

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АГРОНОМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ
РАДИОЛОГИЯ**
Учебное пособие

Новосибирск 2013

УДК 631.95:539.1.04 (07)

ББК 40.15

Т 345

Составитель д-р с.-х. наук, проф. *Б.И. Тепляков*

Рецензенты: д-р с.-х. наук, проф. *Н.В. Семендяева* (НГАУ);
д-р с.-х. наук *Н.И. Добротворская* (СибНИИЗиХ)

Сельскохозяйственная радиология: учеб. пособие / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Агроном, фак.; сост. Б.И. Тепляков. – Новосибирск: Изд-во НГАУ, 2013. – 230 с.

В учебном пособии изложены вопросы, касающиеся источников радиоактивного загрязнения природной среды, физики ядерных излучений, доз радиации, основ радиационной химии, миграции радиоизотопов в природной среде и пищевых цепях. Даны мероприятия по уменьшению содержания радионуклидов в продукции растениеводства, а также вопросы регламентирования воздействия ионизирующего излучения на население.

Предназначено для бакалавров сельского хозяйства по направлению подготовки 35.03.03 – Агрохимия и агропочвоведение. Может быть использовано студентами других сельскохозяйственных специальностей.

Утверждено и рекомендовано к изданию учебно-методическим советом агрономического факультета НГАУ (протокол № 2 от 25 февраля 2013 г.).

ВВЕДЕНИЕ

Важное значение сельскохозяйственная радиология приобрела в период, когда началось активное освоение атомной энергии в различных отраслях хозяйства и в первую очередь, когда стала развиваться ядерная энергетика. Как известно, следствием использования атомной энергии явилось рассеяние искусственных радионуклидов в биосфере, в том числе и в сфере агропромышленного производства с последующим включением их в цепи миграции в системе «радиоактивные выпадения – почва – сельскохозяйственные растения – сельскохозяйственные животные».

Особую актуальность проблемы сельскохозяйственной радиологии приобретают в случае аварийных ситуаций, связанных с выбросами радиоактивных веществ в атмосферу. В этих случаях мероприятия в сельском хозяйстве, направленные на ограничение поступления радионуклидов с пищевыми продуктами в организм человека, являются одними из основных в комплексе мер по обеспечению радиационной безопасности.

В формировании суммарной дозовой нагрузки радиации на население заметная роль принадлежит внутреннему облучению, т. е. облучению, обусловленному отложением в организме человека инкорпорированных радионуклидов, поступивших с сельскохозяйственной продукцией. Это послужило причиной широкого радиационного мониторинга сельскохозяйственной сферы, включающего оценку содержания ведущих радионуклидов в основных видах сельскохозяйственной продукции. В этой связи особое значение приобретают общая стратегия и принципы разработки систем ведения сельскохозяйственного производства на территориях, подвергших-

ся радиоактивному загрязнению после радиационных аварий с выбросом радионуклидов в окружающую среду.

Цель учебного пособия – познакомить студентов с основными положениями сельскохозяйственной радиологии. Материал, изложенный в учебном пособии, поможет студентам сформировать представление о круге проблем, возникающих между сферами сельскохозяйственного производства и ядерной наукой, техникой и энергетикой; о природе и воздействии ионизирующей радиации на биологические объекты АПК; об основах радиоэкологической экспертизы, мониторинге в сфере сельскохозяйственного производства.

Они узнают о действии радиоактивных веществ на растения и животных; методах предотвращения поступления и накопления радиоактивных веществ в живом организме; радиометрии и дозиметрии; принципах разработки систем ведения сельскохозяйственного производства в условиях радионуклидных загрязнений территории.

Дисциплина «Сельскохозяйственная радиология» в соответствии с требованиями ФГОС ВПО направлена на формирование следующих общекультурных (ОК) и профессиональных (ПК) компетенций бакалавра сельского хозяйства по профилю агроэкология;

- владение культурой мышления, способностью к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения (ОК-1);

- владение основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий радиационных аварий и катастроф (ПК-2);

- умение проводить оценку и группировку загрязнённых радионуклидами земель по их пригодности для сельскохозяйственных культур (ПК-11);

– умение составлять схемы севооборотов, системы обработки загрязнённой радионуклидами почвы, обосновать экологически безопасные технологии возделывания культур и провести контроль за качеством полученной продукции (ПК-13).

По окончании изучения дисциплины студент должен:

1. Иметь представление о круге проблем, возникающих между сферами сельскохозяйственного производства и ядерной наукой, техникой и энергетикой; о природе и воздействии ионизирующей радиации на биологические объекты АПК; об основах радиоэкологической экспертизы, мониторинге в сфере сельскохозяйственного производства.

2. Знать действие радиоактивных веществ на растения и животных; методы предотвращения поступления и накопления радиоактивных веществ в живом организме; радиометрию и дозиметрию; принципы разработки систем ведения сельскохозяйственного производства в условиях радионуклидных загрязнений территории.

3. Уметь определять наличие радионуклидов в почве, растениях, продукции; выбирать необходимые методы для обследования экологического состояния агроландшафтов; анализировать экологическое состояние агроландшафта по результатам радиологического обследования; оценить пригодность агроландшафта для соответствующего использования в сельскохозяйственном производстве; разрабатывать системы мероприятий по восстановлению загрязнённых радионуклидами земель.

1. ВВЕДЕНИЕ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННУЮ РАДИОЛОГИЮ

1.1. Общие задачи и содержание дисциплины

Сельскохозяйственная радиология – это наука, изучающая закономерности миграции радионуклидов по биологическим цепям в агропромышленной сфере и действие ионизирующих излучений как одного из ведущих экологических факторов в современной биосфере на сельскохозяйственные растения и животных, агроценозы. Эта научная дисциплина разрабатывает способы:

1. Ограничения вовлечения радионуклидов в биологический круговорот.

2. Снижения содержания радиоактивных веществ в растениях, животных и продукции растениеводства и животноводства.

Обосновывает:

1. Систему ведения агропромышленного производства, обеспечивающую минимальное радиационное воздействие на человека, а также на растения и животных.

2. Принципы функционирования АПК на территориях с повышенным содержанием радиоактивных веществ.

Почему же появилась эта наука? Вступление человечества в новый атомный век привело к возникновению острых и злободневных проблем. Одна из этих проблем – проблема радиационной безопасности всего человечества, которую в настоящее время следует расчленить на две: проблему радиационной безопасности в условиях испытания ядерного оружия и существующей угрозы ядерной войны и проблему радиационной безопасности,

связанную с развитием мирного использования атомной энергии.

Испытания ядерного оружия привели к локальному и глобальному загрязнению биосферы радиоактивными веществами. При ослаблении факторов, сдерживающих гонку вооружений, уровень радиоактивных загрязнений может превзойти допустимый, и потенциальная опасность радиоактивного загрязнения превратится в реальную угрозу.

При мирном использовании атомной техники в окружающую среду также попадает некоторое количество радиоактивных нуклидов, несмотря на принимаемые меры по обеспечению радиационной безопасности. Атомные энергетические установки, атомная промышленность, многочисленные лаборатории сбрасывают в окружающую среду радиоактивные отходы производства в допустимых концентрациях. Не исключена вероятность аварийных ситуаций, при которых в окружающую среду могут быть выброшены значительные количества радиоактивных веществ.

Ёмкость биосферы – величина постоянная. Даже если происходит сбрасывание радиоактивных отходов атомной промышленности в допустимых концентрациях, может произойти и локальное, и глобальное накопление радиоактивных загрязнений в биосфере, главным образом за счёт долгоживущих радионуклидов. Сейчас пока трудно выяснить, какой вклад в общее загрязнение биосферы вносят оба источника – испытание ядерного оружия и использование атомной энергии в мирных целях, но даже в том случае, если полностью прекратятся испытания ядерного оружия и угроза ядерной войны будет ликвидирована, мирные отрасли атомной техники будут продолжать развиваться, и, следовательно, в окружа-

ющую среду будут попадать радиоактивные вещества. Таким образом, радиоактивное загрязнение окружающей среды – неизбежный фактор атомного века. Этот процесс неизбежен так же, как неизбежно загрязнение окружающей среды отходами современной промышленности и цивилизации. Единственное, что можно и нужно делать – это контролировать уровень радиоактивных загрязнений и принимать меры к ограничению радиоактивного загрязнения внешней среды и к предотвращению попадания радиоактивных веществ в продукты питания. Главная задача сейчас – добиться полного запрещения испытаний ядерного оружия, его уничтожения и ликвидации угрозы ядерной войны. В отношении мирных отраслей атомной техники нужно принимать такие меры радиационной безопасности, которые бы сводили к минимуму выбросы радиоактивных отходов производства.

Всё это вызвало необходимость создания во многих странах специальной службы радиационной безопасности. Она подразделяется на ряд сфер действия. *Геофизическая радиология* занимается контролем уровней радиоактивного загрязнения атмосферы, океанов, морей, рек, озёр и суши, а также контролирует уровень космического излучения. *Медицинская радиология* контролирует уровень радиоактивного загрязнения среды в населённых пунктах. *Сельскохозяйственная радиология* занимается контролем уровня радиоактивного загрязнения почв, растений, сельскохозяйственной продукции, а также разрабатывает мероприятия по уменьшению радиоактивных загрязнений сельскохозяйственной продукции. Служба сельскохозяйственной радиологии состоит из сети радиологических станций, каждая из которых обслуживает определённую сельскохозяйственную зону. В отличие от геофизической и медицинской служб, сельскохозяйственные радиологические станции осуществляют кон-

троль почв, находящихся только в сельскохозяйственном использовании. Радиологическому контролю подлежат также продукты растениеводства (включая зелёные корма), животноводства.

1.2. Естественный радиационный фон

Чтобы определить радиационную опасность радиоактивных загрязнений, необходимо иметь сведения об уровне *естественного* радиационного фона. Под *естественным радиационным фоном* понимается совокупность космического излучения и излучения рассеянных в природе естественных радиоактивных нуклидов.

Космическое излучение состоит из протонов (79%), α -частиц (20%), ядер C, N, O (0,7%), а также ядер элементов с атомным номером более 10 (около 0,22%). Энергия частиц первичного космического излучения достигает 10^{20} электрон-вольт (эВ). При взаимодействии первичного космического излучения с ядрами атомов в атмосфере образуются γ -фотоны, электроны, мезоны и нейтроны. Космическое излучение на уровне моря состоит примерно на 80% из мезонов и на 20% из электронов. Только 0,05% первичных протонов достигают уровня моря. Уровень космического излучения зависит от широты (широтный эффект). На широте 60° он на 15% выше, чем на экваторе. Для средних широт мощность дозы космического излучения составляет примерно 50 мбэр/год. Мощность дозы космического излучения зависит также от высоты относительно уровня моря. На высоте 300 м мощность дозы примерно в 6 раз больше, чем на уровне моря. Для конкретно взятого географического места средняя мощность дозы космического излучения может считаться величиной постоянной.

Естественные радионуклиды. К группе радиоактивных нуклидов, рассеянных в природе, относятся ^3H , ^7Be , ^{10}B и ^{14}C , а также другие, образующиеся в процессе естественных ядерных реакций. Влияние каждого радиоактивного нуклида зависит от его распространённости и концентрации в биосфере. Содержание естественных радиоактивных нуклидов в почвах зависит от их концентрации в породах, на которых сформировалась почва. Здесь в основном играют роль ^{226}Ra , ^{238}U , ^{239}Th , ^{40}K , ^{87}Rb . Растения и животные находятся в контакте с воздушной средой, поэтому необходимо учитывать уровень радионуклидов естественного происхождения в воздухе. В составе атмосферы содержатся главным образом летучие продукты радиоактивных семейств – изотопы радона и продукты его распада, которые могут захватываться атмосферной пылью. Концентрация радона колеблется в атмосфере от 10^{-12} до 10^{-14} Ки/л.

Распределение естественных источников ионизирующих излучений в биосфере неравномерно, но причины этого полностью ещё не выявлены. Известно, что в различных местах земного шара и у нас в стране есть районы с повышенной концентрацией естественных радионуклидов. Это районы, где имеются залежи урановых или ториевых руд. Сельскохозяйственная продукция в этих районах содержит повышенные концентрации урана, тория, радия и других нуклидов естественно-радиоактивных семейств. В одном из районов Бразилии вулканические породы, содержащие радиоактивные минералы, создают мощность дозы излучения 12 рад/год. В Индии в некоторых районах, где обнаружены пески, содержащие повышенные концентрации тория, люди подвергаются облучению в 0,2–2,6 рад/год. В обычных условиях организм человека подвергается облучению от естественных источников в следующих дозах (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Дозы облучения человека (костный мозг) от естественных источников радиации

Источник облучения	Мощность дозы, мбэр/год
Внешнее облучение	
космическое излучение	50
излучение от нуклидов, содержащихся в породе или почве и воздухе	50
Внутреннее облучение	
^{40}K	15
^{226}Ra и продукты распада	0,6
^{228}Ra и продукты распада	1,0
^{210}Pb и продукты распада	0,4
^{14}C	1,6
^{222}Rn , поглощённый кровотоком	3,0

1.3. Основные источники радиоактивного загрязнения природной среды

В настоящее время известны следующие источники радиоактивного загрязнения внешней среды:

- 1) урановая промышленность, занимающаяся добычей, переработкой, обогащением урана и приготовлением ядерного горючего;
- 2) ядерные реакторы различных типов;
- 3) радиохимическая промышленность;
- 4) места захоронения радиоактивных отходов;
- 5) использование радиоактивных изотопов в народном хозяйстве;
- 6) испытания ядерного оружия.

1. *Урановая промышленность.* Ядерным горючим является ^{235}U , в природном уране его содержится 0,7%. Технология производства урана: добыча урана открытым

или закрытым способом, гидрометаллургический процесс концентрирования урана, очистка урана, обогащение изотопом ^{235}U , производство ТВЭлов. На каждом из этих этапов возможно загрязнение окружающей среды естественными радионуклидами. Жидкие отходы гидрометаллургических урановых заводов, содержащие радиоактивные вещества, могут попасть в ближайшие реки, воду которых используют для орошения или других ирригационных целей. Это приводит к загрязнению орошаемых полей радионуклидами семейства урана-238, в том числе радием-226. На заводах рафинирования урана также возникает опасность загрязнения урановой пылью. На обогатительных заводах возможна утечка фторида урана UF_6 при перегонках через каскады газодиффузных ячеек. При производстве, перевозках и хранении ТВЭлов могут возникать аварийные ситуации, при которых может быть выброшено значительное количество обогащенного урана (такие аварии были). Стружки, опилки урана, а также некоторые урановые сплавы являются пирофорами – самовоспламеняющимися веществами.

2. Ядерные реакторы. Несмотря на все меры предосторожности при эксплуатации ядерных реакторов всё же может происходить небольшая утечка воды (через вентили, фланцы, насосы), охлаждающей реактор и несущей радионуклиды. Кроме того, некоторое количество радиоактивных отходов образуется при дезактивации оборудования, спецодежды и т. п. При сравнении радиационной опасности атомных и тепловых электростанций оказывается, что атомные электростанции представляют меньшую опасность. Главная опасность ядерных реакторов (с точки зрения радиационной опасности) состоит в потенциальной вероятности аварийных ситуаций. При мелких неисправностях резко возрастает количество ра-

диоактивных отходов. Разрушение реактора можно сравнить со взрывом атомной бомбы.

3. *Радиохимическая промышленность* – регенерация отработанного ядерного горючего. Отработанные ТВЭЛы поступают на предприятия регенерации ядерного горючего, где производят выделение урана, плутония, а также продуктов деления урана, которые в дальнейшем могут быть использованы в качестве источников излучения, радиоактивных индикаторов и т. п. Несмотря на соблюдение всех правил радиационной безопасности, предприятия регенерации ядерного горючего являются источником радиоактивных загрязнений внешней среды. Они систематически сбрасывают радиоактивные сточные воды, хотя уровень содержания радионуклидов – в пределах допустимых концентраций. В результате в окружающей местности неизбежно накапливаются радиоактивные изотопы. Некоторое количество йода-131 выходит с газами и попадает в атмосферу. Йод-131 является основным изотопом, загрязняющим местность вокруг предприятия регенерации ядерного горючего.

4. *Места захоронения радиоактивных отходов.* В те годы, когда проблема только возникала, радиоактивные отходы, в том числе и высокоактивные жидкие и твёрдые, захоранивали непосредственно в грунт на разную глубину, откуда они могли (и сейчас могут) попасть в окружающую среду. Основным источником высокоактивных отходов являются предприятия по переработке ядерного горючего. Эти отходы хоронят в специальных местах, в условиях, обеспечивающих полную радиационную безопасность. Среднеактивные отходы захоранивают в централизованных могильниках. В ряде стран радиоактивные отходы помещают в ёмкости и сбрасывают в океан. В результате коррозии ёмкости радионукли-

ды могут попасть в морскую воду. Малоактивные жидкие отходы часто вообще сливают в океан, это приводит к загрязнению морской фауны и флоры.

5. *Использование радиоактивных нуклидов в мирных целях.* Радиоактивные нуклиды в качестве закрытых источников ионизирующих излучений широко используют в промышленности, медицине, сельском хозяйстве. Если их не выбрасывать на свалку и не разрушать, то они вполне безопасны. Но их применение в космонавтике и авиации в случае аварий и разрушения может служить сильным источником загрязнения окружающей среды. Однако наибольшее загрязнение среды происходит от сети радиоизотопных лабораторий, занимающихся использованием радиоактивных изотопов в открытом виде для научных и производственных целей. Сбросы радиоактивных отходов в сточные воды (даже при концентрациях меньше допустимых уровней) с течением времени будут приводить к постоянному накоплению радиоактивных нуклидов в биосфере. Можно отметить ещё и неосторожность в работе, аварии, случаи потерь ампул с изотопами.

6. *Испытания ядерного оружия.* При взрыве мегатонной бомбы с урановым запалом образуется более 200 изотопов 35 элементов. Большинство из них имеют малый период полураспада, но почти каждый является родоначальником цепочки распада. Например:



33 с – 2,7 мин – 28 лет – 65 с – стабильный

Видно, что в течение времени происходит накопление долгоживущих элементов (например, ^{90}Sr). Через год после взрыва основными радионуклидами являются (на месте взрыва) ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{91}Y , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{104}Ru , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{144}Pr , ^{147}Pm ; через 10 лет – ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{137}Cs , ^{147}Pm ; через

100 лет – ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{137}Cs . Таким образом, наибольшую радиационную опасность представляют ^{90}Sr и ^{137}Cs , которые легко усваиваются растениями, животными, людьми.

Кроме продуктов деления ядер, при взрыве в окружающей среде образуется большое количество наведённых радионуклидов. В воздухе образуются тритий (период полураспада – 12,3 года), углерод-14 (период полураспада – 5 600 лет), аргон-39 (период полураспада – 260 лет). В почве образуются следующие нуклиды: натрий-24 (период полураспада – 15 ч), фосфор-32 (период полураспада – 14 дней), калий-42 (период полураспада – 12 ч), кальций-45 (период полураспада – 152 дня), молибден-56 (период полураспада – 2,6 ч), железо-55 (период полураспада – 2,9 ч), железо-59 (период полураспада – 46 дней).

Считается, что среди множества нуклидов, образующихся при взрыве бомб, основную радиационную опасность создают 6 нуклидов: плутоний-239 (период полураспада – $2,4 \cdot 10^4$ лет), стронций-90 (период полураспада – 28 лет), стронций-89 (период полураспада – 51 день), цезий-137 (период полураспада – 27 лет), йод-131 (период полураспада – 8 дней), углерод-14 (период полураспада – 5 600 лет).

Кроме локального загрязнения местности вблизи места взрыва ядерного оружия существует проблема *глобального выпадения* радиоактивных осадков после испытания мегатонных ядерных бомб. Температура в эпицентре взрыва (около 10^7 °C) превращает в пар значительную массу твёрдых веществ и материалов. При остывании радиоактивного газа происходит его конденсация с образованием частиц разной дисперсности, которые затем выпадают на землю. Частицы более 0,1 мм выпадают вблизи ядерного взрыва в течение 24 ч – *это местные осадки*. Частицы меньше 10–100 мкм попадают в тропо-

сферу (на высоту 11–16 км), подхватываются воздушными течениями и выпадают с дождём и туманом в течение 20–30 дней. Осадки этого типа – *тропосферные*. Частицы размером менее 10 мкм попадают в стратосферу. Процесс их выпадения затягивается на многие годы. Осадки, выпадающие на землю из стратосферы, называют *глобальными*. Установлено, что *глобальные осадки* от взрывов, произведённых до 1958 г., продолжают выпадать до сих пор, хотя скорость их выпадения значительно снизилась. Радиоактивные продукты, распределяясь в стратосфере, выпадают на поверхность всего земного шара. Состав глобальных осадков зависит от времени, прошедшего после взрыва. От взрывов, произведённых до 1967 г., продолжают выпадать ^{90}Sr , ^{137}Cs . Они выпадают в водорастворимой форме и поэтому наиболее опасны. После прекращения наземных испытаний ядерного оружия скорость выпадения радиоактивных глобальных осадков неуклонно уменьшается.

Установлено, что поверхностная плотность ^{137}Cs на территории России практически не зависит от почвенно-климатических зон. Отчётливо прослеживается широтная зависимость распределения этого нуклида. Максимальная поверхностная плотность загрязнения ^{137}Cs наблюдается в широтном поясе 50–60° северной широты. Независимо от широты уровень загрязнения увеличивается по мере приближения к горным системам (к Уральским и Крымским горам, Кавказскому хребту и др.). Наблюдается зависимость глобального распределения ^{137}Cs от количества атмосферных осадков. Статистический анализ показал, что запас ^{137}Cs связан с запасом ^{90}Sr соотношением $q_{\text{Sr}} = 0,54 q_{\text{Cs}}$. В среднем вклад мощности дозы гамма-излучения от ^{137}Cs в общую дозу от всех учитываемых источников облучения (естественная радиоак-

тивность почвы, горных пород, космическое излучение, атмосферный радон) на территории России составляет около 5 %. Проведенные оценки показывают, что запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве слабо изменяются с течением времени и останутся примерно такими же в ближайшие годы.

Тестовые задания

1. Какая из служб радиационной безопасности занимается контролем уровней радиоактивного загрязнения атмосферы, рек, озёр:

- а) геофизическая радиология;
- б) медицинская радиология;
- в) сельскохозяйственная радиология.

2. Какая из служб радиационной безопасности занимается контролем уровней радиоактивного загрязнения пахотных почв, зерна, мяса:

- а) геофизическая радиология;
- б) медицинская радиология;
- в) сельскохозяйственная радиология.

3. Что относится к источникам естественного радиационного фона:

- а) ядерные реакторы;
- б) космическое излучение;
- в) урановая промышленность.

4. От чего зависит уровень космического излучения:

- а) от географической широты;
- б) от географической долготы;
- в) от высоты над поверхностью земли.

5. Что относится к естественным радионуклидам:

- а) стронций-90;
- б) уран-238;
- в) цезий-137;
- г) углерод-14.

6. Как называются радиоактивные осадки, выпадающие на землю из атмосферы после ядерного взрыва в течение длительного времени:

- а) местные;
- б) тропосферные;
- в) глобальные.

7. Как называются радиоактивные осадки, выпадающие на землю из атмосферы после ядерного взрыва в течение суток:

- а) местные;
- б) тропосферные;
- в) глобальные.

8. Как называются радиоактивные осадки, выпадающие на землю из атмосферы после ядерного взрыва в течение месяца:

- а) местные;
- б) тропосферные;
- в) глобальные.

