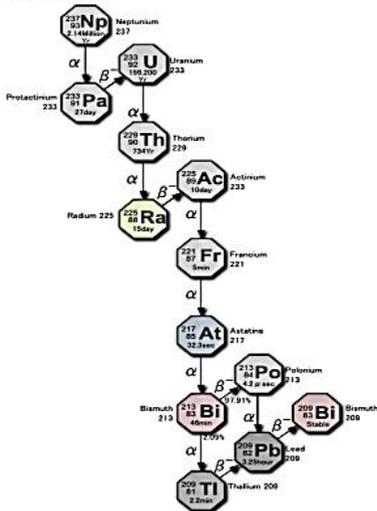
Семейство урана (называют ещё семейством радия):



## Семейство актиния (урана-235):



## И семейство нептуния:





**Ю.В. Леонова, М.В. Тютюнькова, М.В. Тихонова,  
А.А. Слипец, Л.А. Соколова**

Радиационная экология: учебное пособие

Подписано в печать 17.05.2024г. формат 60×90/16

Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman

Объем 8,63 п.л. Тираж 500 экз. Заказ 71

Издательство ИП Якунина Василиса Алексеевна

Отпечатано в типографии

РИА «Калужский Печатный Двор»

248021, г. Калуга, ул. Московская, 247, корпус 65

тел.: +7(910) 5-999-888



ISBN 978-5-6050600-9-3



9 785605 060093 >