2. ФИЗИКА ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

2.1. Строение атома и атомного ядра

Атом – это мельчайшая частица химического элемента (вещества), сохраняющая все его свойства. В среднем размер целого атома принимается равным 10^{-8} см. Атом состоит из положительно заряженного ядра (размером 10^{-13} см) и отрицательно заряженных электронов, вращающихся вокруг ядра на различных орбитах. Отрицательный заряд электронов равен положительному заряду ядра, и атом в целом электрически нейтрален. Любой атом состоит из 3 видов элементарных частиц: протонов, нейтронов и электронов. Массу ядер и элементарных частиц выражают в *атомных единицах массы* (а.е.м.). За атомную единицу массы принята $1/12$ массы атома углерода ^{12}C . Одна атомная единица массы равняется $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг. Энергию в ядерной физике выражают в *электрон-вольтах* (эВ), 1эВ равен кинетической энергии, которую приобретает электрон (или любая частица вещества, имеющая заряд) при прохождении электрического поля с разностью потенциалов в 1 вольт. Обычно используют мегаэлектрон-вольт (МэВ), равный 10^6 эВ. Энергетический эквивалент 1 а.е.м. равен 913,14 МэВ (или $14,48 \cdot 10^{-4}$ эрг, 1 эрг равен 10^{-7} Дж).

Электрон – устойчивая элементарная частица с массой покоя 0,000548 а.е.м., энергетический эквивалент которой равен 0,511 МэВ. Электрон имеет элементарный заряд электричества, равный $-1,602 \cdot 10^{-19}$ кулона (Кл). Электроны удерживаются в области атома электромагнитными силами притяжения положительного ядра. Число электронов в атоме *равно числу протонов* в ядре.

Электроны могут двигаться в атоме по орбитам вполне определённого радиуса. Орбиты группируются в электронные слои, окружающие ядро, создавая его оболочку. Таких слоёв максимум может быть 7. Электронные слои обозначают буквами K, L, M, N, O, P, Q – это соответствует 7 периодам в периодической системе элементов. Наибольшее число электронов, которое может находиться в одном слое, определяется квантовым соотношением $m = 2n^2$, где n – номер слоя ($n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$). Чем ближе к ядру вращается электрон, тем больше его энергия связи с ядром, а кинетическая энергия (энергия вращения) меньше. Поэтому электроны с внешней орбиты, где их энергия связи не превышает 1–2 эВ, сорвать легче, и они на внешних орбитах легче взаимодействуют с окружающей средой, обуславливая свойства вещества (электропроводность, валентность и т. п.). Перескок отдельного электрона с орбиты на орбиту всегда связан с поглощением или высвобождением энергии. Однако орбиты имеют определённые диаметры, поэтому изменения энергии при перескоках не могут иметь любое значение, а совершаются ступенчато, определёнными порциями.

Атомное ядро – это положительно заряженная центральная часть атома, в которой находится основная его масса (99,95–99,98 %). Размер атомного ядра ничтожно мал (10^{-13} – 10^{-12} см) по сравнению с размером атома (10^{-8} см). Плотность атомного ядра составляет $2 \cdot 10^{14}$ г/см³, или 200 млн т в 1 см³.

Протон – элементарная частица любого атомного ядра. Масса покоя $1,6724 \cdot 10^{-27}$ кг, или 1,007825 а.е.м. Протон имеет положительный заряд, равный заряду электрона (т.е. равный элементарному заряду $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл). Символ протона – латинская буква P (от греческого «protos» – первый). Число протонов в ядре (Z) для каждого элемента

строго постоянно и соответствует порядковому номеру в таблице Менделеева. Поэтому порядковый или атомный номер элемента отражает число протонов в ядре. Число электронов в атоме определяется числом протонов в ядре, а не наоборот, и химические свойства элементов определяются в конечном счёте числом протонов.

Нейтрон – другой вид ядерных частиц. Его нет лишь в водороде. Масса покоя его чуть больше, чем у протона, и составляет $1,6748 \cdot 10^{-27}$ кг, или 1,009665 а.е.м. В отличие от протона нейтрон не несёт заряда, он электрически нейтрален (по латыни «neutrum» – ни то ни другое). Символ нейтрона – латинская буква n. В атомном ядре нейтроны стабильные, а в свободном состоянии они неустойчивы. Число нейтронов в ядрах атомов одного и того же элемента может колебаться, поэтому число нейтронов в ядре (N) не характеризует элемент. Общее название протонов и нейтронов – нуклоны (от латинского «nucleus» – ядро). Нуклоны в ядре удерживаются ядерными силами притяжения, которые в 100 раз сильнее электромагнитных сил, но действуют только на очень близком расстоянии (10^{-13} см). При незначительном увеличении расстояния ядерные силы уменьшаются до нуля, и кулоновские силы разъединяют протоны. Ядерные силы составляют потенциальную энергию связи ядра, которая может высвобождаться. Масса атома (A) равна сумме протонов и нейтронов, выраженных в атомных единицах массы, т. е. $A = N_p + N_n$, или $A = Z + N_n$, откуда $N_n = A - Z$. Значит, число нейтронов в ядре равно разности между массовым числом и атомным номером элемента. Атомные ядра химических элементов принято обозначать как AX , например ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$.

2.2. Изотопы

Ядра атомов, принадлежащих одному и тому же химическому элементу, всегда имеют одинаковое количество протонов, но могут содержать *разное число* нейтронов. Эти атомы имеют одинаковые химические свойства, но различаются по массе. Такие атомы одного элемента, обладающие различной массой, называются *изотопами*. Ядра этих атомов имеют одинаковый заряд. В периодической системе изотопы одного элемента помещаются в одной и той же клетке. Термин «изотоп» означает «занимающий то же место». Большинство химических элементов в природе представляют смесь от 2 до 10 изотопов, причём в смеси изотопов преобладает один. Например, ^{16}O и ^{18}O . Доля ^{16}O в смеси составляет 99,7%, доля ^{18}O – 0,2% (0,1% – другие изотопы O_2). Азот имеет изотоп ^{14}N , доля которого равна 99,6%, и изотоп ^{15}N – 0,4%. У калия ^{39}K – 93,08%, ^{40}K – 0,0119% и ^{41}K – 6,91%. Атомы разных элементов могут иметь одинаковое массовое число. Например, ^{32}P и ^{32}S . Такие атомы называют *изобарами*.

Различают *стабильные изотопы* (изотопы, ядра которых устойчивы и в обычных условиях неизменяемы) и *радиоактивные изотопы* (изотопы, ядра которых распадаются, образуя при этом ядра атомов других элементов). В ядрах лёгких элементов число протонов примерно равно числу нейтронов, а в тяжёлых ядрах протонов примерно 40%, а нейтронов около 60%, поэтому лёгкие элементы в начале таблицы Менделеева наиболее устойчивы, а в конце таблицы у тяжёлых элементов ядерные силы не обеспечивают устойчивость ядра. Такие ядра могут самопроизвольно распадаться, превращаясь в ядра более лёгких элементов, это явление называется *естественной радиоактивностью*. Оно было открыто в 1896 г. фран-

цузским физиком Анри Беккерелем. Он обнаружил, что содержащие уран вещества испускают невидимые лучи, которые вызывают потемнение фотопластин, проникают через бумагу, дерево и другие плотные среды. Несколько позже супруги Кюри установили, что такие лучи испускают торий и полоний. Затем ими был открыт и выделен в чистом виде радий, который по интенсивности излучения в миллионы раз сильнее урана. Способность некоторых элементов испускать лучи (открытые Беккерелем) супруги Кюри назвали *радиоактивностью*, а вещества, обладающие этой способностью – *радиоактивными веществами* (от латинского слова «radio» – испускаю лучи). В настоящее время излучение, возникающее при радиоактивном распаде, называют *ионизирующим*, или *ядерным, излучением*. Более точное название – *ядерное излучение*, так как способностью производить ионизацию в окружающей среде обладают рентгеновское излучение и отчасти – ультрафиолетовые лучи.

Существует два вида ядерных превращений: радиоактивный распад и ядерные реакции. *Радиоактивный распад* естественных и искусственных изотопов совершается самопроизвольно, без какого либо вмешательства извне. Он не может быть ускорен или прекращён химическими реакциями или действием различного вида физической энергии (механической, электрической, тепловой), применяемых в обычных пределах. Радиоактивный распад сопровождается изменением заряда исходного ядра и обычно выделением энергии. Образующееся дочернее ядро имеет другие физические и химические свойства.

При радиоактивном распаде из ядра в окружающую среду вылетают элементарные частицы или лёгкое ядро, а часто, кроме того, и квант электромагнитного излуче-

ния, уносящий с собой определённое количество энергии. В атом же при распаде из внешней среды ничего не входит. Следовательно, радиоактивный распад внешне проявляется радиоактивным излучением – *корпускулярным* и *электромагнитным*.

Корпускулярное излучение – это поток заряженных частиц (электронов, позитронов или ядер гелия), обладающих массой покоя, различной скоростью, убывающей по мере пробега, и электрическим зарядом.

Электромагнитное излучение состоит из потока квантов (фотонов), имеющих волновую природу. Кванты не имеют электрического заряда и массы покоя, обладают только постоянной скоростью в вакууме и характеризуются длиной волны и частотой колебаний.

Промежуток времени, в течение которого распадается половина начального числа атомов радиоактивного вещества, называется *периодом полураспада*.

2.3. Взаимодействие радиоактивных излучений с веществом

При прохождении радиоактивного излучения через вещество происходит его взаимодействие с атомами и молекулами вещества с образованием *ионов* и *возбуждённых* атомов и молекул. Это взаимодействие становится возможным, потому что частицы и кванты вылетают из материнского ядра с некоторым запасом кинетической энергии. При пробеге в веществе эта энергия расходуется на ионизацию и возбуждение встречных атомов. Ионизация происходит в том случае, когда кинетическая энергия облучающей частицы больше энергии связи орбитальных электронов с ядром. В этом случае электрон может быть сорван с оболочки облучаемого атома

и электрически нейтральный атом (или молекула) временно превращается в ион, несущий положительный заряд. Электрон, сорванный с оболочки атома, присоединяется к нейтральному атому или молекуле, образуя отрицательный ион. Таким образом, в результате ионизации возникают 2 иона с противоположными знаками. Прохождение ионизирующей частицы через некоторые встречные атомы сопровождается не выбиванием из них электронов, а лишь смещением отдельных электронов на более высокий энергетический уровень, это приводит атом в возбуждённое состояние. Атомы и молекулы называют возбуждёнными в том случае, если при столкновении с ионизирующей частицей они приобретают избыточную энергию в результате перемещения электронов на оболочках атомов. Энергию, затраченную на переход электрона с ближайшей к ядру орбиты на более дальнюю орбиту, называют *энергией возбуждения*. Хотя на возбуждение атома расходуется меньше энергии, чем на ионизацию, но обычно каждый акт ионизации сопровождается возбуждением 2–3 других атомов. Количество кинетической энергии, которое расходуется ионизирующей частицей на образование каждой пары ионов и сопутствующее возбуждение атомов, называется *средней работой ионизации*. (В воздухе она равна примерно 33–34 эВ).

Длина пути частицы в веществе, с которым она взаимодействует, называется *пробегом*. Пробег частицы равен минимальной толщине поглотителя, полностью затормаживающей, т. е. поглощающей эту частицу. Пробег частицы зависит от массы среды, т. е. её объёма и плотности. Условно принято называть излучение, которое сопровождается длинным пробегом, – *жёстким*, а излучение короткого пробега – *мягким*. Акт ионизации продолжается очень короткое время (10^{-8} с), после это-

го положительный ион, присоединив к себе любой свободный электрон, рекомбинирует, т. е. восстанавливается в нейтральный атом или молекулу. Превращение атома в нейтральный сопровождается перегруппировкой орбитальных электронов. Энергия, поглощённая веществом при ионизации атома, превращается в тепловую энергию. В некоторых случаях энергия высвобождается, высвечивается с гамма-лучами, рентгеновскими, ультрафиолетовыми и даже с лучами видимого света. При высвобождении энергии в виде лучей видимого света возникает люминесценция. Таким же путём избыток энергии отдаётся и возбуждёнными атомами. В сложных веществах (органических) восстановление ионизированных и возбуждённых атомов в нейтральные приводит к различным химическим превращениям, которые, в свою очередь, могут изменить физические (биологические) свойства облучаемого объекта.

Радиоактивное излучение по своему составу является сложным, оно состоит из трёх видов различных ядерных излучений: α -, β -, γ -лучи. Характер взаимодействия с веществом определяется видом частиц, их энергией. α -, β -, γ -частицы по-разному поглощаются веществом.

2.4. Альфа-распад

Альфа-лучи (или α -частицы) отклоняются электрическим и магнитным полем и представляют собой поток атомных ядер гелия ${}^4\text{He}$. Они состоят из 2 протонов и 2 нейтронов, т. е. имеют массовое число 4 и несут 2 положительных заряда электричества. Масса α -частиц (в абсолютном выражении равняется $6,664 \cdot 10^{-27}$ кг) превышает массу электрона в 7 350 раз. В процессе альфа-распада из радиоактивного ядра испускаются α -частицы, вслед-

ствие чего дочернее ядро имеет на 2 протона и 2 нейтрона меньше исходного. Значит, заряд ядра уменьшается на 2 единицы, а масса – на 4. Следовательно, вновь образовавшийся элемент смещается в таблице Менделеева на 2 номера влево с уменьшением на 4 массового числа. ${}^AX \rightarrow {}^4\text{He} + {}^{A-4}X$. Например, ${}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^{222}\text{Rn}$. Известны многоступенчатые акты α -распада: ${}^{234}\text{U} \rightarrow {}^{230}\text{Th} \rightarrow {}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}\text{Po} \rightarrow {}^{214}\text{Pb}$. Альфа-распаду подвержены ядра многих изотопов тяжёлых элементов. Возможность α -распада связана с тем, что масса (а значит и энергия покоя $E = mc^2$) α -радиоактивного ядра больше суммы масс (суммарной энергии покоя) α -частицы и образующегося после распада ядра. Избыток энергии материнского ядра освобождается в форме кинетической энергии α -частицы и дочернего ядра. Кинетическая энергия α -частиц находится в небольших пределах – 4–9 МэВ. Зато период полураспада α -радиоактивных элементов сильно варьирует – от 10^{-7} с до $2 \cdot 10^{17}$ лет. Кинетическая энергия α -частиц, испускаемых ядром, имеет строго определённое значение. Энергия распределяется между продуктами распада обратно пропорционально их массам. Если α -распад сопровождается γ -излучением, то часть энергии выносится γ -квантом. Ядра одних α -излучателей испускают α -частицы со строго определённой энергией. Это моноэнергетические излучатели. Испускаемые ими α -частицы имеют одинаковую длину пробега (${}^{238}\text{U}$ – 4,5 МэВ; ${}^{216}\text{Po}$ – 6,78 МэВ). Ядра других α -излучателей могут испускать частицы разных энергий. Это полиэнергетические излучатели с линейчатым энергетическим спектром. Так ${}^{235}\text{U}$ даёт α -частицы с энергией 4,58 МэВ – 10%; 4,4 МэВ – 86; 4,18 МэВ – 4%. Альфа-частицы с разной энергией имеют разную скорость полёта – от 14 000 до 20 000 км/с, что соответствует энергии от 4 до 9 МэВ. Благодаря большой

энергии α -частицы производят на своём пути большую ионизацию. Плотность ионизации (число пар ионов на единицу пути) у них очень высокая. Чем больше ионизирующая способность частицы, тем меньше её пробег. Плотность ионизации не остаётся одинаковой на всём пути α -частицы. Скорость её уменьшается по мере потери энергии, но количество пар ионов на единицу пути увеличивается.

Благодаря малой проникающей способности α -частицы не представляют большой опасности в случае внешнего облучения. Они могут быть задержаны листом бумаги, одеждой, слоем резины хирургических перчаток. Альфа-частицы полностью поглощаются слоем алюминия толщиной 0,06 мм. В то же время α -частицы становятся очень опасными при попадании внутрь организма из-за большой плотности производимой ими ионизации. Возникающие при этом повреждения в тканях малообратимы.

2.5. Бета-распад

Бета-лучи отклоняются электрическим и магнитным полем и представляют собой поток быстрых электронов, называемых β -частицами. Эти частицы бывают двух типов: отрицательные β -частицы, или электроны, которые образуются в ядре, и положительные β -частицы – позитроны. В процессе β -распада из радиоактивного ядра самопроизвольно испускается электрон (электронный β -распад) или позитрон (позитронный β -распад), которые возникают в самый момент распада (их нет в ядре). Третьим видом β -распада является захват ядром электрона из электронной оболочки своего атома (ϵ -захват). Во всех трёх случаях β -распад сопровождается испусканием ней-

трино или антинейтрино. В результате β -распада заряд ядра повышается на 1, а при β^+ -распаде и e -захвате понижается на 1. Массовое число ядра остаётся постоянным.

Электронный распад испытывают ядра с избытком нейтронов. При этом распаде один из внутриядерных нейтронов превращается в протон, а ядро испускает электрон (β^-) и антинейтрино ($\bar{\nu}$): $N \rightarrow P + \beta^- + \bar{\nu}$. Антинейтрино – нейтральная частица с ничтожно малой массой. Вновь образующееся ядро сохраняет массовое число исходного элемента, а заряд увеличивается на 1. Образуется элемент, стоящий в таблице Менделеева на одну клетку вправо от исходного: ${}^AX \rightarrow {}^AY + \beta^- + \bar{\nu}$. Например, ${}^{32}\text{P} \rightarrow {}^{32}\text{S} + \beta^- + \bar{\nu}$. При этом типе распада образуются изобары. Возможность β -распада определяется тем, что радиоактивное ядро имеет большую энергию покоя (массу), чем продукты β -распада. Избыток энергии покоя освобождается в форме кинетической энергии электрона (позитрона), энергии антинейтрино (нейтрино) и дочернего ядра. Распределение энергии между β -частицей и нейтрино совершается в различных соотношениях, поэтому β -частицы одного источника имеют непрерывный спектр энергии от нуля до определённой максимальной величины. Энергия β -частиц колеблется от десятых и сотых долей МэВ (мягкое излучение) до 2–3 МэВ (жёсткое β -излучение). Исключение составляет бор-12. При распаде он даёт β -частицы с энергией 13 МэВ. Среднее значение энергии β -частиц у разных излучателей примерно равно $\frac{1}{3}$ максимального значения. В прямой связи с различной энергией β -частиц находится и их проникающая способность, и длина пробега. Длина пробега β -частиц больше примерно в 100 раз, чем у α -частиц, а ионизирующая способность в 100 раз меньше. Пробег β -частицы зависит от её энергии, плотности поглотителя и обусловленной ими

величины линейной плотности ионизации. Для расчёта биологической защиты имеет значение определение толщины слоя поглотителя, который полностью поглощает β -частицы разных энергий. Толщину слоя поглотителя обычно выражают в единицах поверхностной плотности (г/см^2), это означает, сколько грамм вещества находится в столбике с основанием 1 см^2 и длиной, равной длине пробега. Плотность ионизации, создаваемая β -частицей, сравнительно невелика, поэтому β -частицы внутри организма менее опасны, чем α -частицы. Однако проникающая способность β -частиц больше, поэтому β -частицы с энергией более $0,07 \text{ МэВ}$ могут пробить эпидермис кожи. Для β -частиц высоких энергий (более $0,07 \text{ МэВ}$) необходима защита в виде алюминиевых или плексигласовых экранов толщиной несколько миллиметров.

Позитронный распад испытывают ядра с избытком протонов. Этому распаду подвержены лишь некоторые искусственные изотопы, у естественных изотопов этого распада не наблюдается. При позитронном распаде один из внутриядерных протонов превращается в нейтрон, а ядро испускает позитрон и нейтрино. $P \rightarrow n + \beta^+ + \nu$. Получившийся элемент сохраняет массовое число, а заряд ядра становится на единицу меньше, т. е. в периодической таблице он смещается на одну клетку влево: ${}^AX \rightarrow {}^AY + \beta^+ + \nu$. Например, ${}^{11}\text{C} \rightarrow {}^{11}\text{B} + \beta^+ + \nu$. Масса исходного протона меньше, чем масса нейтрона, поэтому испускание позитрона требует поглощения, а не выделения энергии. Эта энергия образуется при перестройке исходного ядра в конечное. Позитрон, вылетев из ядра, немедленно срывает с оболочки атома «лишний» электрон и пара «позитрон–электрон» превращается в γ -квант, после чего конечное ядро становится электрически уравновешенным.

Электронный захват. Радиоактивные изотопы извлекаются от избыточных протонов ещё и путём электронного захвата, когда в ядре недостаточно энергии

для позитронного распада. Ядро обычно захватывает электрон с ближайшего слоя (К-слоя, а иногда – L-слоя), и протон, соединившись с электроном, даёт нейтрон, при этом испускается нейтрино: $p + e^- \rightarrow n + \nu$. В этом случае получается элемент, как и в случае позитронного распада: ${}^AX \rightarrow {}^AY + \nu$. На освободившееся в К-слое место перескакивает электрон с L-слоя, на его место – с M-слоя и т. д. Каждый переход электрона связан с высвобождением энергии, которая высвечивается в виде квантов рентгеновского излучения.

2.6. Гамма-лучи

Гамма-лучи представляют собой поток γ -квантов, т. е. коротковолнового электромагнитного излучения, испускаемого возбуждёнными атомными ядрами. В процессе γ -излучения ядро самопроизвольно переходит из возбуждённого состояния в менее возбуждённое, или основное. При этом избыток энергии освобождается в виде γ -квантов. Они лишены заряда и поэтому не отклоняются электрическим и магнитным полем. Они распространяются прямолинейно и равномерно во все стороны от источника. Гамма-излучателями являются практически все дочерние ядра – продукты α - и β -распадов, так как они образуются не только в основном, но и в возбуждённом состоянии. Энергия γ -квантов после α -распада обычно не более 0,5 МэВ, а после β -распада достигает 2–2,5 МэВ. В среднем энергия γ -квантов различных излучателей колеблется от 0,01 МэВ (мягкие) до 3 МэВ (жёсткие). Иногда энергия γ -квантов достигает 10 МэВ. В большинстве случаев γ -источники испускают γ -кванты различной энергии, т. е. они редко бывают моноэнергетическими. Величины энергий γ -квантов для каждого источника постоянны и образуют линейчатый спектр излучения.

Например, при распаде $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + \gamma (1,17 \text{ МэВ}) + \gamma (1,33 \text{ МэВ})$.

При прохождении через среду γ -кванты испытывают три вида взаимодействия (все электромагнитные): *фотоэффект, эффект Комптона, процесс образования электронно-позитронных пар*. Вид взаимодействия γ -излучения с веществом определяется атомным номером облучаемого вещества и величиной энергии γ -квантов. Главным механизмом поглощения мягких γ -квантов в тяжёлых веществах является фотоэффект. Умеренное γ -излучение обычно вызывает комптоновский эффект, а жёсткое γ -излучение, как правило, – образование электронно-позитронных пар.

Фотоэлектрический эффект заключается в поглощении энергии γ -кванта орбитальным электроном. В основном фотоэффект идёт на К- и L-оболочках атома (при достаточной величине энергии γ -квантов), но преимущество имеет К-электронная оболочка. Этот вид взаимодействия γ -излучения с веществом наблюдается в случае, когда энергия γ -кванта не превышает 0,05 МэВ, а поглотителем служит тяжёлый элемент. В процессе фотоэффекта вся энергия кванта передаётся одному из электронов атома. При этом небольшая часть энергии затрачивается на отрыв электрона от атома, а остальная, большая часть, преобразуется в кинетическую энергию выбиваемого электрона (фотоэлектрона), который покидает оболочку атома и на своём пути ионизирует атомы и молекулы вещества. Образующиеся при фотоэффекте быстрые электроны вызывают сильную ионизацию в атомах поглощающего вещества.

Эффектом Комптона называется процесс рассеяния γ -кванта на свободном электроне. При этом процессе энергия излучения поглощается или рассеивается.

Эффект Комптона возникает, когда поглотитель имеет малую атомную массу, а γ -кванты – энергию, превышающую 0,05 МэВ. Такой γ -квант при столкновении с атомом выбивает с внешней оболочки атома свободный электрон, передаёт ему часть своей энергии, становится квантом с меньшей энергией и изменяет направление своего движения. Значит, энергия кванта распределяется между электроном отдачи и вторичным рассеянным квантом. При этом образовавшийся быстрый электрон ведёт себя как при фотоэффекте. Он способен производить новую ионизацию, а вторичный γ -квант вступает во взаимодействие с веществом путём того же комптоновского рассеяния или фотоэлектрического поглощения.

Образование электронно-позитронных пар происходит при энергии γ -квантов более 1,02 МэВ. При такой энергии γ -квант исчезает в области ядра атома с образованием электрона и позитрона. Вся энергия кванта ($h\nu$) полностью расходуется на образование $e^- + e^+$ и их кинетическую энергию. Позитрон, встретившись с любым свободным или орбитальным электроном, *аннигилирует* (масса покоя частицы и античастицы превращается в электромагнитное излучение), что приводит к образованию двух γ -квантов аннигиляции. Энергия массы покоя двух частиц ($e^- + e^+$) сообщается двум γ -квантам поровну. Вторичный γ -квант имеет энергию вдвое меньше, чем исходный γ -квант, но не менее 0,51 МэВ, так как энергетический эквивалент масс $e^- + e^+$ составляет 0,51 + 0,51 МэВ. Аннигиляционные γ -кванты поглощаются в веществе путём комптоновского или фотоэлектрического эффекта.

При всех трёх видах взаимодействия γ -лучей с веществом образуются *быстрые электроны*, которые, в конечном счёте и производят возбуждение и ионизацию атомов среды. Гамма-кванты с энергией, превышающей

несколько мегаэлектрон-вольт, могут выбивать протоны из стабильных ядер, т. е. вызывать ядерные реакции.

При взаимодействии с веществом α - и β -частицы расходуют свою энергию небольшими порциями, но многократно, это определяет большую плотность ионизации. Гамма-кванты сразу теряют значительную часть или же всю энергию (фотоэффект). Отсюда, плотность ионизации γ -квантов мала и составляет 0,6 пары ионов на 1 мм. Зато проникающая способность γ -лучей велика. Интенсивность γ -излучения при прохождении через вещество снижается в соответствии с формулой $I = I_0 e^{-kL}$, где I_0 – исходная интенсивность излучения; L – слой вещества толщиной L ; k – постоянная для данного вещества; e – основание натурального логарифма (2,72). Знание величины слоя полуослабления γ -лучей в различных веществах важно для расчёта биологической защиты. Ослабление γ -излучения в поглотителе зависит от энергии γ -кванта и массы, т. е. объёма, плотности и порядкового номера (Z) поглотителя. В силу большой проникающей способности γ -лучи представляют большую опасность для живых организмов.

2.7. Единицы измерения радиоактивности

Радиоактивные изотопы редко встречаются в химически чистом виде и не всегда могут быть точно взвешены. Часто приходится иметь дело с очень малыми количествами радиоактивных веществ, это затрудняет определение их точной массы. Поэтому мерой количества радиоактивных веществ обычно является не масса, а активность радиоизотопа. *Активностью* радиоактивного элемента называется число атомных распадов, совершающихся в этом элементе за одну секунду. Она характеризует абсолютную скорость

радиоактивного распада радионуклида. Активность радиоактивного элемента пропорциональна его количеству и обратно пропорциональна периоду полураспада. В международной системе СИ за единицу активности принято одно ядерное превращение в секунду (распад в секунду). Эта единица называется беккерель (Бк). Внесистемной единицей измерения активности является кюри (Ки). Кюри – активность такого количества радиоактивного вещества, в котором за 1с распадается $3,7 \cdot 10^{10}$ ядер ($3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду, или $2,22 \cdot 10^{12}$ распадов в минуту). Отсюда $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$. Такой активностью обладает 1 г радия. Вследствие того, что 1 Ки представляет очень большую активность, на практике часто применяют более мелкие единицы активности: милликюри (мКи) = $3,7 \cdot 10^7$ распадов в секунду (Бк) = 10^{-3} Ки; микрокюри (мкКи) = $3,7 \cdot 10^4$ распадов в секунду (Бк) = 10^{-6} Ки; нанокюри (нКи) = $3,7 \cdot 10$ распадов в секунду (Бк) = 10^{-9} Ки; пикокюри (пКи) = 0,037 распадов в секунду (Бк) = 10^{-12} Ки. Иногда применяется ещё одна единица активности – резерфорд (рд), $1 \text{ рд} = 10^6$ распадов в секунду = $1/37000 \text{ Ки}$.

Концентрацией радиоактивного изотопа в любой среде (жидкостях, газах, биологической ткани) называют количество распадов на единицу объёма или массы (удельная активность). Единицами концентрации радиоизотопа служат: Бк/кг; Бк/м³; Ки/кг; Ки/г; Ки/л; Ки/м³ и т. д. Активность вещества, отнесённая к единице поверхности, называется *поверхностной активностью*, или *плотностью заражения (загрязнения)*, и выражается: Бк/см²; Бк/м²; Ки/м²; Ки/км² и т. д.

2.8. Закон радиоактивного распада

В результате радиоактивного распада происходит непрерывное уменьшение количества атомов радиоактивного элемента. Скорость радиоактивного распада не зависит от количества радиоактивного вещества и воздействия внешней среды. Распад происходит под действием внутриядерных процессов. Он носит случайный характер, в том смысле, что нельзя предвидеть, когда и какой именно атом распадается, однако в каждую секунду распадается в среднем какая-то определённая доля атомов. Самопроизвольное превращение ядер происходит по *закону радиоактивного распада*, согласно которому скорость распада (т.е. число ядер, распадающихся за единицу времени) пропорциональна количеству нераспавшихся ядер в данный момент времени: $dN/dt = -\lambda N$; $dN = -\lambda N \cdot dt$, где λ – коэффициент пропорциональности, характеризующий относительную скорость распада, который называется *постоянной распада*, $\lambda = -dN/N \times dt$. Постоянная распада равна относительному уменьшению числа атомов в единицу времени. Чем медленнее идёт распад, тем меньше и постоянная распада. Каждый радиоактивный элемент имеет строго определённую константу λ . Таким образом, величина dN/dt характеризует абсолютную скорость данного распада и называется *активностью* данного элемента. Решение уравнения в пределах t от 0 до t приводит к выражению $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, где N – число атомов элемента в существующий момент времени t ; N_0 – число атомов в начальный момент времени; t – время от начала до настоящего момента, но выраженное в тех же единицах, что и период полураспада; e – основание натурального логарифма, равное 2,71828.

Уравнение описывает процесс убывания количества радиоактивного вещества со временем. Графически это выражается в виде кривой распада (рис. 2.1).

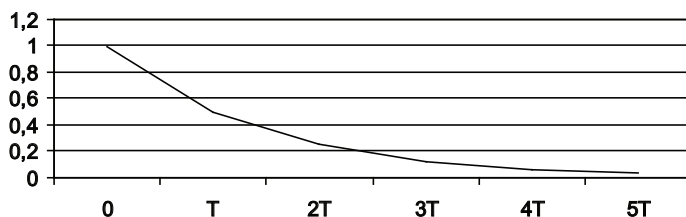


Рис. 2.1. Кривая убывания количества радиоактивного вещества:
по оси абсцисс – время в периодах полураспада,
по оси ординат – количество вещества в долях от 1

Для характеристики скорости распада используют понятие периода полураспада. *Периодом полураспада* T называется время, в течение которого количество атомов исходного элемента уменьшается вдвое. Различные радиоактивные элементы обладают разными T , от долей секунды до миллиардов лет. Чем меньше период полураспада, тем быстрее идёт распад, т. е. T обратно пропорционально скорости распада. Если взять время t , равное T , то число атомов элемента в существующий момент времени будет $N_t = N_0/2$. Отсюда $N_0/2 = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$. Далее, $1/2 = e^{-\lambda t}$, или $2 = e^{\lambda t}$. Получаем: $\ln 2 = \lambda t \cdot \ln e$. При $t = T$ получаем $0,693 = \lambda T$, так как $\ln e = 1$. Отсюда следует, что постоянная распада $\lambda = 0,693/T$, а $T = 0,693/\lambda$. Чем больше период полураспада, тем меньше постоянная распада.

Вековое радиоактивное равновесие. Если в результате распада образуется дочерний изотоп с периодом полураспада (T_2) значительно меньшим, чем у материнского изотопа (T_1) и T_1 очень велико, то спустя некоторое время устанавливается состояние равновесия. В состоянии равновесия скорость образования дочернего изотопа и скорость его распада будут равны, а активность материнского изотопа вследствие большого периода полурас-

пада практически окажется неизменной. В этом случае суммарная активность обоих изотопов – материнского и дочернего – станет величиной постоянной. Такое равновесие называется вековым. Если, наоборот, T_1 материнского изотопа значительно меньше T_2 дочернего изотопа, то общая активность вначале будет убывать не по закону радиоактивного распада, а медленнее, так как убывающая активность материнского изотопа будет компенсироваться нарастающей активностью дочернего. Через определённое время, когда материнский изотоп полностью распадётся и останется долгоживущий дочерний изотоп, активность препарата станет убывать по закону радиоактивного распада с периодом полураспада дочернего радиоизотопа.

Тестовые задания

1. Каков электрический заряд электрона:
 - а) положительный;
 - б) отрицательный;
 - в) нейтральный.

2. Чему равно число электронов в атоме:
 - а) числу протонов;
 - б) числу нейтронов;
 - в) числу протонов + нейтронов.

3. Каким может быть максимальное число электронных слоёв в атоме:
 - а) 5;
 - б) 7;
 - в) 10.

4. Каков электрический заряд атомного ядра:

- а) положительный;
- б) отрицательный;
- в) нейтральный.

5. Каков электрический заряд протона:

- а) положительный;
- б) отрицательный;
- в) нейтральный.

6. Чему соответствует порядковый номер элемента в таблице Менделеева:

- а) числу протонов в ядре;
- б) числу нейтронов в ядре;
- в) числу протонов + нейтронов в ядре.

7. Каков электрический заряд нейтрона:

- а) положительный;
- б) отрицательный;
- в) нейтральный.

8. Какие силы удерживают нуклоны в ядре атома:

- а) электромагнитные;
- б) гравитационные;
- в) ядерные.

9. Как называются атомы одного элемента, обладающие различной массой:

- а) изотопы;
- б) изобары;
- в) нуклоны.

10. Как называются атомы разных элементов, имеющих одинаковое массовое число:

- а) изотопы;
- б) изобары;
- в) нуклоны.

11. Кем было открыто явление естественной радиоактивности:

- а) Беккерелем;
- б) Кюри;
- в) Резерфордом.

12. Кто ввёл в научное обращение термин «радиоактивность»:

- а) Беккерель;
- б) Кюри;
- в) Резерфорд.

13. Как правильнее называть излучение, возникающее при радиоактивном распаде ядер:

- а) ионизирующее;
- б) ядерное;
- в) электромагнитное.

14. Как называется самопроизвольный распад ядер атомов:

- а) ядерная реакция;
- б) термоядерная реакция;
- в) радиоактивный распад.

15. Что составляет основу электромагнитного излучения:

- а) альфа-частицы;

- б) бета-частицы;
- в) гамма-лучи.

16. Что составляет основу корпускулярного излучения:

- а) альфа-частицы;
- б) бета-частицы;
- в) гамма-лучи;
- г) рентгеновские лучи.

17. Каков электрический заряд альфа-частиц:

- а) положительный;
- б) отрицательный;
- в) нейтральный.

18. Что представляют собой альфа-лучи:

- а) электроны;
- б) ядра гелия;
- в) фотоны.

19. Как изменяется заряд ядра атома при испускании альфа-частицы:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) остаётся неизменным.

20. На сколько единиц изменяется масса ядра атома при испускании альфа-частицы:

- а) уменьшается на 1 единицу;
- б) уменьшается на 2 единицы;
- в) уменьшается на 4 единицы.

21. Какова плотность ионизации альфа-частиц:

- а) высокая;

- б) низкая;
- в) средняя.

22. Какова проникающая способность альфа-частиц:

- а) высокая;
- б) средняя;
- в) низкая.

23. В каком случае излучатели альфа-частиц наиболее опасны для живых организмов:

- а) при нахождении во внешней среде;
- б) при нахождении на поверхности живого организма;
- в) при попадании внутрь живого организма.

24. Что представляют собой бета-лучи:

- а) электроны;
- б) ядра гелия;
- в) фотоны.

25. Как изменяется массовое число атома при бета-распаде:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) остаётся постоянным.

26. Как изменяется заряд ядра атома при электронном бета-распаде:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) остаётся постоянным.

27. Как изменяется заряд ядра атома при позитронном бета-распаде:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) остаётся постоянным.

28. Как изменяется заряд ядра атома при е-захвате:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) остаётся постоянным.

29. Какова ионизирующая способность бета-частиц по сравнению с альфа-частицами:

- а) больше;
- б) меньше;
- в) одинаковая.

30. Какова проникающая способность бета-частиц по сравнению с альфа-частицами:

- а) больше;
- б) меньше;
- в) одинаковая.

31. Какой вид излучения наблюдается при позитронном бета-распаде ядер атомов:

- а) электроны;
- б) позитроны;
- в) гамма кванты;
- г) рентгеновские лучи.

32. Какой вид излучения наблюдается при захвате электрона ядром атома (е-захват):

- а) электроны;

- б) позитроны;
- в) гамма-кванты;
- г) рентгеновские лучи.

33. Какой электрический заряд имеют гамма-лучи:

- а) положительный;
- б) отрицательный;
- в) нейтральный.

34. Какова проникающая способность гамма-лучей:

- а) высокая;
- б) средняя;
- в) низкая.

35. Какова ионизационная способность гамма-лучей:

- а) высокая;
- б) средняя;
- в) низкая.

36. Какой эффект наблюдается при взаимодействии мягкого гамма-излучения с веществом:

- а) фотоэффект;
- б) эффект Комптона;
- в) образование электронно-позитронных пар.

37. Какой эффект наблюдается при взаимодействии умеренного гамма-излучения с веществом:

- а) фотоэффект;
- б) эффект Комптона;
- в) образование электронно-позитронных пар.

38. Какой эффект наблюдается при взаимодействии жёсткого гамма-излучения с веществом:

- а) фотоэффект;
- б) эффект Комптона;
- в) образование электронно-позитронных пар.

39. Какой вид излучения представляет большую опасность для живых организмов при внешнем облучении:

- а) альфа-лучи;
- б) бета-лучи;
- в) гамма-лучи.

40. Что является мерой количества радиоактивного вещества:

- а) вес;
- б) масса;
- в) активность.

41. Как называется единица активности радиоактивного вещества, обозначающая один распад в секунду:

- а) резерфорд;
- б) беккерель;
- в) кюри.

42. Как называется единица активности радиоактивного вещества, обозначающая $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду:

- а) резерфорд;
- б) беккерель;
- в) кюри.

43. В каких единицах выражается концентрация радиоактивного изотопа в любой среде:

- а) Ки;

- б) Ки/кг (л);
- в) Ки/м².

44. В каких единицах выражается плотность заражения территории радиоактивными веществами:

- а) Ки;
- б) Ки/кг (л);
- в) Ки/м².

45. От чего зависит скорость радиоактивного распада вещества:

- а) от количества вещества;
- б) от воздействия внешней среды;
- в) от внутриядерных процессов.

46. Какова зависимость постоянной распада (λ) от периода полураспада (T) радиоактивного элемента:

- а) λ возрастает при возрастании T;
- б) λ уменьшается при возрастании T;
- в) λ не изменяется при возрастании T.

3. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

3.1. Естественные радиоактивные элементы

В природе обнаружено около 340 изотопов, причём 70 из них – радиоактивные. Это в основном изотопы тяжёлых металлов, все элементы, имеющие атомный номер больше 80, имеют радиоактивные изотопы. Изотопы элементов с атомным номером больше 82 в стабильном состоянии вообще неизвестны. Кроме естественно возникших радиоактивных излучателей земного происхождения имеются некоторые изотопы, образованные в процессе взаимодействия космических лучей с газами земной атмосферы и отдельными элементами земной коры. Наиболее важными из них являются ^{14}C и ^3H . Естественные радиоактивные изотопы, встречающиеся в природе, можно разбить на 3 группы.

К первой группе относятся три семейства последовательно превращающихся элементов: 1) ряд урана–радия; 2) ряд тория; 3) ряд актиния. Промежуточными продуктами распада этих семейств являются как твёрдые, так и газообразные изотопы. Наибольшее значение в этой группе имеют уран (^{238}U , ^{235}U), торий (^{232}Th), радий (^{226}Ra), радон (^{222}Rn , ^{220}Rn).

Во вторую группу входят изотопы химических элементов, не образующих семейства. К этой группе относятся: калий (^{40}K), кальций (^{48}Ca), рубидий (^{87}Rb), цирконий (^{96}Zr), лантан (^{138}La) и др. Основное значение из этой группы имеет калий. Он обуславливает наибольшую величину естественной радиоактивности.

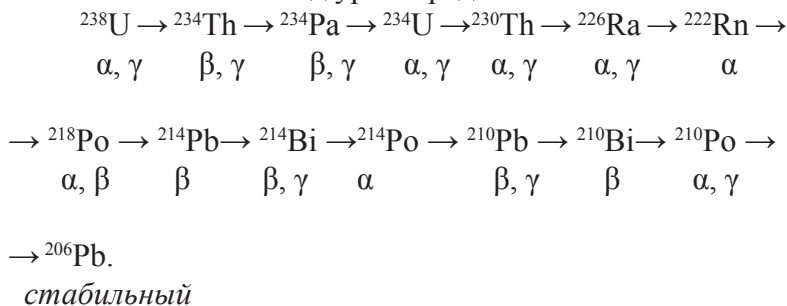
К третьей группе относятся так называемые космогенные радиоизотопы. Они образуются в стратосфере под действием космического излучения, захватываются

атмосферными осадками и в их составе выпадают на земную поверхность. К этой группе относятся тритий (^3H), бериллий (^7Be , ^{10}Be) и углерод (^{14}C).

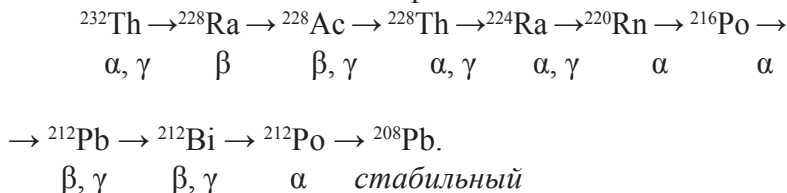
Естественные излучатели в основном являются долгоживущими изотопами с периодом полураспада 10^8 – 10^{16} лет. В процессе распада они испускают α - и β -частицы, а также γ -лучи. Обычно эти естественные радиоактивные изотопы находятся в очень рассеянном состоянии.

Три семейства радиоактивных изотопов: урана (родоначальник ^{238}U), тория (родоначальник ^{232}Th), актиния (родоначальник ^{235}U) – обуславливают радиоактивность, с которой связано облучение человека в естественных условиях.

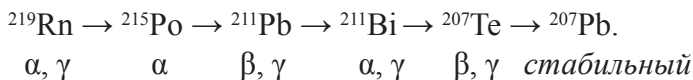
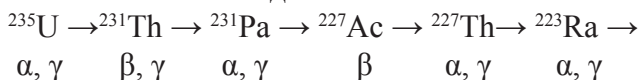
Ряд урана–радия:



Ряд тория:



Ряд актиния:



Радиоактивный распад урана и тория и их дочерних продуктов сопровождается испусканием α - и β -частиц или γ -излучения. Бета-распад во многих случаях связан с наличием интенсивного γ -излучения. Конечными продуктами радиоактивных превращений в этих семействах являются стабильные изотопы свинца.

Уран. Природный уран состоит из трех изотопов с атомной массой 234, 235 и 238. Содержание урана-238 ($T = 4,5 \cdot 10^9$ лет) в природной среде изотопов составляет 99,28%; урана-234 ($T = 2,5 \cdot 10^5$ лет) – 0,0058%; урана-235 ($T = 7,13 \cdot 10^8$ лет) – около 0,71%. Уран-235 – родоначальник семейства актиния и используется в ядерных реакциях. Уран входит в состав многих горных пород и почв. В гранитах количество урана иногда достигает $4 \cdot 10^{-4}\%$, т. е. 4 г/т. Он встречается в некоторых марках битуминозных сланцев, в асфальте и может быть обнаружен в нефти. Изотопы урана, являясь α -излучателями, не вносят вклада в фоновое γ -излучение, а из-за низкой концентрации они не вносят существенного вклада и в дозу внутреннего облучения человека. Известно, что уран содержится в почве и удобрениях, поэтому он входит в состав тканей человека. Уран служит материалом для изготовления эталонов, применяемых при радиометрии γ -излучения, потому что он обладает практически неизменной активностью. Уран используется как ядерное топливо для ядерных реакторов и как материал для получения плутония.

Радий. Изотопы радия: радий-228 ($T = 6,7$ года), радий-226 ($T = 1620$ лет), радий-224 ($T = 3,6$ суток). Наибольший интерес в качестве источника внутреннего облучения человека представляет радий-226 и его дочерние продукты распада. Сам радий не вносит заметного вклада в γ -активность окружающей среды, но продукты его распада (в воздухе) являются γ -излучателями. Радий-226 содержится во всех породах и почвах. Радий относится к щелочно-земельным элементам и его поведение в биологическом цикле круговорота веществ является сходным с поведением таких элементов, как кальций и стронций, однако есть и различия.

Торий (^{232}Th) и мезоторий (^{228}Ra). Среднее содержание тория в породах составляет $12 \cdot 10^{-6}$ г в 1 г породы. Содержание естественных радиоактивных элементов в океанической воде в основном зависит от выноса тория и урана с суши и осаждения их в море. Торий и радий лучше растворяются в воде, чем уран, и больше с осадками выносятся в море. Радиоактивные изотопы, встречающиеся в морской воде и донных отложениях, являются также составной частью планктона и различных растительных и животных организмов, населяющих морские глубины. Концентрация изотопов в морской воде составляет: $^{232}\text{Th} - 10^{-11}$ г/см³; $^{226}\text{Ra} - 3 \cdot 10^{-6}$ г/см³; $^{235}\text{U} - 1,5 \cdot 10^{-11}$ г/см³; $^{238}\text{U} - 2 \cdot 10^{-9}$ г/см³; $^{40}\text{K} - 4,5 \cdot 10^{-8}$ г/см³; $^{14}\text{C} - 4 \cdot 10^{-17}$ г/см³. Содержание урана, радия, тория в пресноводных источниках зависит от типа горных пород, рельефа местности, климатических факторов. Удельная активность тория является очень низкой, поэтому он малоинтересен при изучении радиоактивности среды. Большее значение имеют дочерние продукты распада.

Радон и торон (^{222}Rn и ^{220}Rn). Радон – газообразный продукт распада радия-226. За сутки из 1 г радия образу-

ется 1 мм³ радона, поэтому радон содержится в урановой руде, откуда он диффундирует в почву, частично растворяется в подземных водах и выносится ими на поверхность. Концентрация радона в почвенном воздухе в среднем достигает $2 \cdot 10^{-10}$ Ки/л. Средний фон радона в почвенном воздухе г. Новосибирска составляет 30 кБк/м³, но в Кировском районе (ул. Петухова) доходит до 60 кБк/м³, что соответствует 30 и 60 Бк/л при общей средней 7 Бк/л. Природная радиоактивность приземного воздуха в основном обусловлена радоном ($5 \cdot 10^{-14}$ – $5 \cdot 10^{-13}$ Ки/л, или $2 \cdot 10^{-2}$ – $2 \cdot 10^{-3}$ Бк/л). Концентрация радона в воде радоновых источников колеблется от 10^{-9} до $2,5 \cdot 10^{-8}$ Ки/л, что составляет от 37 до 250 Бк/л. Концентрация радона в воде подземных источников г. Новосибирска колеблется от 30 до 3000 Бк/л. Радиоактивные продукты распада радона и торона действуют на организм человека через посредство атмосферной пыли, которая поглощает эти изотопы и поэтому обладает некоторой радиоактивностью.

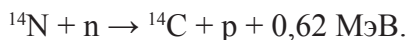
Свинец-210 и полоний-210 (^{210}Pb и ^{210}Po). Свинец-210 находится в почве в определённом равновесии с радием и поэтому может находиться в растениях и организме человека. Содержание свинца в организме может быть обусловлено не только поступлением его через пищевые цепи из почвы, но и из радия при его распаде уже в организме человека. Изотопы свинца и полония могут поступать в растения через корни из почвы или непосредственно сорбироваться надземными органами. Повышенное содержание свинца-210 и полония-210 в биологических объектах обусловлено попаданием с дождевой водой непосредственно на наземные органы растения.

Калий-40. Калий состоит из ^{39}K (93,08%), ^{41}K (6,91) и ^{40}K (0,0119%). ^{39}K и ^{41}K – стабильные изотопы, а ^{40}K – радиоактивный ($T = 1,3 \cdot 10^9$ лет). В каждом грамме при-

родного калия содержится $0,739 \cdot 10^{-9}$ Ки ^{40}K , поэтому весь калий является радиоактивным. Калий-40 распадается по типу электронного распада ($E_{\beta} = 1,325$ МэВ) с образованием стабильного изотопа ^{40}Ca , затем путём е-захвата переходит в возбуждённое состояние ^{40}Ar , который переходит в основное состояние, испуская γ -кванты ($E_{\gamma} = 1,459$ МэВ). Удельная активность природного калия примерно 1900 распадов в минуту на 1 г. Калий-40 вместе с природным калием поглощается растениями, затем мигрирует в организм животных. Поэтому продукты растительного и животного происхождения также содержат калий-40. Зная процентное (весовое) содержание общего калия в исследуемом материале, можно расчетным путём определить удельную активность, обусловленную калием-40.

Наведённая радиоактивность. Ряд естественных радиоактивных изотопов, находящихся на земной поверхности или в атмосфере, возникли при взаимодействии космических лучей с атмосферными атомами. Наибольшее значение имеют углерод-14 и тритий.

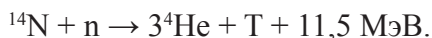
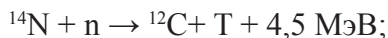
Углерод ^{14}C является мягким β -излучателем ($E_{\max} = 0,165$ МэВ) с периодом полураспада в 5 570 лет. Он образуется из азота атмосферы:



Все космические нейтроны захватываются азотом в стратосфере. Концентрация углерода-14 в атмосфере воздуха $1,3 \cdot 10^{-15}$ Ки/л, а в морской воде – 10^{-13} Ки/л. Углерод-14 образует углекислоту $^{14}\text{CO}_2$ и участвует в фотосинтезе и обмене веществ у растений. Углерод-14 находится в равновесии с углеродом-12 и его концентрация в живой ткани равна $7,5 \pm 2,7$ пКи на 1 г углерода. После отмирания растения поступление углерода в организм

прекращается, а ^{14}C распадается, это используют для определения возраста останков. Углерод-14 образуется и при ядерных взрывах, что осложняет использование метода ^{14}C для определения возраста останков.

Тритий – радиоактивный изотоп водорода. Он возникает в следующих реакциях:



Тритий составляет $5 \cdot 10^{-16}\%$ природной смеси водорода: протия ($^1\text{H} - 99,985\%$) и дейтерия ($^2\text{H} - 0,015\%$). Тритий является очень мягким β -излучателем ($E_{\text{max}} = 0,018 \text{ МэВ}$) с периодом полураспада 12,26 года. В атмосферном воздухе трития содержится около $1,8 \cdot 10^{-18} \text{ Ки}$. Тритий соединяется с кислородом и образует сверхтяжёлую воду T_2O . Поэтому тритий в атмосфере существует в виде водяного пара и осаждается на земную поверхность с дождём и снегом. Концентрация трития в дождевой воде, поверхностных водах, воде морей и океанов очень мала – около $10^{-16}\%$.

3.2. Миграция естественных радиоактивных элементов в почве и растениях

Природная радиоактивность почв в основном зависит от содержания в ней урана, радия, тория и калия-40. Количество радиоактивных элементов в различных почвах значительно колеблется. Содержание в почве калия-40 можно легко рассчитать на основании данных о количестве валового запаса калия в почве. Валовое количество естественных радиоактивных изотопов в почвах в основном зависит от почвообразующих пород. Кроме того, аккумуляция изотопов в почвах зависит от свойств

почв. В почвах тяжёлого гранулометрического состава радиоактивных веществ больше, чем в лёгких почвах. Повышенное содержание их наблюдается в суглинистых дерново-луговых почвах речных пойм, в торфяно-болотных почвах их мало. Радиоактивные изотопы распределяются по профилю почвы довольно равномерно. Суммарная энергия излучения почвы при среднем содержании в ней урана, тория, радия и калия-40 составляет 4,0128 МэВ в 1 с на 1 г почвы. При этом энергия α -излучения составляет 65 %, β -излучения – 28, γ -излучения – 7 %. Основным β -излучателем является калий-40.

В почвенном воздухе содержатся: радон (^{222}Rn), торон (^{220}Rn) и актинон (^{219}Rn), которые при α -распаде образуют ряд короткоживущих твёрдых β - и γ -излучателей. Валовое содержание естественных радиоизотопов не может быть показателем их доступности растениям. Основная часть урана, тория, радия в почве находится в прочно-связанной форме (необменной). Количество подвижного урана-238 составляет 1,5–3,0 %, радия – 0,1–8,1 %. Количество подвижных форм радиоизотопов зависит от типа почв и их физико-химических свойств. Подвижность радия в почвах образует убывающий ряд: подзолистые > пойменные > болотные. Находящиеся в почве естественные радиоизотопы переходят в растения и включаются в биологический цикл круговорота: они накапливаются в коре, древесине, ветвях деревьев и остаются в них до конца жизни растения. Из листьев, хвои и травы они периодически возвращаются в почву. Большой миграционной способностью в системе «почва – растение» обладает радий. Большая часть радия задерживается в корневой системе растения. Различия в распределении радия между надземной частью растения и корневой системой зависят от биологических особенностей растений. Больше

радия в надземной части растения наблюдается у кабачков и салата.

Для оценки интенсивности перехода изотопов из почвы в растение используют *коэффициент биологического поглощения* ($K_{\text{БП}}$) – отношение содержания изотопов в золе к валовому их содержанию в почве:

$$K_{\text{БП}} = (\text{мг/кг золы}) / (\text{мг/кг почвы}).$$

У тория-232 $K_{\text{БП}}$ для древесных и кустарниковых пород близок к единице. $K_{\text{БП}}$ урана у древесных пород – 0,05–0,01, а у мхов около единицы. Для радия $K_{\text{БП}}$ обычно выше единицы. У древесных и кустарников он варьирует от 1 до 7, но у рябины $K_{\text{БП}}$ по радию составляет 20–25.

Основная часть урана, тория и радия находится в почве в труднорастворимой форме, поэтому использование $K_{\text{БП}}$ часто приводит к заниженным результатам в оценке способности миграции изотопов в системе «почва – растение». Кроме того, зольность разных растений может сильно различаться. Более точно переход радиоизотопов из почвы в растение можно оценить по *коэффициенту накопления* ($K_{\text{Н}}$). Коэффициент накопления для урана, тория и радия представляет собой отношение содержания этих элементов в 1 кг сухого вещества растительной массы к содержанию их подвижных форм в 1 кг воздушно-сухой почвы:

$$K_{\text{Н}} = (\text{мкг/кг сухого вещества}) / (\text{мкг/кг сухой почвы}).$$

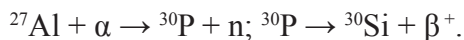
Для урана $K_{\text{Н}}$ больше $K_{\text{БП}}$ в 2–4 раза. Различия между отдельными культурами по содержанию урана на единицу сухого вещества достигают 10–30 раз.

3.3. Искусственные радиоактивные изотопы

Искусственные радиоактивные изотопы получают в результате различных ядерных реакций. Для превращения одних химических элементов в другие необходимо атомные ядра подвергнуть такому воздействию, которое бы привело к изменению ядер. Для этого нужны источники энергии такого же порядка, что и энергия внутриядерных связей. Эффективным средством воздействия на атомные ядра оказалась бомбардировка их частицами высоких энергий (от н МэВ до $n \cdot 10$ ГэВ). В первое время применяли α -частицы радиоактивного излучения, затем другие частицы, полученные в ускорителях. Процесс превращения атомных ядер, обусловленный воздействием на них быстрых элементарных частиц (или ядер других атомов), называют *ядерной реакцией*. Например:

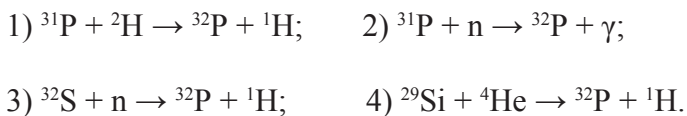


В 1919 г. Резерфорд впервые осуществил эту реакцию, используя α -частицы полония. Все ядерные реакции сопровождаются испусканием тех или иных элементарных частиц, в том числе и γ -квантов. Явление искусственной радиоактивности было открыто в 1934 г. Ирен и Фредериком Жолио-Кюри. Они впервые искусственным путём получили радиоактивные изотопы элементов, встречающихся в природе в виде устойчивых. Первые искусственные радиоактивные изотопы были получены при бомбардировке α -частицами бора, магния, алюминия:

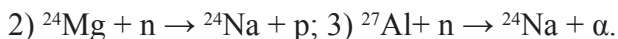


Так был открыт позитронный распад, который не наблюдается у естественных изотопов. В настоящее вре-

мя радиоактивные изотопы известны почти для всех элементов и их можно получить при самых разнообразных реакциях. Например, изотоп фосфора ^{32}P можно получить в следующих реакциях:



Для получения искусственных радиоизотопов в промышленности используют три метода: 1) бомбардировка ядерными частицами; 2) химическое разделение смеси изотопов; 3) выделение продуктов распада естественных радиоизотопов. В биологии имеют значение изотопы, полученные первыми двумя способами. В промышленном масштабе искусственные радиоактивные изотопы получают путём облучения (преимущественно нейтронного) соответствующих элементов. Например, Na^{24} получают так: 1) $^{23}\text{Na} + n \rightarrow ^{24}\text{Na} + \gamma$;



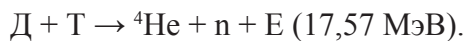
Основные виды ядерных реакций. Из большого числа различных ядерных реакций наибольший интерес представляют три реакции: *активации, деления, синтеза*. Все частицы (за исключением нейтронов) и лёгкие ядра, участвующие в ядерных реакциях, заряжены положительно, поэтому, чтобы проникнуть в ядро-мишень, им нужно преодолеть кулоновские силы отталкивания (кулоновский барьер). Для этого нужна большая энергия, которую они приобретают на ускорителях либо при нагревании до высокотемпературной плазмы. Нейтроны лишены заряда и свободно проникают в ядро атома без преодоления кулоновского барьера, поэтому свободные нейтроны больших энергий очень удобны для обстрела ядер. Нейтроны по энергиям делятся на тепловые (0,025 эВ), медленные

(до 100 эВ), промежуточные (0,1–500 КэВ) и быстрые (0,5 МэВ и выше). Реакции активации и деления вызываются нейтронами.

Реакция активации или нейтронного захвата. Она наблюдается при взаимодействии потока медленных нейтронов со стабильными ядрами. Последние захватывают нейтрон и превращаются в радиоактивные изотопы с атомной массой больше на 1 и избытком энергии, которая тут же высвечивается γ -квантом. Новое ядро подвергается электронному распаду, т. е. это наведённая радиоактивность. Например: $^{23}\text{Na} + n \rightarrow ^{24}\text{Na} + \gamma \rightarrow ^{24}\text{Mg} + \beta^- + \gamma$.

Реакция деления. Делением называется реакция расщепления атомного ядра на 2 части. Легко делятся под воздействием любых нейтронов уран-235, плутоний-239 и некоторые другие элементы. Нейтрон, влетев в ядро, делает его неустойчивым, и оно мгновенно разлетается на два ядра-осколка, сумма зарядов которых равна заряду исходного. При этом выделяется энергия, равная 200 МэВ (так как $M_1 + M_2 < M$), но примерно 170 МэВ – это кинетическая энергия осколков. Осколки деления имеют большой избыток нейтронов, они образуют β^- -радиоактивные цепочки распада, а также испускают в окружающую среду нейтроны. Если эти нейтроны встретят на своём пути тяжёлые ядра, способные к делению, то возникает саморазвивающаяся цепная реакция деления.

Реакция синтеза. Этот тип реакций возможен при столкновении двух лёгких ядер и слиянии их в одно более тяжёлое. Для преодоления кулоновского барьера ядра должны обладать большой кинетической энергией. Эту энергию ядра получают как энергию теплового движения при очень сильном нагревании до состояния плазмы, поэтому реакцию синтеза называют термоядерной. Здесь энергия движения атомных ядер достигает нескольких мегаэлектрон-вольт:



Такая реакция происходит при взрыве водородной бомбы. Термоядерная реакция синтеза возможна только между лёгкими ядрами и невозможна между тяжёлыми, обладающими слишком большим кулоновским барьером, непреодолимым даже для теплового движения сверхвысоких температур. Известно, что средняя энергия связи, рассчитанной на один нуклон (протон или нейтрон), у легких ядер растёт с ростом массового числа, поэтому при объединении двух лёгких ядер в одно более тяжёлое должен высвобождаться избыток энергии связи – ядерная энергия синтеза. Она настолько велика, что при большой концентрации ядер достаточна для возникновения цепной термоядерной реакции. Таким образом, в этом процессе быстрое тепловое движение ядер поддерживается за счёт энергии реакции, а сама реакция – за счёт теплового движения ядер. Для достижения атомами необходимой кинетической энергии нужна температура $10^7\text{--}10^8\text{ }^\circ\text{C}$ – это состояние горячей плазмы. Сейчас мы знаем два способа существования цепной термоядерной реакции: 1) медленная термоядерная реакция, самопроизвольно происходящая в недрах Солнца; 2) быстрая самоподдерживающаяся термоядерная реакция при взрыве водородной бомбы. В качестве ядерного горючего в водородной бомбе используют дейтерий и тритий. Высокая температура, необходимая для реакции синтеза, достигается в результате взрыва атомного запала.

Тестовые задания

1. Какой изотоп образуется в процессе взаимодействия космического излучения с газами атмосферы Земли:

а) калий-40;

- б) углерод- 14;
- в) радон-222.

2. Какой естественный радиоактивный элемент образует семейство последовательно превращающихся элементов:

- а) калий-40;
- б) углерод- 14;
- в) торий-232.

3. Какой из перечисленных радиоактивных элементов имеет газообразную форму:

- а) уран;
- б) радий;
- в) радон;
- г) торий.

4. Какой из естественных радиоактивных элементов обладает большей миграционной способностью в системе «почва – растение»:

- а) уран;
- б) радий;
- в) торий.

5. С помощью какого естественного радиоактивного изотопа определяют возраст растительных и животных останков в палеонтологии:

- а) изотоп фосфора;
- б) изотоп углерода;
- в) изотоп азота.

6. Кто впервые получил искусственные радиоактивные изотопы элементов, встречающиеся в природе в виде устойчивых:

- а) Беккерель;
- б) Кюри;
- в) Резерфорд.

7. Какой вид ионизирующего излучения можно использовать для получения искусственных радиоактивных изотопов:

- а) бета-лучи;
- б) альфа-лучи;
- в) гамма-лучи.

8. Захват какой частицы ядром атома вызывает ядерную реакцию активации:

- а) электрон;
- б) нейтрон;
- в) протон.

9. К какому типу ядерных реакций относится термоядерная:

- а) реакция активации;
- б) реакция синтеза;
- в) реакция деления.

4. ДОЗИМЕТРИЯ И РАДИОМЕТРИЯ

4.1. Дозы излучения и дозиметрические единицы

При прохождении через вещество часть энергии ионизирующих излучений поглощается веществом и может вызвать его изменение. Если это вещество входит в биологическую систему, то возникают и биологические изменения. В зависимости от вида и энергии излучения поглощённая энергия будет по-разному распределена в пространстве, что может привести к различному качеству радиационных нарушений. *Дозиметрией* называют процесс определения дозы излучения в различных средах и особенно в тканях живого организма. *Радиометрией* называют процесс измерения количества радиоактивных изотопов, определения их концентрации в различных объектах.

Поглощённая энергия излучения определяется как произведение числа образующихся пар ионов на среднюю работу ионизации. Мерой излучения является *доза*. Величина, характеризующая ионизирующую способность рентгеновских и γ -лучей в воздухе, называется *экспозиционной дозой излучения*. Единицей экспозиционной дозы является излучение, при котором в каждом килограмме воздуха образуются ионы с общим зарядом (для ионов одного знака), равным 1 Кл. Однако на практике этой единицей не пользуются, а используют единицу экспозиционной дозы – *рентген*. По первоначальному определению, 1 рентген (Р) – это такая доза рентгеновского или γ -излучения (с энергией не более 3 МэВ), при которой в 1 см³ воздуха при нормальных условиях (температура 0°C, давление 760 мм рт. ст.) вследствие ионизации

образуются ионы с суммарным зарядом по 1 CGSE каждого знака (CGSE – абсолютная электростатическая единица заряда, $1 \text{ Кл} = 3 \cdot 10^9$ единиц CGSE). Это значит, что $1 \text{ Р} = 1 \text{ CGSE}/\text{см}^3 = 0,333 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}/\text{м}^3$ воздуха. В дальнейшем определение единицы *рентген* было видоизменено. За дозу 1 Р принимается такая доза рентгеновского или γ -излучения (с энергией не более 3 МэВ), при которой в 0,001293 г воздуха вследствие ионизации образуются ионы с суммарным зарядом в 1 CGSE. Число 0,001293 – это масса в граммах 1 см^3 воздуха при нормальных условиях. Таким образом, теперь $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}/\text{кг}$ воздуха. Эти два определения в принципе эквивалентны. Рассчитаем число пар ионов, образующихся в 1 кг воздуха при дозе 1 Р. Каждый ион переносит элементарный заряд, равный e , т. е. $4,8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. Тогда при дозе в 1 Р образуется: $2,58 \cdot 10^{-4} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,61 \cdot 10^{15}$ пар ионов на 1 кг воздуха, или в 1 см^3 $2,083 \cdot 10^9$ пар ионов. Средняя энергия образования пары ионов в воздухе равна 34 эВ. В этом случае при дозе 1 Р в 1 см^3 воздуха затрачивается энергии: $34 \text{ эВ} \cdot 2,083 \cdot 10^9 / \text{см}^3 = 7,08 \cdot 10^{10} \text{ эВ} / \text{см}^3 = 7,08 \cdot 10^4 \text{ МэВ}/\text{см}^3 = 0,113 \text{ эрг}/\text{см}^3$ ($1 \text{ эрг} = 62,74 \cdot 10^4 \text{ МэВ}$).

Таким образом, $1 \text{ Р} = 2,084 \cdot 10^9$ пар ионов $= 0,11 \text{ эрг} = 7,08 \cdot 10^4 \text{ МэВ}$ на 1 см^3 воздуха (0,001293 г). В расчёте на 1 г воздуха это будет: $1 \text{ Р} = 1,61 \cdot 10^{12}$ пар ионов $= 88 \text{ эрг} = 5,48 \cdot 10^7 \text{ МэВ}$.

Применение рентгена в качестве единицы дозы допускается для измерения излучения с энергией до 3 МэВ. Производные рентгена: миллирентген – мР $= 10^{-3} \text{ Р}$; микрорентген – мкР $= 10^{-6} \text{ Р}$ и т. д. Сейчас часто используют единицу измерения системы СИ – зиверт – Зв $= 100 \text{ Р}$ и его производные: мЗв, мкЗв и т. д.

Единицу измерения рентген можно применять только для определения дозы электромагнитного излуче-

ния (рентгеновского или гамма). В тех случаях, когда облучение вещества идёт другими видами излучения, дозу выражают в физических эквивалентах рентгена (ФЭР). ФЭР любого ионизирующего излучения – доза, при которой поглощённая в 1 г вещества энергия равна потере энергии на ионизацию, создаваемую в 1 г воздуха дозой 1 Р рентгеновского или γ -излучения. Сейчас единица дозы ФЭР практически не используется (она равняется 88 эрг/г). Рентген и выражаемая им доза излучения является мерой падающего излучения. Доза в рентгенах не показывает количество энергии излучения, поглощённого в самом объекте облучения. Поэтому для характеристики поглощённой энергии излучения введено понятие поглощённой дозы. *Поглощённая доза* – величина, характеризующая энергию любого вида ионизирующего излучения, поглощённую единицей массы облучённого вещества. Единицей поглощённой дозы является рад ($1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г} = 10^{-5} \text{ Дж/г} = 10^{-2} \text{ Дж/кг}$). В системе СИ единица поглощённой дозы – грей ($1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$, отсюда $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$). При облучении биологических объектов дозу в воздухе измеряют в рентгенах, а затем пересчитывают поглощённую дозу в рады. Так как $1 \text{ Р} = 88 \text{ эрг/г}$, то $1 \text{ Р} = 0,88 \text{ рад}$.

Различные виды излучений вызывают неодинаковую плотность ионизации, это может приводить при одной и той же дозе к различному биологическому эффекту. Поэтому следует обязательно учитывать, излучением какого вида и какой энергии обусловлена поглощённая доза. Для сопоставления биологического действия различных излучений применяют так называемый *коэффициент относительной биологической эффективности* ($K_{\text{обэ}}$). $K_{\text{обэ}}$ определяется как отношение поглощённых доз различных видов излучения, вызывающих одина-

ковый биологический эффект. Единицей *поглощённой дозы*, учитывающей $K_{\text{ОБЭ}}$, т. е. *эквивалентной дозы* данного излучения, является биологический эквивалент рада – бэр. За единицу эквивалентной дозы (бэр) принимают такую поглощённую дозу любого вида излучения, которая вызывает такой же биологический эффект, как и 1 рад рентгеновского и γ -излучения с энергией квантов около 0,2 МэВ (образцовое излучение). Выражение дозы излучения в бэрах производится в тех случаях, когда необходимо оценить общий биологический эффект независимо от типа действующих излучений. В системе СИ эквивалентную дозу измеряют в зивертах ($1\text{Зв} = 100\text{ бэр}$).

Так как воздействие на ткани рентгеновского и γ -излучений происходит за счёт быстрых электронов, то $K_{\text{ОБЭ}}$ тех и других приняты за 1 и к ним приравнены $K_{\text{ОБЭ}}$ β -излучения. Для практических целей $K_{\text{ОБЭ}}$ α -излучения с энергией до 10 МэВ принимается равным 10. Следовательно, эквивалентная доза излучения в бэрах равна поглощённой дозе в радах, умноженной на коэффициент относительной биологической эффективности:

$$D_{\text{бэр}} = D_{\text{рад}} \cdot K_{\text{ОБЭ}}$$

Эквивалентная доза облучения не отражает универсально воздействие излучения на организм, так как одни части тела, органы и ткани более чувствительны, чем другие. В связи с этим эквивалентные дозы облучения различных органов и тканей необходимо учитывать с разными коэффициентами. Умножив эквивалентную дозу облучения на соответствующий коэффициент и просуммировав по всем органам и тканям, получаем *эффективную эквивалентную дозу*, отражающую суммарный эффект облучения для всего организма (измеряется в бэрах и зивертах). Просуммировав индивидуальные эф-

фактивные эквивалентные дозы облучения, получаемые группой людей, мы получим *коллективную эффективную эквивалентную дозу*, она измеряется в человеко-зивертах (чел.-Зв).

Рентген и рад являются мерой дозы, а не времени, в течение которого эта доза сообщается облучаемому объекту. Однако фактор времени для биологического воздействия ионизирующих излучений имеет большое значение. Для характеристики условий облучения, в частности времени облучения, используется понятие «*мощность дозы*». Мощностью экспозиционной дозы излучения (М) называют дозу (Д), создаваемую в воздухе в единицу времени:

$$M = D/t.$$

Единицы её измерения – Р/ч, Зв/ч, мР/ч, мЗв/ч и т. д. Единица мощности поглощённой дозы излучения: рад/с., рад/ч, Гр/ч и т. д., т. е. мощность поглощённой дозы равна поглощённой дозе, отнесённой к единице времени.

4.2. Методы регистрации ионизирующих излучений

Обнаружение (детектирование) ионизирующих излучений основано на использовании эффектов, возникающих в окружающей среде в процессе того или иного взаимодействия излучения с веществом. Эти эффекты делят на первичные (ионизация, люминесценция) и вторичные (фотохимические реакции). Для обнаружения эффектов взаимодействия ионизирующих излучений с веществом используют в основном электрические и сцинтилляционные детекторы. Электрические детекторы служат для улавливания энергии ионизации среды, вызванной излучением, и преобразуют её в электрические сигналы.

Электрическими детекторами являются ионизационные камеры, газоразрядные счётчики, кристаллические и полупроводниковые детекторы. Сцинтилляционные детекторы – крупные монокристаллы некоторых неорганических и органических веществ, в которых атомы, возбуждённые под действием ионизирующих излучений, отдают энергию в виде световых вспышек. Эта энергия преобразуется в электрические сигналы, доступные для точной регистрации.

4.2.1. Ионизационные методы

Известно, что при обычных условиях газы состоят из электрически нейтральных молекул. При облучении газа ядерными частицами нейтральные атомы и молекулы (часть или все) превращаются в ионы. Если же облучаемый газ наполняет камеру, к которой подведено постоянное напряжение, то возникает ионизационный ток. Величина тока служит мерой количества излучения. Однако величина тока зависит от разности потенциалов напряжения между электродами (рис. 4.1).

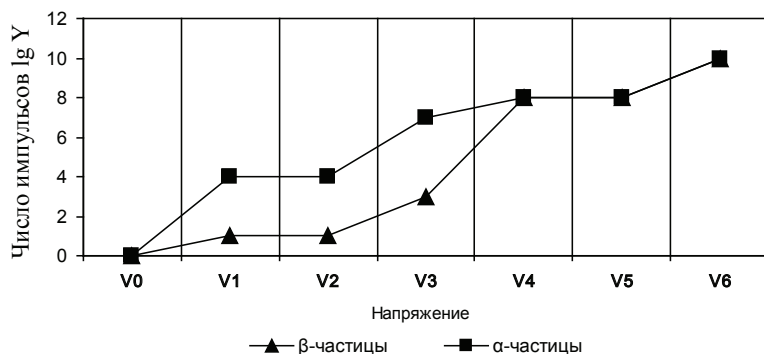


Рис. 4.1. Зависимость величины тока от разности потенциалов напряжения между электродами

При малом напряжении ток будет невелик, так как большая часть ионов рекомбинирует и лишь немногие достигнут катода и анода. В этом случае величина ионизационного тока не будет соответствовать первично образованному количеству ионов. Поэтому участок V_0 – V_1 малого напряжения не применяется в дозиметрических детекторах. По мере увеличения напряжения всё большее число ионов будет достигать электродов.

При напряжении V_1 все ионы достигнут электродов и возникнет ток насыщения. На участке V_1 – V_2 напряжение не приводит к увеличению тока, а сила ионизационного тока зависит только от энергии ядерных частиц. Поэтому область тока насыщения (V_1 – V_2) используют в ионизационных камерах – одном из видов детекторов. При дальнейшем увеличении напряжения первичные ионы приобретают большие скорости, достаточные для вторичной (ударной) ионизации нейтральных атомов и молекул. Вторичные ионы также могут производить ионизацию. В области напряжения V_2 – V_3 наблюдается определённая пропорциональность между числом первичных ионов и общей суммой ионов, т. е. в этой области сила тока обусловлена энергией ядерной частицы. Ток увеличивается с ростом напряжения, но строго пропорционально первичной ионизации. Участок напряжения V_2 – V_3 называют областью пропорциональности. В этом режиме напряжения работают детекторы – так называемые пропорциональные счётчики. В случае увеличения напряжения от V_3 до V_4 строгая пропорциональность между числом первичных ионов и общим числом ионов в ионизационном токе нарушается. Область V_3 – V_4 называется областью относительной пропорциональности и при измерениях не используется. В области ещё больших напряжений V_4 – V_5 достаточно одной пары ионов,

чтобы возник ток в виде разряда, причём величина разряда зависит не от числа первичных ионов или вида излучения, а только от напряжения. В этом режиме напряжения можно регистрировать прохождение каждой отдельной ионизирующей частицы. Область напряжений (V_4 – V_5), при которой возникает самостоятельный газовый разряд, называют *областью Гейгера*. Детекторами в этой области служат счётчики Гейгера – Мюллера. Если же напряжение перейдёт за V_5 , то в детекторе возникает непрерывный электрический разряд, который состоит из большого числа импульсов, не связанных с прохождением частиц через счётчик. При таком напряжении детектор быстро выходит из строя.

4.2.2. Сцинтилляционный метод

Ионизирующее излучение при взаимодействии с веществом помимо ионизации вызывает также возбуждение атомов и молекул. При переходе в невозбуждённое состояние некоторые вещества часть энергии выделяют в виде люминесценции, т. е. квантами света. Сцинтилляционный метод регистрации ионизирующего излучения основан на способности некоторых веществ испускать световые вспышки под действием излучения. Вещества, способные люминесцировать, называют вспышечными фосфорами или сцинтилляторами. В настоящее время используются органические и неорганические монокристаллы, жидкие и пластические вещества и некоторые инертные газы. Из неорганических сцинтилляторов часто применяют монокристаллы йодистого натрия, активированного таллием NaI (Tl) , и сернистого цинка ZnS (Ag) . Монокристаллы йодистого натрия лучше использовать для регистрации γ - и β -излучений, а сернистого

цинка – для α -частиц. Из органических широко распространены монокристаллы ароматических углеводов: антрацен ($C_{14}H_{10}$), стильбен ($C_{14}H_{12}$), пара-терфенил ($C_{18}H_{14}$) и др. Для регистрации квантов света в сцинтилляторах служат фотоэлектронные умножители (ФЭУ). ФЭУ могут регистрировать все виды ядерных излучений. Детектор, состоящий из сочетания сцинтиллятора и фотоумножителя, называют *сцинтилляционным счётчиком*. ФЭУ представляет стеклянный баллон с высоким вакуумом, где размещены электроды. Разность потенциалов между катодом и анодом достигает 1200 вольт (В) и более. Световые кванты, возникшие в сцинтилляторе, попадая на фотокатод, выбивают из него фотоэлектроны. Эти электроны под действием электрического поля ускоряются и через круглое отверстие фокусирующего электрода попадают на первый эмиттер, где каждый первичный фотоэлектрон выбивает несколько вторичных электронов. Затем электроны, ускоренные полем, попадают на второй эмиттер, где число их снова возрастает. Многократно умноженные электроны приходят на коллектор – анод. Далее отрицательный заряд в виде импульса напряжения попадает в регистрирующее устройство. Коэффициент усиления в фотоумножителе довольно высок, достигает $3 \cdot 10^5$ – $3 \cdot 10^7$. Суммарная интенсивность сцинтилляций пропорциональна интенсивности радиоактивного излучения, поэтому по числу вспышек оказывается возможным сосчитать число ионизирующих частиц, прошедших через сцинтиллятор.

4.2.3. Фотографический метод

Фотографический метод основан на вторичных эффектах взаимодействия ионизирующих излучений с ве-

ществом. Применение этого метода основано на том, что воздействие излучения на фотоэмульсию, содержащую AgBr или AgCl , вызывает почернение, аналогичное действию света (открытие Беккереля). Под действием излучения в кристаллах бромистого (хлористого) серебра отдельные атомы Ag восстанавливаются и становятся свободными. Дальнейшая обработка плёнки (её проявление) заканчивает этот процесс, и весь кристалл становится свободным серебром без брома или хлора. При облучении фотоэмульсии ионизирующими частицами, например, α -частицами, вдоль их траектории возникает след (трек) из таких свободных зёрен серебра. По числу треков в проявленном фотоэмульсионном слое можно судить о числе частиц, а по длине треков в ряде случаев – об их энергии.

Метод получения фотографических изображений в результате действия ионизирующего излучения на фотоэмульсию, взаимодействующую с исследуемым объектом, называется *авторадиографией*.

Тестовые задания

1. Как называется процесс измерения количества радиоактивных изотопов:

- а) дозиметрия;
- б) радиометрия;
- в) детектирование.

2. Как называется процесс измерения дозы излучения в различных средах:

- а) дозиметрия;
- б) радиометрия;
- в) детектирование.

3. В каких единицах измеряется экспозиционная доза излучения:

- а) рентген;
- б) рад;
- в) бэр.

4. В каких единицах измеряется поглощённая доза излучения:

- а) рентген;
- б) рад;
- в) бэр.

5. В каких единицах измеряется эквивалентная доза излучения:

- а) рентген;
- б) рад;
- в) бэр.

6. Каков коэффициент относительной биологической эффективности для альфа-излучения:

- а) 1;
- б) 10;
- в) 20.

7. Каков коэффициент относительной биологической эффективности для бета-излучения:

- а) 1;
- б) 10;
- в) 20.

8. Каков коэффициент относительной биологической эффективности для гамма-излучения:

- а) 1;

- б) 10;
- в) 20.

9. В каких единицах измеряется эффективная эквивалентная доза облучения:

- а) рентген;
- б) бэр;
- в) рад.

10. В каких единицах измеряется мощность поглощённой дозы излучения:

- а) рентген в час;
- б) бэр в час;
- в) рад в час.

11. В каких единицах измеряется мощность экспозиционной дозы излучения:

- а) рентген в час;
- б) бэр в час;
- в) рад в час.

12. Какой из электрических детекторов излучения регистрирует прохождение каждой отдельной ионизирующей частицы:

- а) ионизационная камера;
- б) пропорциональный счётчик;
- в) счётчик Гейгера-Мюллера.

13. В каком из методов регистрации ионизирующих излучений используется фотоплёнка:

- а) ионизационный метод;
- б) сцинтилляционный метод;
- в) автордиография.

14. В каком из детекторов ионизирующего излучения используется фотоэлектронный умножитель:

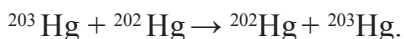
- а) ионизационная камера;
- б) сцинтилляционный счётчик;
- в) счётчик Гейгера-Мюллера.

5. ХИМИЯ ИЗОТОПОВ И РАДИАЦИОННАЯ ХИМИЯ

5.1. Основы химии изотопов

Химия изотопов занимается изучением физико-химических свойств и поведения изотопов химических элементов. Она имеет важное значение для понимания сущности процессов, которые изучаются в биологии и сельском хозяйстве. Здесь атомы изотопов данного элемента называют *изотопными*. Например, ^1H , ^2H , ^3H или ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C – изотопные атомы. Входя в состав молекул, они образуют разновидности молекул, которые называются изотопными. Изотопные разновидности молекул и атомов по совокупности называют *изотопными формами*. Уже у двухатомных молекул число изотопных форм (изотопных молекул) больше числа изотопных форм атомов. Число изотопных форм увеличивается с усложнением химического состава молекул. Например, мы имеем H , D , T и ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O . Тогда простые двухатомные молекулы выглядят так: H_2 , HD , D_2 , HT , T_2 , DT и $^{16}\text{O}_2$, $^{16}\text{O}^{17}\text{O}$, $^{17}\text{O}_2$, $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$, $^{18}\text{O}_2$, $^{17}\text{O}^{18}\text{O}$. Сложные двухатомные молекулы будут выглядеть следующим образом: ^{16}OH , ^{16}OD , ^{16}OT , ^{17}OH , ^{17}OD , ^{17}OT , ^{18}OH , ^{18}OD , ^{18}OT . В результате молекулярно-теплового движения, атомно-молекулярных взаимодействий и внутримолекулярных движений в природе непрерывно происходят процессы обменного обновления атомно-молекулярного состава среды. Этот процесс протекает с участием изотопных атомов. Ещё в ранних исследованиях естественных радиоактивных элементов был обнаружен медленный обмен ионов решётки природных минералов с изотопными ионами эле-

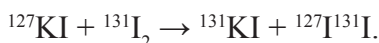
ментов, находящимися в водном растворе. Этот процесс назвали *изотопным обменом*. Выделяют два типа изотопного обмена: физический и химический. Физический обмен обусловлен исключительно физическими процессами: молекулярная диффузия, испарение, конденсация. Химический обмен происходит путём разнообразных химических реакций. Можно выделить атомный изотопный обмен, ионный, молекулярный, обмен изотопными радикалами. Например:



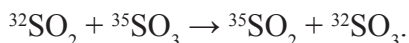
Жидкость Пар Жидкость Пар

В пару обнаруживается радиоактивная ртуть.

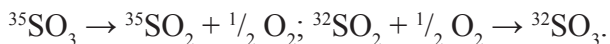
Пример химического обмена:



Пример косвенного изотопного обмена:



Реакция идёт следующим образом:



Изотопные атомы различаются не только массой, но и составом атомных ядер, что влияет на их свойства и поведение. Различия в свойствах и поведении изотопных атомов называют *изотопными эффектами*. Хотя изотопные атомы имеют одинаковую структуру электронных оболочек, различие в массах ядер приводит к некоторому сдвигу энергетических уровней электронов в электронных оболочках, это должно сказываться на энергии связи изотопных атомов в химических соединениях. Различия в массах изотопов сказываются также на молекулярно-кинетических характеристиках. Средняя кинетическая энергия атомов или молекул равняется: $E = mv^2/2$. При

заданной температуре средняя кинетическая энергия их равна, отсюда следует: $v_1/v_2 = \sqrt{M_2/M_1}$. Это значит, что в явлениях переноса (диффузия, теплопроводность, внутреннее трение) должны наблюдаться кинетические изотопные эффекты. Например, при диффузии изотопные атомы и молекулы имеют разную скорость диффузии. В изотопно-обменных реакциях (например, $^{12}\text{CO}_2 + \text{H}^{13}\text{CN} \rightarrow ^{13}\text{CO}_2 + \text{H}^{12}\text{CN}$) константа равновесия (K) при температуре $0^\circ\text{C} = 1,07$. Если бы изотопов не было, то K равнялась бы 1. Это значит, что ^{13}C прочнее связан в молекуле HCN, чем ^{12}C , по сравнению с CO_2 . Мерой термодинамического изотопного эффекта в реакции изотопного обмена может служить отклонение от единицы константы равновесия. Эти эффекты проявляются в природе в процессах круговорота веществ в биосфере. В результате изотопный состав химических элементов, извлечённых из разных частей биосферы, оказывается неодинаковым. Водород и кислород воды из рек, озёр и морей имеет разный изотопный состав. Эти различия очень малы, но они существуют. Кислород воды и углекислый газ воздуха (O_2 и CO_2), углерод и кислород различных геологических отложений имеют неодинаковый изотопный состав. Изотопа ^{18}O в известняках больше, чем в воде, а ^{13}C больше в карбонатах, чем в углекислоте. От масс изотопных атомов зависит энергия активации химических реакций, а от энергии активации – скорость химической реакции. Выяснено, что скорость реакции с участием более тяжёлого изотопа меньше, чем с участием более лёгкого изотопа.

5.2. Метод изотопных индикаторов

Изотопы характеризуются не химической тождественностью, а химическим подобием. На подобии

свойств изотопов основан метод изотопных индикаторов, или *метод меченых атомов*. Это один из основных методов использования изотопов в биологии и сельском хозяйстве. Стабильные малораспространенные и радиоактивные изотопы можно использовать в качестве меток (индикаторов) для получения меченых химических элементов, соединений, макротел (газов, жидкостей, твердых частиц, живых организмов). *Немеченым элементом* называется элемент с естественным изотопным составом. *Меченым* называют элемент с искусственно изменённым изотопным составом. Меченые элементы можно получить: 1) повышением в данном элементе относительного содержания стабильного малораспространенного изотопа; 2) введением в состав данного химического элемента не существовавшего в нём до этого радиоактивного изотопа. Различают *стабильные* и *радиоактивные* изотопные индикаторы. Содержание стабильных изотопов-индикаторов определяют при помощи масс-спектрографов, а содержание радиоактивных индикаторов – при помощи радиометрических приборов. Если изотоп-индикатор в меченом элементе содержится в относительно небольшом количестве, то остальная часть (масса) меченого элемента называется *носителем*. В некоторых случаях для получения меченых элементов в качестве индикаторов используют изотопы других элементов с близкими химическими свойствами. Например, калий метят рубидием-86, так как рубидий – химический аналог калия. Такие изотопы-индикаторы называют неизотопными индикаторами, а элемент – неизотопным носителем.

С помощью изотопов можно метить не только химические элементы и их соединения, но и газы, жидкости, твердые частицы. Контролируя изотоп-индикатор, можно проследить механический перенос газа, жидкости, твер-

дых тел в различных системах. Например, перенос воды, солей в почвах, движение илистых частиц в каналах, движение газов и жидкостей в скрытых трубопроводах и т. д. В экологии, биологии и сельском хозяйстве широко применяют метод радиоактивной индикации микроорганизмов, насекомых, животных и т. п. Этот метод используется в биохимии, цитологии и генетике для наблюдения за миграцией живых организмов. Биология – одна из наиболее ёмких областей использования метода изотопных индикаторов, однако этот метод имеет свои границы применения. К методу изотопных индикаторов предъявляются два основных требования: 1) введение изотопных индикаторов в биологическую систему не должно нарушать нормального течения биологических процессов; 2) информация должна быть точной, объективно отражающей реальные процессы в биологической системе.

С помощью метода изотопных индикаторов можно решать ряд типовых задач: 1) исследование перемещения (миграции) и распределения меченых макро- и микроорганизмов; 2) исследование перемещения и распределения по морфологическим органам и частям живого организма ассимилируемых им из внешней среды меченых элементов; 3) химические пути перехода меченого элемента из одних соединений в другие; 4) исследование изотопного обмена в биологических системах; 5) исследование ассимиляции живыми организмами питательных веществ из различных источников питания; 6) исследование с помощью изотопных индикаторов передачи информации в живых организмах.

Задача 1. При решении этой задачи главное – введение радиоактивного индикатора непосредственно в живой организм и получение меченых организмов. Далее с помощью радиометрической аппаратуры прослежива-

ют их распространение. Способы введения метки принципиального значения не имеют. Это могут быть инъекция, смазывание раствором, введение с пищей и т. д. Важно, чтобы метка удерживалась в живых организмах в течение времени, достаточного для проведения эксперимента. В большинстве случаев радиоактивность меченых живых организмов регистрируют способом *in vivo* (в живом состоянии), поэтому для индикации целесообразно применять изотопы, испускающие γ -излучение.

Задача 2. При проведении таких исследований в живой организм вводят элемент, меченный радиоизотопом в какой-либо определённой исходной химической форме. Но нужно помнить, что с помощью детектора можно проследить движение изотопа, но не меченого химического соединения. Распространение и распределение меченого элемента в живом организме прослеживают с помощью счётчиков-щупов, которые прикладывают к различным точкам, местам, частям организма. Уровень скорости счёта служит мерой количества меченого вещества. Сейчас используют специальные радиометрические сканирующие устройства для исследования человека и животных. Количественные сведения о распределении меченого элемента в растительном организме получают путём фиксации растения, расчленения на органы и части, изготовления стандартных препаратов и измерения их активности в стандартных условиях. Наглядную картину распределения меченого элемента в живом организме, в его органах и тканях можно получить методом автордиографии.

Задача 3. Для решения этой задачи одного метода индикаторов недостаточно. Здесь неизбежно приходится сочетать метод радиоактивных индикаторов с методами аналитической химии и биохимии — методами разделения смесей веществ и их идентификацией.

Задача 4. Если в живой организм ввести меченый элемент, то можно получить кинетические кривые содержания в продуктах метаболизма меченого и немеченого элементов. Количество немеченого элемента получают по разности между общим количеством химического элемента и количеством меченого. Кинетика абсолютных количеств немеченого и меченого элементов в каждой ячейке зависит от того, какие в метаболизме преобладают процессы: синтеза или распада. В молодом организме преобладают процессы синтеза, в старом – распада. Взрослый организм в течение некоторого времени может находиться в квазистационарном состоянии, когда процессы синтеза и распада взаимно скомпенсированы. Метаболизм веществ в таком состоянии можно изучать только с помощью методов изотопных индикаторов, так как другими методами невозможно обнаружить процессы синтеза и распада веществ при условии постоянства их массы.

Задача 5. Выявление источников пищи, форм питательных элементов в ней и степени их усвоения – всё это весьма важно при изучении биологии каждого вида живых организмов, условий их существования. Такие исследования имеют прямое практическое значение. При разработке рациона питания животных с помощью метода изотопных индикаторов можно выяснить степень усвояемости питательных элементов из различных форм пищи. При таких исследованиях меченый элемент вводят в источник питания и затем прослеживают его ассимиляцию. В агрохимии при изучении различных приёмов внесения удобрений возникает задача раздельного учёта питательного элемента, усвоенного растением из почвы и удобрения. Такая задача может быть решена только методом изотопных индикаторов. В испытываемое удобрение

вводят меченый элемент и вносят его в почву, на которой выращивают растения.

Задача 6. Метод изотопных индикаторов позволяет более просто решать ряд вопросов. В частности, может быть выяснено, осуществляется ли передача данного вида физиологической информации посредством массопереноса между источником информации и адресатом-исполнителем.

Рассмотренные типовые задачи биологических исследований не исчерпывают всех проблем, в которых метод изотопных индикаторов незаменим или наиболее эффективен.

5.3. Основы радиационной химии

Предметом радиационной химии является изучение радиационно-химических реакций, применение их в химической технологии синтеза соединений и получение материалов с новыми свойствами. При прохождении частиц высоких энергий через среду наряду с процессами ионизации может происходить процесс возбуждения атомов и молекул. Возбуждение колебательных спектров молекул иногда достигает такого уровня, при котором в молекуле разрывается химическая связь и молекула диссоциирует. В процессе такой диссоциации образуются или ионы, или свободные радикалы – нейтральные продукты диссоциации молекул, которые, как правило, крайне неустойчивы. Они обладают высокой степенью возбуждения и реакционной способностью. Процесс разложения химических соединений под действием ионизирующих излучений называют *радиолизом*. В процессе радиолиза образуются первичные продукты радиационно-химических реакций.

Пусть среда содержит молекулы типа АВ. Схематически укажем первичные радиационно-химические процессы, возникающие при прохождении ионизирующих частиц через среду: 1) ионизация молекул: $AB \rightarrow AB^+ + e^-$; 2) возбуждение молекул и диссоциация с образованием ионов: $AB \rightarrow A^+ + B^-$; 3) возбуждение молекул и их диссоциация с образованием свободных радикалов: $AB \rightarrow A + B$. Возможны и другие варианты. Дальнейшая судьба образовавшихся продуктов зависит от свойств среды. В принципе имеется вероятность последующей рекомбинации продуктов распада молекул АВ. Если в среде присутствуют другие молекулы, то продукты радиолиза могут вступать с ними в реакцию – произойдёт радиационно-химическая реакция. Она количественно характеризуется радиационно-химическим эффектом, который равен числу молекул исходного вещества, подвергнутых изменению при поглощении энергии, равной 100 эВ ($G_{\text{эф.}}$ = число изменённых исходных молекул / 100 эВ поглощённой энергии). Кроме этого используется величина радиационно-химического выхода данного продукта (G_i), образующегося в среде под действием ионизирующего излучения: G_i = число образовавшихся молекул продукта / 100 эВ поглощённой энергии. Общий радиационно-химический выход равен: $G = \sum_{i=1}^n G_i$, где n – общее число продуктов, образовавшихся радиационно-химическим путём.

5.3.1. Радиолиз воды

Вода – основной компонент живых клеток и один из основных растворителей. В процессе радиолиза происходит: 1) при ионизации: $H_2O \rightarrow H_2O^+ + e^-$; 2) при возбуждении молекул: $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$, $H_2O \rightarrow H + OH$. Свободный

электрон вступает в связь с молекулами воды и образует гидратированный электрон: $\text{H}_2\text{O} + e^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}^-$. Ионы H_2O^+ и H_2O^- неустойчивы и распадаются: $\text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}$, $\text{H}_2\text{O}^- \rightarrow \text{H} + \text{OH}^-$. Свободные радикалы H и OH – неустойчивые системы и испытывают превращения: 1) $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$; 2) $\text{H} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$; 3) $\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$; 4) $\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$; 5) $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_3$; 6) $\text{H}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$; 7) $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2$; 8) $\text{HO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$ и т. д. Реакции показывают, что накапливаются сильные окислители, кислород, перекиси различных видов. Образование перекисей усиливается в присутствии растворённого в воде O_2 : $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2$; $\text{OH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{O}$; $\text{H}_2\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$.

Если в воде растворены неорганические или органические вещества, то они могут сами подвергаться радиолизу, в то же время они могут претерпевать и косвенное химическое превращение под действием продуктов радиолиза воды. Таким образом, облучение стимулирует окислительные и восстановительные реакции. В тех случаях, когда такие реакции уже протекают, облучение приводит к изменению кинетики и сдвигу равновесия этих реакций.

5.3.2. Действие излучения на органическое вещество

Под действием излучений образуются:

$\text{RH} \rightarrow \text{RH}^+ + e^-$; $\text{RH} \rightarrow \text{R} + \text{H}$, где R – органический радикал. В водной среде накапливаются продукты радиолиза воды, поэтому: $\text{RH} + \text{OH} \rightarrow \text{R} + \text{H}_2\text{O}$; $\text{RH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{R} + \text{H}_2\text{O}_2$; $\text{RH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{RO}_2\text{H} + \text{H}$; $\text{R} + \text{O}_2 \rightarrow \text{RO}_2$. В результате образуются свободные радикалы и органические перекиси, здесь также идут процессы димеризации и полимеризации органических соединений, например:

$\text{RO}_2 + \text{RH} \rightarrow \text{RO}_2\text{R} + \text{H}$; $\text{R} + \text{RH} \rightarrow \text{RR} + \text{H}$; $\text{RR} + \text{RH} \rightarrow \text{RRR} + \text{H}$ и т. д. Другой процесс: $\text{RH} \rightarrow \text{R}_1^+ + \text{R}_2\text{H}^-$; $\text{RH} \rightarrow \text{R}_1 + \text{R}_2\text{H}$. Здесь происходит разрыв химической связи под действием радиации.

Насколько сложен состав продуктов радиолиза органических веществ, можно посмотреть на примере γ -облучения пентана C_5H_{12} . Здесь указан выход (число молекул на 100 эВ энергии) образующихся продуктов: водород – 4,20, метан – 0,22, этилен – 0,36, этан – 0,27, пропилен – 0,29, пропан – 0,33, бутен-1 – 0,06, бутан – 0,08, пентены – 0,71, изогексан – 0,03, н-гексан – 0,14, изогептан – 0,41, н-гептан – 0,45, н-октан – 0,20, изононан – 0,21, изодекан – 2,40, н-декан – 0,28. Радиационно-химические превращения других органических соединений (спиртов R-OH ; кислот R-COOH ; эфиров R-O-R ; аминов RNH_2 ; аминокислот $\text{NH}_2\text{-R-COOH}$ и т. д.) ещё сложнее, чем углеводов. Среди продуктов деструкции появляются не только фрагменты углеводородной цепочки, но и продукты превращения функциональных групп.

Тестовые задания

1. Сколько изотопных форм имеет молекула водорода:

- а) 1;
- б) 3;
- в) 6;
- г) 18.

2. Сколько изотопных форм может иметь молекула воды:

- а) 1;
- б) 3;
- в) 6;
- г) 18.

3. Как изменяется число изотопных форм с усложнением химического состава молекул:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) не изменяется.

4. Какой будет скорость диффузии тяжёлой воды (T_2O) по сравнению с обычной водой (H_2O):

- а) меньше;
- б) больше;
- в) одинаковой.

5. Как называется элемент с искусственно изменённым изотопным составом:

- а) радиоактивный элемент;
- б) меченый элемент;
- в) немеченый элемент.

6. Как называется процесс разложения химических соединений под действием ионизирующих излучений:

- а) диссоциация;
- б) радиолиз;
- в) радиоактивный распад.

7. Как называется процесс взаимодействия продуктов радиолиза с другими молекулами, присутствующими в среде:

- а) химическая реакция;
- б) радиационно-химическая реакция;
- в) рекомбинация молекул.

6. ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

6.1. Характеристика облучения

Облучение организма или его отдельных органов может быть внешним, внутренним и смешанным. *Внешнее* облучение происходит от источника излучения, удалённого от объекта. Здесь в основном присутствуют γ -кванты, которые могут распространяться на значительные расстояния. Действие излучения на организм зависит от общей дозы радиации и времени, в течение которого он её получает. Общую дозу можно давать частями в течение длительного времени. Такое облучение называется *хроническим*. Такая же доза, данная за малый промежуток времени, вызывает острое облучение (*острые дозы*).

Внутреннее облучение происходит, когда радиоактивные изотопы поступают внутрь организма. Здесь в облучении могут участвовать различные виды радиации. При этом наибольшая плотность облучения тканей и органов получается от α - и β -частиц, обладающих небольшим пробегом. В зависимости от формы органа различается и плотность ионизации, создаваемая γ -лучами и β -частицами. Облучение плодов томата, яблоки, перца будет сильнее, чем листьев, так как расстояние пробега частиц внутри плодов длиннее, чем в листьях.

Смешанное облучение растений бывает, когда в них накопились радиоизотопы, испускающие γ -кванты, которые производят внешнее облучение рядом стоящих растений.

6.2. Действие ионизирующих излучений на биологические объекты

Облучение действует на отдельные молекулы, макромолекулы, субклеточные структуры, клетки, ткани, органы и целый организм. Установлено, что аминокислоты под действием ионизирующих излучений разлагаются преимущественно с отщеплением аммиака (процесс деаминации). Концентрация аминокислоты влияет на радиационно-химический выход: с повышением концентрации он увеличивается. С повышением дозы радиации увеличивается радиолиз аминокислот. Пептиды реагируют на облучение аналогичным образом. Показателем действия радиации на белки служит изменение физико-химических свойств, молекулярной массы, оптических свойств, электропроводности и т. п. При облучении белков в дозах 10^3 рад происходит их денатурация (утрата трёхмерной конформации, присущей данной белковой молекуле).

Радиочувствительность и радиоустойчивость. Их мерой может служить доза излучения, при которой наблюдается заданный радиохимический или радиобиологический эффект. Радиочувствительность одних и тех же белков из разных биологических объектов сильно различается.

Ферменты, являясь белковыми веществами, также обладают различной радиочувствительностью. Нуклеиновые кислоты в водных растворах под действием излучения претерпевают следующие химические изменения: 1) деаминация и декарбоксилирование; 2) разрыв связей между сахарами и основаниями (освобождение оснований); 3) распад пуриновых и пиримидиновых оснований; 4) окисление углеводного компонента; 5) разрыв нуклеотидной цепи и высвобождение неорганических фосфатов; 6) образование гидроперекисей пиримидино-

вых оснований (доза 10^3 рад и более). Установлено, что пуриновые основания радиочувствительнее пиримидиновых ($A > G > C > T$). Установлено также, что белковый компонент хромосом оказывает защитное действие при облучении ДНК.

При облучении растворённых в воде веществ наблюдается прямое и косвенное (через радиоллиз воды) действие излучения.

Прямое действие ионизирующих излучений – это непосредственные радиационно-химические акты превращения молекул под действием проходящих через них ионизирующих частиц. Пусть в данном растворе N молекул и излучение с плотностью потока I . Число актов превращения молекул за единицу времени будет:

$$dN = -\sigma I N dt,$$

где σ – коэффициент пропорциональности.

Плотность потока I пропорциональна мощности дозы $M = D/t$, т. е.

$$I = kM,$$

где k – переходной коэффициент.

Тогда получаем $dN = -\sigma k M N dt$, а отсюда следует, что $N_t = N_0 e^{-\sigma k M t}$. Так как $Mt = D$ – доза излучения, то получаем следующее выражение: $N_t = N_0 e^{-\sigma k D}$. Отсюда, число изменённых молекул будет: $N_{\text{изм}} = N_0 - N_t = N_0 (1 - e^{-\sigma k D})$.

Следствие: 1) число неизменённых и изменённых молекул пропорционально общему числу молекул в начальный момент; 2) число неизменённых и изменённых молекул находится в экспоненциальной зависимости от дозы излучения; 3) при постоянной дозе $D = \text{const}$. Относительный выход $N_{\text{изм}}/N_0 = 1 - e^{-\sigma k D} = \text{const}$, и

$N_t / N_0 = e^{-\sigma k D} = \text{const}$. Перечисленные основные следствия можно рассматривать в качестве признаков *прямого* действия радиации. Эти положения получили название *теории мишеней*.

Косвенное действие радиации. При облучении водных растворов биовеществ установлено, что в некоторых пределах концентраций при $D = \text{const}$, $N_{\text{изм}} = \text{const}$, $N_0 \neq \text{const}$. Отсюда $N_{\text{изм}} / N_0 \neq \text{const}$, это объясняется тем, что основной механизм радиационно-химического действия в разбавленных растворах – это косвенное действие – вторичные реакции с продуктами радиолиза воды. В этом случае лимитирующим фактором выхода изменённых биомолекул будет концентрация продуктов радиолиза воды, которая постоянна при постоянной дозе излучения. Отсюда $N_{\text{изм}} / N_0 = C_{\text{изм}} / C_0$, т. е. с увеличением концентрации растворённого вещества относительный выход биопродукта уменьшается обратно пропорционально концентрации. Это *эффект разведения* – признак косвенного действия радиации.

Существует *температурный эффект* действия радиации, когда, например, при одинаковой дозе излучения раствор витаминов в замороженном состоянии дезактивировался в меньшей степени, чем в жидком состоянии.

Кислородный эффект возникает, когда при облучении водных растворов в присутствии O_2 окислительно-восстановительные реакции проходят с большим выходом.

Защитный эффект возникает, если облучать высокоочищенные ферменты в присутствии глюкозы, тиомочевины и цистеина: ферменты инактивируются в меньшей степени, значит эти вещества являются активными акцепторами свободных радикалов и других продуктов радиолиза.

Эффект последствий: при облучении некоторых биогенных веществ (ДНК, ферменты) обнаружено,

что радиационно-химические изменения продолжают даже после прекращения облучения.

Отмеченные явления, протекающие *in vitro*, в той или иной степени проявляются в живых клетках и при радиобиологической реакции всего организма. Тем не менее радиационно-химические процессы в условиях *in vivo* могут быть иными как в качественном, так и количественном отношении. Дело в том, что условия среды *in vivo* отличны от тех, которые создаются искусственно, *in vitro*.

А. М. Кузин на основе обобщения имеющихся данных предложил общую схему развития радиобиологического действия излучения. Подчеркнём, что радиобиологические эффекты – это результат целого комплекса взаимосвязанных и взаимообусловленных изменений, протекающих от молекулярного до генетического уровня живой клетки и целого организма. Причём причиной тех или иных изменений, связанных с действием излучения, может быть как прямое действие радиации, так и косвенное. Согласно схеме А. М. Кузина, процесс действия радиации осуществляется в три стадии.

На первой стадии – *физической* – происходит ионизация и возбуждение как низкомолекулярных, так и высокомолекулярных соединений субстрата клетки. На эти процессы расходуется около 80 % поглощённой энергии излучения. Образуются ионы и свободные радикалы, значит физическая стадия – это прямые акты воздействия ионизирующих излучений на молекулы.

На второй стадии – *химической* – происходят реакции взаимодействия первичных продуктов радиолитического распада с ненарушенными молекулами, включая макромолекулы различных биоструктур. Образуются, в частности, органические перекиси и протекают реакции окисления, приводящие к появлению новых химических соедине-

ний, в том числе токсического действия – *радиотоксинов*. В ходе опытов из облучённых растительных тканей извлекали экстракты, которые действовали на необлучённые растения и получали повреждения, характерные для радиационного облучения. Вещества, содержащиеся в экстрактах облучённых тканей растений, называют радиотоксинами.

На третьей стадии – *биологической* – радиационно-химические превращения в биосубстрате ведут к нарушениям в биологической организации клетки. Нарушается структура биологических мембран, изменяется активность ферментов, это нарушает гармонию ферментативных цепных реакций, процессы окислительного фосфорилирования, синтез белков, возникают вещества токсического действия – подобие радиотоксинов. В результате прямого и косвенного действия радиации возникают мутации в хромосомном аппарате и ДНК. При больших, летальных дозах излучения клетка погибает. Ещё более сложный характер имеет биологическое действие ионизирующих излучений на целостный организм, у которого имеются различные органы со специализированными тканями и функциями. В результате межклеточного обмена и регуляторных механизмов радиационные повреждения в одних клетках или органах могут индуцировать повреждения в других клетках и органах. Вследствие этого может произойти общее расстройство функциональной, физиологической деятельности организма. Изменения в генеративных (половых) органах могут вызвать мутации, т. е. изменения в последующих поколениях.

Любые изменения в нормальной жизнедеятельности живого организма, возникающие под действием радиации, называются *радиобиологическими эффектами*.

Основная количественная характеристика радиобиологического эффекта (*дозная кривая*) – зависимость радиобиологического эффекта от дозы излучения при прочих постоянных условиях. Величина дозы, при которой радиобиологический эффект начинает проявляться или имеет заданную величину, называется *радиоустойчивостью* или *радиочувствительностью* живого организма по отношению к действию радиации на данный биологический признак.

6.3. Физиологическое (соматическое) действие радиации

С помощью меченых атомов было установлено, что под действием рентгеновского излучения происходит торможение синтеза ДНК. Оказалось, что торможение синтеза ДНК в большей степени наблюдается у клеток, испытывающих интенсивное деление. Под действием излучения в организме наблюдается нарушение белкового обмена – возникает отрицательный баланс азота (его больше выделяется, чем поступает в организм с пищей). Это значит, что в организме идёт усиленный распад белков, не компенсирующийся их синтезом. На разных видах живых организмов обнаружено также изменение жирового обмена, содержания фосфолипидов, играющих важную роль в структуре клеточных мембран. Действие ионизирующих излучений затрагивает и минеральный обмен. Изменяется проницаемость клеточных мембран, что ведёт к нарушению ионного баланса. При больших дозах наблюдается выход из клетки ионов калия, натрия, хлора.

Радиоустойчивость разных клеток различна. Клетки разных тканей многоклеточных живых организмов тоже обладают различной радиоустойчивостью, а последняя

зависит от их стадии развития. Общеизвестно, что живая клетка реагирует на облучение как целое. Морфологические изменения в клетках обнаруживаются не сразу после облучения, а лишь через некоторое время, неодинаковое для разных клеток. Под действием облучения наблюдаются морфологические изменения клеток: увеличиваются клеточные ядра и клетки в целом, изменяются формы клеток (гигантские ядра, тройной митоз), дробление ядер и др. У клеток, проходящих деление (митоз), после облучения эта функция нарушается. Было сформулировано правило (Бергонье и Трибондо): *радиоустойчивость в отношении гибели клеток обратно пропорциональна их способности к делению и прямо пропорциональна их уровню дифференциации*. Это значит, что часто делящиеся клетки особо чувствительны к облучению, а дифференцированные ткани менее чувствительны.

Морфологическим эффектом облучения является также повреждение хромосом (слипание, образование комков, набухание). Такое действие излучения называют диффузным. Наблюдаются и другие повреждения хромосом – абберрации. Если нарушенная хромосома восстанавливается, то это процесс реституции. Разрывы хромосом являются следствием не только прямого действия излучения, но главным образом косвенного действия через радиационно-химические эффекты. С увеличением дозы облучения число хромосомных абберраций увеличивается, в зависимости от мощности дозы их число тоже увеличивается. При одной дозе большей мощности число абберраций больше. Хромосомные абберрации могут приводить к нарушению обмена веществ, задержке митоза, видоизменению морфологии клетки и появлению новых генотипов, крайним случаем является гибель клетки.

У растений и животных нет органов, которые были бы избирательно чувствительны к радиации, организм

реагирует на любое действие ионизирующего излучения как единое целое. Радиочувствительность растений и животных наиболее легко учитывается показателем гибели организма – это летальная доза (LD). Чаще радиочувствительность организмов оценивают посредством дозы, при которой наступает смерть 50% особей в течение 30 дней наблюдений. Это доза LD_{50}^{30} , возможны и другие оценки. Существует общая тенденция зависимости радиочувствительности от степени организации организмов – чем выше степень биологической организации живых организмов, тем меньше их радиоустойчивость (табл. 6.1). Крайними членами в ряду являются микроорганизмы (10^6 – 10^7 рад) и человек (300–400 рад). Действие радиации подчиняется общефизиологическим закономерностям, характеризующим зависимость физиологического эффекта от дозы: *малые дозы стимулируют физиологические функции живого организма, а большие – угнетают*. Указанную закономерность можно схематически представить в виде графика (рис. 6.1). Эффект радиационной стимуляции используется в сельском хозяйстве для повышения урожайности (метод предпосевного облучения семян). Наблюдаются и такие явления, характерные для раздражимых систем, как смена возбуждения и торможения. Организм может возвратиться в нормальное состояние через прохождение либо одной фазы возбуждения и торможения, либо через прохождение нескольких фаз возбуждения и торможения.

Такие пострadiaционные явления наблюдаются при относительно небольших дозах, при которых возможны эффекты пострadiaционного восстановления.

Существуют критические дозы, после которых наступает полное расстройство функциональной деятельности и развивается лучевая болезнь. Различают два слу-

Таблица 6.1

Радиоустойчивость некоторых живых организмов

Класс	Представитель	Показатель LD	Доза, рад
Шитомицеты	Микрококки	LD ₃	1000000
	<i>E. coli</i>	LD ₅₀	5600–150000
Простейшие	Амёба	LD ₅₀	100000
Ракообразные	Дафния	LD ₁₀₀	6500
Моллюски	<i>Radix japonica</i>	LD ₅₀ ⁸⁰	2000
	<i>Radix japonica</i>	LD ₅₀ ²⁰	12000
Рыбы	Карась	LD ₅₀ ³⁰	1800
Земноводные	Лягушка	LD ₅₀ ³⁰	700
	Тритон	LD ₅₀ ³⁰	3000
Пресмыкающиеся	Черепаха	LD ₅₀ ³⁰	1500
Птицы	Куры	LD ₅₀ ³⁰	600–800
Млекопитающие	Кролик	LD ₅₀ ³⁰	800
	Мышь	LD ₅₀ ³⁰	550
	Обезьяна	LD ₅₀ ³⁰	550
	Морская свинка	LD ₅₀ ³⁰	300–350
	Собака	LD ₅₀ ³⁰	325–400
	Человек	LD ₅₀	300–400

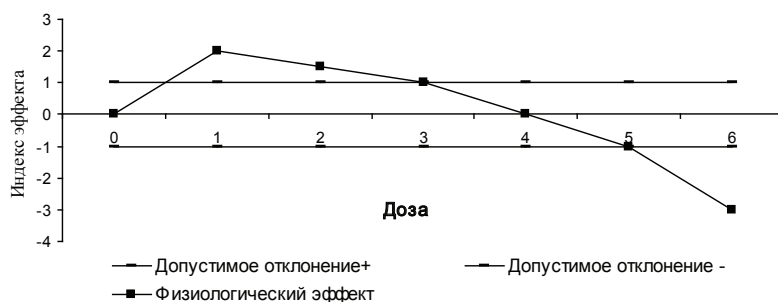


Рис. 6.1. Зависимость физиологического действия радиации от дозы

чая облучения: тотальное (общее) и локальное (местное, т. е. облучение отдельных органов и тканей). Органы и ткани обладают разной радиочувствительностью. Ряд радиоустойчивости по морфологическим изменениям: нервная ткань > костная ткань > мышечная ткань > соединительная ткань > щитовидная железа > пищеварительные железы > лёгкие > кожа > слизистые оболочки > половые железы > лимфоидная ткань, костный мозг. Молодые организмы более радиочувствительны, чем старые. Действие радиации зависит от вида излучения. При одной и той же дозе биологическое действие α -излучения сильнее, чем γ -излучения. Понижение температуры ведёт к уменьшению радиобиологического эффекта. Улучшение питания организма повышает радиоустойчивость. Чем меньше мощность дозы или чем больше заданная доза растянута во времени (непрерывно или дробно), тем меньше поражающее действие излучения.

6.4. Генетическое действие излучений

Структурные изменения в хромосомах, вызванные воздействием ионизирующих излучений, получили название *радиомутаций*. Их разделяют на соматические и гаметические. Примером соматических мутаций служит рак. По структурному возникновению различают точечные и абберационные мутации (гаплоиды, полиплоиды, дубликации, инверсии, транслокации и т. д.). По фенотипическому эффекту различают видимые и летальные мутации, по интенсивности проявления – доминантные, промежуточные, рецессивные. Как точечные, так и абберационные мутации могут быть обратимыми. Было установлено, что *число мутаций пропорционально дозе излучения*. Мутации возникают при любых дозах из-

лучения, у них нет пороговой величины. Мутации возникают как от прямого действия излучения (в основном точечные), так и от косвенного, поэтому число мутаций зависит от условий среды. Отмечена тенденция: растянутые и раздробленные дозы ведут к уменьшению числа мутаций. Установлено, что каких-либо специфических различий в действии γ - и β -излучений различных энергий не имеется. Нейтроны более эффективны в отношении генерации мутаций, поэтому сейчас в практике экспериментального мутагенеза широко используют потоки нейтронов.

Тестовые задания

1. За счёт какого вида ионизирующего излучения происходит в основном внешнее облучение организма:

- а) альфа-лучи;
- б) бета-лучи;
- в) гамма-лучи.

2. За счёт какого вида ионизирующего излучения происходит в основном внутреннее облучение организма:

- а) альфа-лучи;
- б) бета-лучи;
- в) гамма-лучи;
- г) рентгеновские лучи.

3. Как называется доза облучения, полученная организмом за малый промежуток времени:

- а) хроническая;
- б) острая;
- в) временная.

4. Радиочувствительность одних и тех же белков из разных биологических объектов:

- а) одинаковая;
- б) различается слабо;
- в) различается сильно.

5. Какое из приведенных веществ защищает ДНК хромосом при облучении:

- а) жиры;
- б) белки;
- в) углеводы.

6. В чём заключается косвенное действие радиации при облучении водных растворов биовеществ:

- а) распад молекул биовеществ;
- б) радиационно-химические акты превращения молекул биовеществ;
- в) реакция с продуктами радиолиза воды.

7. На какой стадии (согласно схеме А.М. Кузина) радиобиологического действия излучения происходит ионизация и возбуждение высокомолекулярных соединений субстрата клетки:

- а) физическая;
- б) химическая;
- в) биологическая.

8. На какой стадии (согласно схеме А.М. Кузина) радиобиологического действия излучения образуются радиотоксины в клетке:

- а) физическая;
- б) химическая;
- в) биологическая.

9. На какой стадии (согласно схеме А.М. Кузина) радиобиологического действия излучения происходят мутации в клетке:

- а) физическая;
- б) химическая;
- в) биологическая.

10. Чем характеризуется летальная доза облучения организма:

- а) образованием радиотоксинов;
- б) появлением мутаций;
- в) гибелью организма.

11. Как называются любые изменения в нормальной жизнедеятельности живого организма, возникающие под действием радиации:

- а) модификации;
- б) радиобиологические эффекты;
- в) мутации.

12. Что происходит с белковым обменом в организме под воздействием радиоактивного излучения:

- а) усиливается анаболизм;
- б) усиливается катаболизм;
- в) не изменяется.

13. Какие из перечисленных клеток животного организма наиболее радиочувствительны:

- а) нервные клетки;
- б) мышечные клетки;
- в) клетки красного костного мозга.

14. Как называется процесс восстановления нарушенной под действием радиации хромосомы:

- а) аберрация;
- б) реституция;
- в) синопсис.

15. Какие из перечисленных организмов наиболее радиоустойчивы:

- а) простейшие;
- б) пресмыкающиеся;
- в) млекопитающие.

16. Какие дозы радиоактивного излучения угнетают физиологические функции организма растений:

- а) любые;
- б) малые;
- в) большие.

17. Чем характеризуется критическая доза облучения организма:

- а) радиобиологическим эффектом;
- б) развитием лучевой болезни;
- в) гибелью организма.

18. При какой температуре радиобиологические эффекты у растений будут проявляться в меньшей степени:

- а) 30°C;
- б) 15°C;
- в) 5°C.

19. Какой из видов излучения наиболее эффективен в генерации мутаций:

- а) бета-лучи;
- б) нейтроны;
- в) гамма-лучи.

7. ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА РАСТЕНИЕ

7.1. Общие закономерности

Эффект облучения отдельных органов растений и животных принципиально различен. Взаимосвязь разных органов у животных теснее, чем у растений, поэтому поражение отдельных внутренних органов животных ведёт к гибели всего организма. Кроме того, восстановительные процессы в замещении повреждённых тканей и органов в результате размножения выживших клеток в растениях имеют большее значение, чем у животных. Отличительная черта высших растений (в отличие от позвоночных животных) состоит в том, что органогенез у них не ограничивается эмбриональным периодом, а протекает в течение всей жизни. Это возможно благодаря наличию у растений эмбриональных тканей – *меристем*, сохраняющих способность к клеточному делению на протяжении всего онтогенеза. Для этих тканей характерна очень высокая чувствительность к действию повреждающих факторов, включая ионизирующие излучения. Радиочувствительность меристем в десятки и сотни раз больше, чем у дифференцированных и специализированных тканей. Радиационное поражение меристем приводит к повреждению всего растения, а гибель этих тканей – к гибели всего организма. Именно поэтому меристемы растений принято называть *критическими тканями*. Способность меристем сохранять постоянный клеточный состав и поддерживать нормальные темпы клеточного деления определяет реакцию растения на облучение. Повреждение меристематических тканей

на клеточном уровне находит отражение в эффектах на организменном уровне (связаны с нарушением ростовой активности: торможение роста, темпов развития, уменьшение выживаемости растений к концу вегетационного периода). Поэтому по таким визуально видимым после облучения признакам, как изменение размеров растения, отдельных органов, их количества, массы вещества, можно судить о действии излучения на растение в целом. Визуально обнаруживаемый эффект угнетения ростовых процессов у растений проявляется после разового облучения обычно в первые 5–7 суток. У злаковых культур, облучённых дозой 2 000–3 000 рад, наблюдается торможение роста главного побега в высоту вследствие подавления митотической активности в меристемах узлов стебля. В дальнейшем, из-за снятия апикального доминирования, происходит активация покоящихся центров и начинается рост боковых побегов. У злаковых растений это выражается в мощном кущении, у двудольных усиливается ветвление. При облучении злаковых культур часто наблюдается увеличение вегетативной массы. Так, при остром облучении пшеницы в фазе развития 2–4 листа дозой 2 000–3 000 рад общая кустистость может повышаться в 3 раза. Хроническое облучение в некоторых случаях способствует почти 25-кратному увеличению кущения, это приводит к увеличению вегетативной массы к моменту уборки почти в 6 раз. В ряде случаев действие больших доз повышает темпы развития растения вследствие активации процессов старения (растения быстрее зацветают и созревают).

Заметные генетические повреждения выявляются при облучении вегетирующих растений дозами 30–50 Гр (3 000–5 000 рад): здесь часто проявляются хлорофилльные мутации. Многообразны и морфологические типы

мутаций. У пшеницы встречаются: высоко- и низкорослые, карлики, полукарлики, растения с ветвящимися или стелющимися стеблями, с вегетативным стеблем, появляющимся из наземных узлов. Изменяется форма и размер листьев, исчезает восковой налёт и т. д. Для многих сельскохозяйственных культур зависимость числа хромосомных aberrаций от дозы излучения носит линейный характер, свидетельствуя о беспороговости этой реакции. При действии на семена или вегетирующие растения дозами в диапазоне 10^4 – 10^5 Гр (10^6 – 10^7 рад) наступает так называемая *гибель под лучом*. Острое лучевое поражение приводит к отмиранию растения через несколько часов после облучения.

Пострадиационное восстановление растений охватывает все уровни организации растительного организма (от молекулярного до организменного) и может осуществляться путём ускоренного синтеза новых молекул или воспроизводства клеток взамен поражённых и погибших. Важное значение для восстановления продуктивности культуры при облучении растений имеет *регенерационное восстановление*: за счёт покоящихся тканей и органов развиваются побеги и формируются новые части растений, практически лишённые признаков лучевого поражения. В этом заключается уникальная способность растительного организма достигать частичного или даже полного восстановления жизнедеятельности. Например, при облучении молодых растений пшеницы дозой 12 Гр продуктивная кустистость увеличивается в 2 раза, это приводит к увеличению урожая зерна. Дозу облучения вегетирующих растений, при которой наблюдается эффект снятия апикального доминирования, принято считать *критической*. Для бобовых она составляет около 5 Гр, для пшеницы – 8–12, для ячменя – не более

4, для овса – 6–16 Гр. Пострадиационное восстановление растений – это тоже радиационный эффект.

7.2. Радиочувствительность растений

Ионизирующее излучение вызывает у растений различную реакцию. Радиочувствительность растительного организма изменяется в широком интервале доз облучения и зависит от его биологических особенностей, возраста, физиологического состояния, интенсивности обмена веществ, условий произрастания и ряда других факторов. Для определения радиочувствительности широко используют следующие критерии: энергию прорастания семян, лабораторную и полевую всхожесть, выживаемость проростков, подавление роста и развития, стерильность растений, число аберраций хромосом в первом митозе, угнетение митотической активности, интенсивность синтеза ДНК, появление радиоморфозов, выживаемость растений, снижение их массы. Однако оценка радиочувствительности по какому-либо одному критерию даёт представление лишь о реакции конкретной системы, это не может соответствовать уровню общей радиочувствительности организма, поэтому только анализ комплекса показателей с учётом особенностей изменения каждого из них может обеспечить адекватную оценку радиоустойчивости. Наиболее подходящим критерием радиочувствительности сельскохозяйственных растений принято считать *выживаемость растений к концу вегетационного периода*. Этот показатель отражает реакцию популяции на воздействие излучений как фактора стресса. В данном случае учитывается способность тканей к регенерации и репарации радиационных повреждений. В качестве показателя выживаемости об-

лучённых растений или растений, выращиваемых из облучённых семян, используется летальная доза облучения LD_{100} и LD_{70} , доза LD_{70} считается критической при облучения семян и применяется чаще.

Чувствительность клеток при облучении зависит от их возраста, температуры, парциального давления кислорода, фазы, цикла деления, метаболического состояния, оводнённости, интенсивности митоза. С увеличением числа хромосом у растений повышается их радиорезистентность. У некоторых растений радиочувствительность обусловлена размером ядра: чем оно больше, тем сильнее повреждения. Наблюдается также довольно тесная зависимость между радиочувствительностью сухих семян при остром их облучении, объёмом ядер клеток и числом хромосом при условии одинакового содержания в них воды. Растения с одним и тем же средним объёмом ядра, но с разным числом хромосом, различаются по радиочувствительности (с большим числом хромосом — более радиоустойчивы). Установлено, что растения с малым числом хромосом и крупными ядрами более радиочувствительны, чем полиплоиды и растения с большим числом хромосом и мелкими ядрами. На радиочувствительность растений влияет скорость деления клеток. При замедленном делении увеличивается время облучения активного состояния ядра и усиливается радиационное поражение. Поэтому факторы внешней среды, действующие на скорость роста растений путём изменения темпа деления клеток, влияют на радиочувствительность растительных организмов. Среди высших растений наблюдаются большие различия в радиочувствительности (табл. 7.1). Повреждение растений при остром облучении обычно наступает при меньших дозах, чем при хроническом облучении. Сильное угнетение роста сосны наблю-

дается при остром облучении в 30 раз меньшей дозой, чем при хроническом облучении, а гибель – при дозе в 16 раз меньшей.

Таблица 7.1

Радиочувствительность различных видов растений

Виды растений	Продолжительность облучения, нед	Мощность дозы, Р/сут		
		видимое повреждение отсутствует	среднее повреждение	сильное повреждение
Сосна	10 сезонов	0,75	1	3,5
Лилия	8	10	20	40
Традесканция	12	15	20	40
Бобы конские	15	30	60	90
Хлопчатник	15	25	110	250
Махорка	15	50	100	400
Хризантема	12	215	430	870
Росичка кроваво-красная	12	700	1 000	1 800
Гладиолус	12	800	1 500	5 000
Ожека при-острённая	12	1 720	2 610	6 000

Полиплоидные виды более устойчивы к радиации, чем диплоиды. При хроническом облучении имеет важное значение общая доза, накопленная за митотический цикл, на продолжительность которого влияет температура окружающей среды. При более высокой температуре клетки делятся быстрее, а при пониженной – медленнее, поэтому в зависимости от температуры изменяются длительность митотического цикла и общая доза облучения. Семена более устойчивы к облучению, чем растения (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Дозы, вызывающие 100 %-ю гибель семян

Виды растений	Доза, тыс. рад
Бобы конские	10
Кукуруза	15
Пшеница	15
Конопля	25
Гречиха	25
Люпин синий	50
Овёс	50
Клевер красный	100
Клещевина	100
Редис розовый	300
Горчица белая	400

7.3. Радиационная стимуляция

При воздействии излучения в интервале невысоких доз (5–10 Гр для семян и около 1–5 Гр для вегетирующих растений) темпы роста и развития растений ускоряются. Это явление носит название *радиостимуляции*. Феномен радиационной стимуляции роста и развития растений хорошо изучен на многих видах культурных растений с облучением семян различными дозами γ - или рентгеновского излучения. Облучение семян бобовых (горох, фасоль, соя) и других культур в дозах 0,5–2 Гр положительно влияет на рост, развитие растений и величину урожая. Небольшие дозы γ - и β -излучений вызывали стимулирующий эффект у более 20 различных видов культурных растений (пшеница, ячмень, овёс, просо, гречиха, свёкла, лён и др.) в полевых опытах и полупроизводственных посевах. При воздействии α -излучения стимуляции не наблюдается. Напротив, в сравнительно невысоких дозах α -излучение действует угнетающе. Эффекты радиационной стимуляции семян злаковых культур проявляются

в виде ускорения прорастания семян, усиления роста, более интенсивного нарастания биомассы корней и побегов, ускоренного прохождения фенофаз и сопряжённого периода вегетации, повышения зерновой продуктивности и улучшения качества урожая. При облучении семян подбор оптимальных доз γ -излучения для стимуляции сопряжён с трудностями, так как качество семян влияет на выбор дозы. Почвенно-климатические условия выращивания и уровень агротехники модифицирует проявление радиостимуляционных эффектов. По величине стимулирующей дозы облучения семян виды культурных растений различаются более чем в 20 раз, а для семян в пределах вида она колеблется от 2 до 10–15 раз (табл. 7.3).

Таблица 7.3

Стимулирующие дозы облучения семян

Виды растений	Стимулирующая доза, Гр
Горох	3–10
Кукуруза	5–10
Рожь	10
Пшеница	25
Дыня	40
Томаты	2,5–10
Хлопчатник	5–30
Огурцы	3–40
Люпин	40–160
Морковь	20–40
Лён	20
Капуста	2,5–80
Клевер	5–40
Редис	10

Проростки и вегетирующие растения более чувствительны к действию излучений, чем семена, что обуславливает и гораздо меньшие дозы, стимулирующие их рост и развитие. Стимулирующая доза для молодых

растений в фазе активного метаболизма в 10–15 раз меньше, чем для покоящихся семян. Например, оптимальные стимулирующие дозы для семян гороха и кукурузы составляют 5 и 10 Гр соответственно, а для вегетирующих растений – 0,35 и 0,5 Гр.

7.4. Продуктивность и качество урожая облучённых растений

В классических работах биологические эффекты при облучении семян и вегетирующих растений оцениваются обычно по величинам LD_{50} , LD_{10} или LD_{100} , их рассчитывают по выживаемости растений к концу вегетации. В то же время опыт прикладных исследований показывает, что у большинства сельскохозяйственных культур дозы радиации, вызывающие гибель 50–70% растений, приводят к полной потере продуктивности. Поэтому для характеристики степени устойчивости растений к потере продуктивности при облучении наибольшее распространение приобретает параметр $УД_{50}$, который соответствует дозе, вызывающей снижение урожайности на 50%. В зависимости от целей исследований применяются также $УД_{10}$, $УД_{30}$, $УД_{100}$. Разница между LD_{50} и $УД_{50}$ для одного и того же вида растений может достигать 10 раз и более.

Наибольшая чувствительность растений к облучению наблюдается в репродуктивный период, особенно в фазе выхода в трубку. Исключение составляет овёс (табл. 7.4).

Облучение растений в наиболее радиочувствительный период – кушение и выход в трубку приводит к отмиранию конуса нарастания главного побега и снятию апикального доминирования. В результате за счёт усиления продуктивной кустистости происходит заметная компен-

Таблица 7.4

**Среднее $УД_{50}$ для злаковых культур при острой дозе
 γ -излучения вегетирующих растений, Гр**

Фазы развития в момент облучения	Культура						
	озимая пшеница	яровая пшеница	озимая рожь	яровая рожь	яровой и озимый ячмень	овёс	рис
Всходы	50	60	35	35	30	45	-
Кущение	20	35	30	20	20	30	-
Выход в трубку	8	13	4	4	8	16	75
Колошение	25	24	20	15	12	10	160
Цветение	35	40	35	35	30	35	-

сация потерь урожая зерна. При облучении вегетирующих растений важнейших злаковых культур в период их наибольшей чувствительности к облучению (в фазе выхода в трубку) потери урожая зерна находятся в прямой зависимости от радиоустойчивости культуры (табл. 7.5).

Под действием облучения уменьшается не только количество зерна в урожае, но заметно изменяется и его качество. Обычно зерно с облучённых растений оказывается щуплым. Это обусловлено снижением содержания крахмала в эндосперме, где его в норме 80% массы зерновки. Это влияет на общий выход клейковины и её качество, ухудшает хлебопекарные качества муки.

При облучении пшеницы в фазах выхода в трубку – колошения и молочной спелости дозой до 20 Гр хлебопекарные качества муки остаются удовлетворительными. Воздействие излучений на вегетирующие растения вли-

Таблица 7.5

**Влияние γ -излучения на урожай зерновых культур
при облучении их в фазе выхода в трубку, % к контролю**

Культура	Доза γ -излучения, Гр							
	7,5	12,5	17,5	25	35	50	80	125
Яровая и озимая пшеница	85	70	50	25	10	0	0	0
Рожь	50	20	0	0	0	0	0	0
Озимый и яровой ячмень	85	70	50	25	10	0	0	0
Овёс	100	95	80	60	40	25	0	0
Просо	100	100	100	100	80	60	40	0

яет на посевные качества сформировавшихся из них семян. Как правило, снижается энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян. Максимальное уменьшение всхожести семян у яровой пшеницы отмечается при облучении в фазе колошения и цветения. Полная утрата посевных свойств семян достигается облучением 50–70 Гр в фазе цветения–молочной спелости.

Продуктивность облученных сельскохозяйственных культур подвержена существенному влиянию погодных условий, ухудшение которых, как правило, усиливает ингибирующее влияние облучения на ростовые процессы. В опыте с острым γ -облучением яровой пшеницы ухудшение погодных условий усиливало радиационную депрессию урожая до 4 раз. В целом уменьшению повреждающего действия излучений способствует понижение температуры и повышение относительной влажности воздуха в пострadiационный период. Повышение температуры и снижение относительной влажности воздуха в пострadiационный период, напротив, усиливает отрицательное действие излучения, и растения умень-

шают зерновую продуктивность при более низких дозах облучения. Модифицирующее действие температуры и влажности воздуха зависит от биологических особенностей культуры или сорта.

Тестовые задания

1. Какие из приведенных тканей растений наиболее радиочувствительные:

- а) механические ткани;
- б) проводящие ткани;
- в) меристемы.

2. Что наблюдается у растений злаковых культур при облучении их большими дозами радиации:

- а) усиленный рост главного побега;
- б) усиленное кущение;
- в) увеличение вегетационного периода.

3. Как изменяется радиоустойчивость растений с увеличением числа хромосом в ядрах клеток:

- а) повышается;
- б) снижается;
- в) не изменяется.

4. Какие дозы облучения вызывают гибель растений при остром облучении по сравнению с хроническим:

- а) большие;
- б) меньшие;
- в) одинаковые.

5. Какая из форм растения является наиболее радиоустойчивой:

- а) сухие семена;

- б) проростки;
- в) вегетирующее растение.

6. Какой из видов радиоактивного излучения не вызывает радиационной стимуляции роста и развития растений:

- а) альфа-излучение;
- б) бета-излучение;
- в) гамма-излучение.

7. Что является определяющим при подборе оптимальной стимулирующей дозы гамма-излучения для облучения семян растений:

- а) размер семян;
- б) масса 1000 семян;
- в) качество семян.

8. Какая из фаз развития злаковых культур является наиболее радиочувствительной:

- а) всходы;
- б) выход в трубку;
- в) цветение.

9. Какое из погодных явлений уменьшает повреждающее действие излучений на вегетирующее растение:

- а) повышение температуры;
- б) снижение температуры;
- в) снижение относительной влажности воздуха.

8. ВОВЛЕЧЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ЗЕМЛЕДЕЛИЕ

8.1. Отложение радионуклидов на поверхность земли

Находящиеся в атмосфере радиоактивные частицы (образующиеся после взрыва ядерных зарядов) постепенно оседают на поверхность земли. Различают «мокрое» и «сухое» отложение. Первый процесс – выпадение радионуклидов с дождём, снегом на поверхность земли, а второй – выпадение самих аэрозольных частиц под действием силы тяжести. Количественное соотношение между «мокрым» и «сухим» отложением зависит от климатических условий. В умеренных широтах с осадками выпадает больше радионуклидов, чем за все дни без осадков (примерно в 9 раз). Скорость отложения радиоактивных продуктов принято выражать в милликюри на километр квадратный площади за единицу времени. Радиоактивные продукты, оседающие на поверхность земли, кумулятивно откладываются в почвах (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Отложение ^{90}Sr на поверхность Земли в 1956–1960 гг.

Годы	Кумулятивное отложение, $\times 10^6$ Ки
1956	$0,9 \pm 0,4$
1957–1958	$2,7 \pm 1,0$
1959	$4,8 \pm 1,6$
1960	$5,7 \pm 1,7$

К концу 1960 г. на поверхность Земли осело в общей сложности $5,7 \pm 1,7 \cdot 10^6$ Ки ^{90}Sr . По мере увеличения общего количества стронция-90 в атмосфере повышались кумулятивные запасы этого нуклида в почве. В период проведения испытаний ядерного оружия в атмос-

фере повысилось содержание радионуклидов, причём содержание цезия-137 было примерно в 2,5 раза больше, чем стронция-90. Так как испытания производились в основном в северном полушарии, а радиоактивные аэрозольные частицы сначала распространяются вдоль широты своего появления, то в северных широтах выпадает больше радионуклидов, чем в южных (рис. 8.1).

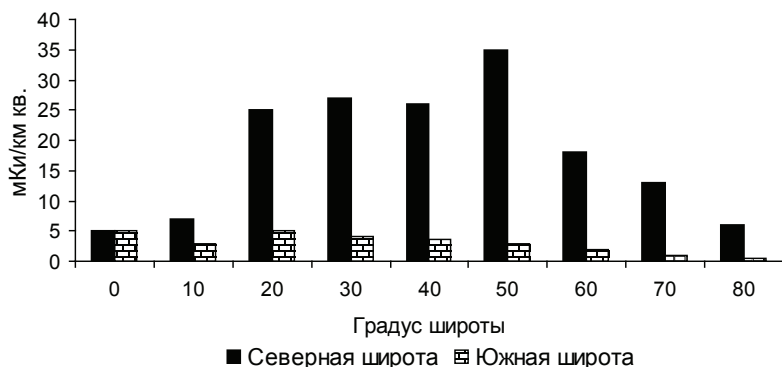


Рис. 8.1. Широтное распределение стронция-90 в почве (1956–1960 гг.)

Кумулятивные запасы радиоактивных продуктов в почвах определяют одним из двух методов: 1) путём измерения скорости выпадения в течение длительного времени; 2) путём радиохимического разделения нуклидов в пробах почвы. Первый метод применяют для короткоживущих изотопов, например, йода-131, бария-140. Вторым методом является более точным и обычно применяется для определения стронция-90 и других долгоживущих нуклидов.

Отбор верхнего слоя почвы для радиохимического анализа является основным методом получения образца с кумулятивным накоплением радиоактивных выпадений. Место для взятия образца почвы в заданном районе

должно находиться, как правило, на равнинном участке с хорошим травяным покровом. Когда задачей является определение количества выпавших радиоактивных осадков на данной территории, растительность и органические остатки необходимо анализировать вместе с почвой. Травяной покров адсорбирует радиоактивные выпадения, оседающие на поверхность, и может служить индикатором радиоактивного загрязнения.

В приземном слое воздуха радиоактивные аэрозоли включаются в состав витающей и оседающей пыли и атмосферных осадков. Первая из них (пыль) улавливается аспирационным методом, остальные (осадки) – седиментационными методами (осаждение).

Аспирационный метод – это пропускание воздуха через фильтр в течение определённого времени. Фильтром служит ткань ФПП, выполненная из перхлорвинила на марлевой подложке. Собранные воздушно-фильтровые пробы озолют, золу взвешивают и определяют её суммарную β -активность. Золу, полученную от озоления фильтров, собранных в течение месяца, ссыпают и определяют в ней стронций-90 и цезий-137. Данные аспирационного метода являются абсолютными, они показывают активность аэрозолей в определённом объёме воздуха (Ки/м³).

Седиментационные методы позволяют получать показатели относительной активности «сухих» и «мокрых» осадков, выпавших на единицу площади за определённое время, например милликюри на 1 км² в месяц.

8.2. Поведение радиоактивных продуктов деления в почвах

Способность почв и грунтов сорбировать микроколичества различных радионуклидов оказывает боль-

шое влияние на характер миграции радиоактивных выпадений в биологическом круговороте веществ. Сорбция радиоизотопов почвами препятствует их продвижению по профилю почвы, проникновению в грунтовые воды и обуславливает аккумуляцию их в верхних горизонтах почвы. На обрабатываемых почвах радионуклиды задерживаются в основном в пахотном слое, а на естественных лугах, пастбищах, целинных участках земли – обычно в самом верхнем слое (0–5 см). С точки зрения миграции попавших в почву радионуклидов и их вовлечения в биологический круговорот, процесс поглощения их почвами имеет двойное значение. Во-первых, сорбция почвами, как правило, снижает размеры поступления радионуклидов в растение. Во-вторых, аккумуляция сорбированных изотопов в верхнем слое почвы, где наиболее распространены корни растений, способствует их поглощению растениями, т. е. большему накоплению в урожае (чем при свободном передвижении изотопов в более глубокие слои почвы или в подпочву). Различные изотопы по-разному сорбируются почвами, но это часто не оказывает существенного влияния на поступление их в надземную часть растения. Например, радионуклиды цирконий-95, ниобий-95, рутений-106, церий-144, иттрий-91 в основном концентрируются в корневой системе растений, тогда как стронций-90 и цезий-137 легко проникают из водного раствора в корни растений, а из корней передвигаются в наземные органы. Вот почему сорбция почвами оказывает большое влияние на переход этих нуклидов из почвы в растение и накопление их в урожае. В результате поглощения почвами цезия-137 и стронция-90 их поступление в растение снижается (снижение поступления цезия-137 больше, чем стронция-90). Поступление радиоизотопов стронция-90 и цезия-137 в растение зависит от

типа почвы и от тех изменений и свойств, которые связаны с её поглотительной способностью.

В процессе поглощения микроколичества радиоизотопов не конкурируют за места на поверхности сорбента, так как по отношению к ним насыщенность сорбента всегда остаётся низкой. Общим для поведения в почвах стронция-90, цезия-137 и других изотопов является почти полное поглощение их твёрдой фазой почвы. Более резкие различия в поведении изотопов проявляются при сравнении их способности к десорбции, т. е. вытеснению из поглощённого состояния катионами нейтральных солей. Например, цирконий-95 и рутений-106 практически не вытеснялись CaCl_2 . Наиболее сильно десорбировался (80–100 %) стронций-90, значительно меньше (12–30 %) цезий-137, отсюда следует, что цезий-137 сильнее закрепляется в почве, чем стронций-90. На разных почвах способность к десорбции поглощённых изотопов стронция-90 и цезия-137 неодинакова. Десорбция наиболее выражена на дерново-подзолистой супесчаной почве и краснозёме, и меньше всего – на чернозёме и пойменной дерново-карбонатной почве.

С увеличением концентрации сопутствующих катионов в растворе уменьшается количество стронция-90 и цезия-137, сорбированных твёрдой фазой почвы. Так, с увеличением концентрации раствора хлористых солей кальция и калия сорбция радиостронция и радиоцезия твёрдой фазой почвы снижается. Почвы с большим содержанием гумуса, как правило, обладают высокой способностью к сорбции радиоактивных продуктов деления. С добавлением в почву органического вещества повышается прочность закрепления радионуклидов. Под влиянием извести и перегноя радионуклиды стронций-90 и цезий-137 из поглощённого состояния вытесняются

слабее, чем из почвы без добавления извести и перегноя. Систематическое применение минеральных удобрений без навоза практически не изменяло прочность закрепления поглощённых почвой радионуклидов. Длительное применение навоза совместно с минеральными удобрениями повысило прочность закрепления в почве радионуклидов.

Сорбционные процессы радионуклидов в почве в значительной мере определяются их гранулометрическим составом. Это объясняется тем, что ёмкость поглощения почвы зависит от содержания в ней высокодисперсных частиц. Отличительной способностью высокодисперсной части почвы является большая величина поверхности её частиц. С уменьшением размера частиц увеличивается их число и поверхность на единицу массы почвы. Суммарная поверхность во фракции ила с диаметром частиц $\approx 0,001$ мм составляет $23\,000\text{ см}^2$, а частиц, имеющих диаметр $0,0001$ мм, – $230\,000\text{ см}^2$ на 1 г. Почвы, содержащие большое количество высокодисперсных частиц ($< 0,001$ мм), характеризуются высокой ёмкостью поглощения. С уменьшением размеров частиц снижается содержание окиси кремния и возрастает количество окислов железа и алюминия, повышается содержание гумуса и обменных катионов Ca, Mg и K. Наибольшим содержанием органического вещества обладают мелкопылевидные и илистые частицы. В более крупных фракциях почвы содержание гумуса резко падает, а в мелком песке гумуса практически нет, поэтому поведение микроколичеств радионуклидов в почве зависит от её гранулометрического состава. Тяжёлые почвы сильнее закрепляют поглощённые радионуклиды, чем лёгкие почвы с низким содержанием высокодисперсных частиц. Наиболее прочно закрепляются радиоизотопы илистой фракцией почвы.

Почвы в зависимости от их минералогического состава обладают неодинаковой сорбционной способностью. Минералогический состав почв оказывает большое влияние на полноту сорбции радиоактивных продуктов деления и прочность их закрепления в почвах.

Для характеристики сорбционных процессов в почвах радиоактивных продуктов деления пользуются *коэффициентом распределения* (K_p) между твёрдой и жидкой фазами почвы:

$$K_p = \frac{a_0 - a_1}{a_1} \cdot \frac{V}{d},$$

где a_0 и a_1 – активность раствора до и после сорбции; V – объём раствора; d – навеска сорбента. Коэффициент распределения представляет собой отношение радиоактивного сорбированного изотопа в 1 г почвы к количеству радионуклида, остающегося в 1 мл раствора после установления равновесия между раствором и почвой.

Представляет интерес изучение совместного поведения микроколичеств радиоактивных нуклидов и их химических аналогов, которые обычно присутствуют в почве в макроколичествах. Известно, что Са является элементом, сходным по своим химическим свойствам со ^{90}Sr , а химическим аналогом ^{137}Cs является К. При сорбции почвами ^{90}Sr и ^{45}Ca из раствора CaCl_2 практически не меняется соотношение между ^{90}Sr и ^{45}Ca , т. е. эти 2 элемента одинаково поглощаются почвами. В процессе поглощения почвами ^{137}Cs и ^{42}K (из раствора KCl) ^{137}Cs сорбируется твёрдой фазой почвы значительно быстрее и полнее, чем ^{42}K , поэтому соотношение между этими элементами в растворе после сорбции почвой резко отличается от соотношения их в исходном растворе. Следовательно, поглощение радиоактивных продуктов деления,

вытеснение их из поглощённого состояния представляет сложный процесс и обусловливается такими свойствами почвы, как состав поглощённых катионов, реакция почвенного раствора, содержание органического вещества, гранулометрический и минералогический состав почвы и др. Кроме того, процессы сорбции продуктов деления в почвах зависят от физико-химических свойств отдельных изотопов, а иногда и от химических соединений, в которых изотопы попадают в почву, поэтому почва, в зависимости от её свойств, может неодинаково задерживать глобальные выпадения радионуклидов. От прочности закрепления радиоактивных продуктов деления в почвах в значительной степени зависит и миграция их по профилю почвы. Например, на лёгких по гранулометрическому составу почвах радионуклиды будут мигрировать на большую глубину, чем на тяжёлых почвах.

8.3. Миграция радионуклидов в почве

Под миграцией радионуклидов в почве понимается совокупность процессов: перемещение радионуклидов в почве, перераспределение между различными фазами и состояниями, перераспределение радионуклидов по глубине и в горизонтальном направлении. К движущим силам, приводящим к миграции радионуклидов в почвах, относятся: 1) конвективный перенос (фильтрация атмосферных осадков вглубь почвы, капиллярный подток влаги к поверхности в результате испарения, термоперенос влаги под действием градиента температуры); 2) диффузия свободных и адсорбированных ионов; 3) перенос по корневым системам растений; 4) перенос на мигрирующих коллоидных частицах; 5) роющая деятельность почвенных животных; 6) хозяйственная

деятельность человека. Перечисленные факторы не являются равнозначными, так как интенсивность и продолжительность их действия различны и зависят от конкретных условий. Качественное различие в характере действия двух наиболее важных факторов – конвективного переноса с током влаги и диффузии – состоит в следующем: если в начальный момент времени радионуклид находится в очень тонком поверхностном слое почвы и в процессе миграции извне не поступает, то первый из этих факторов (конвективный перенос) приводит к перемещению зоны нахождения радионуклида со смещением максимума концентрации радионуклида вглубь почвы. Диффузионный характер миграции радионуклида вызывает расширение зоны его нахождения с одновременным уменьшением величины максимума концентрации. Значимость переноса радионуклидов по корневым системам растений зависит от глубины распространения и густоты корней в почве, физико-химических свойств радионуклидов, биологических особенностей растений и т. д.

Конвективный перенос и диффузия радионуклидов тесно связаны с поглощением и прочностью их закрепления твёрдой фазой почвы. Конвективный перенос характерен для водорастворимой и (частично) обменной форм радионуклидов. Диффузионный перенос и перенос по корневым системам растений характерны для водорастворимой и обменной форм радионуклидов. Механический перенос на коллоидных частицах или передвижение в результате роющей деятельности почвенных животных присущи для всех форм (водорастворимой, обменной, прочнофиксированной) радионуклидов.

Тестовые задания

1. Каково количественное соотношение между «мокрым» и «сухим» отложением радионуклидов на поверхность земли в умеренных широтах:

- а) 1 : 1;
- б) 9 : 1;
- в) 1 : 4.

2. На каких широтах северного полушария земли произошло наибольшее кумулятивное накопление радиоизотопа стронция-90 в почве:

- а) 10–20° с. ш.;
- б) 40–50° с. ш.;
- в) 60–70° с. ш.

3. Каким методом определяется кумулятивный запас в почве короткоживущего радиоактивного изотопа йода-131:

- а) измерение скорости выпадения изотопа длительное время;
- б) радиохимическое разделение нуклидов в пробах почвы;
- в) электрохимический метод анализа.

4. Какой слой почвы необходимо брать для изучения кумулятивного накопления радиоактивных выпадений на лугах и пастбищах:

- а) верхний;
- б) средний;
- в) нижний.

5. Какое из свойств почвы препятствует передвижению радиоизотопов вглубь по профилю почвы:

- а) буферность;
- б) сорбция;
- в) структура.

6. Какой из приведенных радионуклидов наиболее сильно десорбируется хлористым кальцием:

- а) цирконий-95;
- б) цезий-137;
- в) стронций-90.

7. Как изменяется прочность закрепления в почве радионуклидов стронция и цезия при внесении в почву органического вещества:

- а) повышается;
- б) снижается;
- в) не изменяется.

8. Какой из перечисленных радионуклидов легко проникает в наземную часть растения из почвы:

- а) цирконий-95;
- б) церий-144;
- в) цезий-137;
- г) иттрий-91.

9. Какое влияние оказывает сорбция почвой стронция-90 и цезия-137 на переход этих радионуклидов из почвы в растение:

- а) повышает;
- б) снижает;
- в) не влияет.

10. В каких по гранулометрическому составу почвах радионуклиды будут мигрировать на большую глубину по профилю почвы:

- а) лёгкие;
- б) средние;
- в) тяжёлые.

11. Какой из перечисленных элементов является химическим аналогом стронция-90:

- а) калий;
- б) кальций;
- в) кремний.

9. ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В РАСТЕНИЕ

9.1. Количественные показатели накопления радионуклидов растениями из почвы

Для оценки поступления радионуклидов из почвы в растения используют различные показатели. Одним из наиболее широко применяемых является *коэффициент накопления*, или *коэффициент концентрации* (K_N , или $K_{\text{Н}}$) – отношение содержания радионуклида в единице массы растений и почвы соответственно. Близким к понятию K_N является почвенный *коэффициент пропорциональности* ($K_{\text{П}}$), который соотносит концентрацию радионуклидов в растении к площадному загрязнению почвы:

$K_{\text{П}}$ = концентрация радионуклидов в растениях, Бк/кг / плотность загрязнения, Бк/м².

В радиоэкологии вместо понятия коэффициент накопления (K_N) применяют иногда термин *коэффициент биологического поглощения* (КБП), с помощью которого сравнивают концентрации радионуклида в золе растений и почве.

Скорость переноса микроколичеств радионуклидов по трофическим цепочкам в природной среде (и в звене «почва – растение») зависит от содержания сопровождающих их носителей: изотопных (изотопы одного элемента – стабильный ^{88}Sr и ^{90}Sr) или неизотопных (^{90}Sr и стабильный ^{40}Ca). Часто роль неизотопных носителей для транспорта радионуклидов важнее, так как их количество гораздо больше. Например, концентрация ^{88}Sr в почве $2\text{--}3 \cdot 10^{-3}\%$, а Ca – 1,4%.

Для оценки переноса радионуклида относительно его стабильного макроносителя в трофических цепочках используют понятие *наблюдаемое отношение* (НО):

$$HO = \frac{[C_{\text{радионуклид}} / C_{\text{стабильный носитель}}]_{\text{растение}}}{[C_{\text{радионуклид}} / C_{\text{стабильный носитель}}]_{\text{почва}}}$$

где С – концентрация.

Между радиостронцием и кальцием в различных звеньях складывается определённое соотношение. Это отношение называют «стронциевая единица» (с. е.):

$$1 \text{ с. е.} = 1 \text{ пКи } ^{90}\text{Sr на } 1 \text{ г Ca.}$$

Коэффициентом дискриминации (КД) называют частное от деления величины стронциевых единиц в данной пробе на величину стронциевых единиц в предшествующем звене биологической системы:

$$КД = \text{с. е. в корнях растений} / \text{с. е. в почве.}$$

Аналогично этому введено понятие цезиевой единицы (ц. е.):

$$1 \text{ ц. е.} = 1 \text{ пКи } ^{137}\text{Cs на } 1 \text{ г К.}$$

Для оценки поступления ^{90}Sr в растение был предложен ряд показателей, учитывающих зависимость поведения этого радионуклида от концентрации в почве обменного кальция. *Показатель Фредрикссона* ($\Pi_{\text{ф}}$) соотносит концентрацию ^{90}Sr в растениях (по отношению к Са, т. е. в стронциевых единицах) к концентрации ^{90}Sr в почве:

$$\Pi_{\text{ф}} = \frac{^{90}\text{Sr}/\text{Са в растениях (Бк/г Са)}}{^{90}\text{Sr в почве (Бк/г почвы)}}$$

Показатель Клечковского ($K_{\text{кл}}$), или комплексный показатель, нормирует отношение содержания стронциевых единиц в растениях к плотности загрязнения почв ^{90}Sr , отнесённой к количеству обменного Са в почве:

$$K_{\text{кл}} = \frac{A_{^{90}\text{Sr}} \cdot A_{\text{I Ca}}}{A_{^{90}\text{Sr}} \cdot A_{\text{Ca}}},$$

где A_{Sr}^{90} – концентрация ^{90}Sr в растениях; A_{1Sr}^{90} – содержание ^{90}Sr в почве на единицу площади (плотность загрязнения), Бк/м²; A_{Ca} – концентрация Са в растениях, г/г; A_{1Ca} – концентрация обменного Са в почве, мг-экв/100 г.

Основным носителем радиоцезия является калий, но сходство в поведении у них при поступлении в растение меньше, чем у стронция и кальция. В связи с этим отношение цезия к калию используется в оценке транспорта радиоцезия значительно реже.

Радиоактивные продукты деления поступают в растение в основном двумя путями: 1) непосредственное загрязнение наземных частей растений находящимися в воздухе радиоактивными частицами; при этом радионуклиды могут адсорбироваться поверхностью тканей и проникнуть внутрь растения; 2) поступление радионуклидов, попадающих в почву, через корни. Непосредственное загрязнение наземных частей растения обусловлено только теми радионуклидами, которые выпадают из атмосферы на растения в течение вегетационного периода, тогда как поступление через корни зависит от количества радионуклидов в почве.

Растения могут выдерживать высокие дозы радионуклидов и способны в довольно больших количествах накапливать нуклиды в различных частях урожая (до 1 Ки на 1 кг соломы или зерна), поэтому при загрязнении почв может получаться продукция, непригодная для использования в пищу человеку или на корм скоту. В зависимости от среды (вода, песок, разные почвы), в которую попали радионуклиды, особенностей растений и физико-химических особенностей самих изотопов содержание их в урожае может сильно меняться.

9.2. Поступление радионуклидов в растения через корни

Механизм усвоения радионуклидов корнями растений сходен с поглощением основных питательных веществ – макро- и микроэлементов. Основное отличие состоит в том, что в большинстве случаев радионуклиды во внешней среде присутствуют в предельно низких концентрациях. Например, в весовом отношении 1 Ки ^{90}Sr составляет $7 \cdot 10^{-3}$ г. Поглощение растениями любого питательного элемента зависит от ряда факторов. Основными факторами, обуславливающими поступление иона через корни в растение, являются его химические свойства, концентрация в питательной среде и степень участия в метаболических процессах. Радиоактивные изотопы различных химических элементов с разной интенсивностью поступают в растение и неодинаково распределяются по отдельным его органам. Поглощение ионов состоит из трёх стадий: 1) ионы благодаря диффузии легко проникают в «свободное пространство» ткани корневых волосков, затем поступают в проводящие ткани корня путём активного переноса; 2) ионы проникают в проводящие ткани растения (одновалентные ионы поглощаются быстрее, чем многовалентные); 3) восходящее движение ионов по сосудистой ткани.

Радиоактивные изотопы Cs и Sr, как аналоги K и Ca, имеют много сходного в поступлении в растение и распределении по разным его органам. В наибольших количествах поступает из питательного раствора ^{137}Cs , несколько меньше ^{90}Sr . Такие изотопы, как ^{60}Co , ^{91}Y , ^{144}Cr , ^{95}Nb , ^{95}Zr , ^{106}Ru , поступают в надземную часть растений на порядок, на два и три порядка меньше (табл. 9.1).

Таблица 9.1

**Накопление радионуклидов в различных органах растений
пшеницы**

Изотоп	Коэффициент накопления изотопа в органах пшеницы			
	листья	стебли	колосья	зерно
^{137}Cs	230,60	50,70	61,70	36,50
^{90}Sr	57,70	10,50	5,70	3,40
^{60}Co	1,60	3,30	3,30	2,80
^{91}Y	0,65	0,08	0,14	0,00
^{95}Nb	0,46	0,16	0,00	0,00

Радиоактивные ^{137}Cs и ^{90}Sr при поступлении в растение через корни в относительно больших количествах накапливаются в наземных его органах. Другие изотопы концентрируются в течение всего вегетационного периода преимущественно в корнях. Закономерность распределения изотопа по органам растений заключается в том, что радионуклиды, поступающие в наземную часть растения, в основном концентрируются в соломе (листья и стебли), меньше – в мякине (колосья, метёлки без зерна) и относительно мало – в зерне. Поглощение радионуклидов растениями отстаёт от нарастания наземной массы, и накопление радионуклида на единицу массы сухого вещества с ростом растения снижается, но во время созревания – повышается. Поступление в растения радионуклидов, как правило, увеличивается с повышением их концентрации в растворе. Максимальное поглощение радионуклидов наблюдается при pH, близкой к нейтральной.

Радионуклиды сорбируются почвой и поэтому поглощаются растениями из почвы иначе, чем из водных растворов. Разные нуклиды с разной прочностью закрепляются в почве, например, изотопы Sr более подвижны в почве, чем другие. Процесс сорбции радионуклидов в почве является одним из факторов, влияющих

на переход их из почвы в растение. Все радионуклиды поступают в растение из почвы в меньшем количестве, чем из водного раствора (для ^{90}Sr – в 30 раз, для ^{137}Cs – в 700–1 300 раз). Сопоставление данных о поступлении в растения радионуклидов из водного раствора и почвы показывает значение взаимодействия изотопов с почвой как фактора, влияющего на их поступление в растение.

Особенности минерального питания, разная продолжительность вегетационного периода, характер распределения корневых систем в почве, различия в продуктивности и другие биологические особенности растений влияют на накопление радионуклидов разными видами и сортами сельскохозяйственных культур. Межвидовые различия в аккумуляции радионуклидов при корневом пути перехода могут достигать 10–30 раз. ^{90}Sr в 2–6 раз больше накапливается бобовыми культурами, чем злаковыми. Содержание ^{137}Cs выше в зернобобовых, чем в злаковых культурах. Коэффициент накопления ^{106}Ru и ^{144}Ce в различных видах растений отличается более чем в 100 раз. Влияние сортовых различий в накоплении радионуклидов менее значимо, чем видовых (предел колебаний 2–3 раза).

При возделывании сельскохозяйственных культур в разных регионах страны используются разнообразные способы агротехнической и агрохимической обработки почв. Способы обработки влияют на агрохимические и водно-физические свойства почвы, это изменяет размеры перехода радионуклидов в растения. В условиях орошаемого земледелия усиливается интенсивность круговорота радионуклидов в агроценозах. При поверхностном поливе накопление радионуклидов в растениях из почвы увеличивается в среднем в 1,5–3 раза по сравнению с богарными условиями. При непосредственном по-

ступлении радионуклидов из поливной воды в наземную часть растения (полив дождеванием) размеры перехода увеличиваются в 10–1 000 раз относительно богарных условий. При этом наблюдается интенсивное накопление в растениях радионуклидов, относительно мало подвижных при поступлении их из почвы. Так, содержание ^{137}Cs в озимой пшенице возрастает в 250–1 400 раз. Распределение радионуклидов в вертикальном профиле почв влияет на поглощение их растениями. Обработка загрязнённого верхнего слоя изменяет расположение его по отношению к основной массе корней и снижает накопление нуклида в растении. Равномерное распределение радионуклидов в пахотном слое может привести к 2- или 3-кратному ограничению их поступления в растение. Приём захоронения загрязнённого слоя почвы за пределы распространения основной массы корней уменьшает накопление нуклидов в 7–11 раз.

9.3. Поступление радионуклидов в растение через листья

Радиоактивные продукты деления, выпадающие из атмосферы на земную поверхность, могут поглощаться листьями сельскохозяйственных растений и накапливаться в них. Радионуклиды могут проникать в растение через поверхность листьев, перемещаться по всему растительному организму и накапливаться в хозяйственно-ценной части урожая. Выпадение радиоактивных аэрозолей на поверхность растений приводит к накоплению в их наземной массе всей совокупности радионуклидов, в то время как при корневом пути поступления радиоактивных веществ в растение почвенный поглощающий комплекс выступает в роли мощного сорбционного фак-

тора, а корневая система растений является селективным барьером, исключающим поступление в надземную фитомассу биологически инертных элементов.

Размеры загрязнения поверхности надземных органов растения радионуклидами, выпадающими из атмосферы, сильно варьируют в зависимости от метеорологических и погодных условий. Кроме того, величина адсорбции радионуклидов зависит от времени выпадения нуклидов, поверхности листьев и ряда других факторов. Интенсивность миграции этих радионуклидов по растению зависит от химических свойств радиоактивных продуктов. Наибольшей подвижностью отличается ^{137}Cs , он, попадая на листья, быстро перемещается внутри растения и может накапливаться в довольно больших количествах в зерне, клубнях картофеля, плодах огурцов и томатов. Содержание ^{90}Sr в растениях (при поступлении через листья) составляет сотые доли процента.

Накопление радионуклидов в урожае при их поступлении через листья различается в зависимости от биологических особенностей растения. Микроколичества ^{90}Sr и ^{137}Cs ведут себя так же, как и их химические аналоги Са и К. Известно, что К отличается большей подвижностью в растении, чем Са. Накопление в растениях радионуклидов при поступлении их через листья происходит в течение всего вегетационного периода. В процессе роста и развития растений повышается содержание нуклидов в урожае, максимум достигается в конце вегетации. Накопление радиоактивных продуктов деления в урожае в значительной мере определяется фазой развития растений, во время которой радионуклиды попадают на листья. При попадании нуклидов в растение на ранних сроках его развития происходит большее их накопление. Большое влияние на передвижение радиоактивных про-

дуктов по растению и накопление их в урожае оказывает возраст листьев, из которых в растения поступают нуклиды. Из молодых листьев они более интенсивно передвигаются по растению и больше их накапливается в ценной части урожая.

Для растений с закрытыми семенами (горох, кукуруза) роль механического загрязнения урожая радионуклидами независимо от срока их выпадения (в твёрдой фазе) на растения не имеет значения. Зерно гороха и кукурузы при выпадении ^{90}Sr на бобы и початок будет практически чистым. Клубни картофеля также могут оказаться чистыми при загрязнении ботвы картофеля ^{90}Sr , так как он слабо передвигается внутрь растения при поступлении через листья. Однако выпадение аэрозольных частиц ^{90}Sr из воздуха на поверхность растений для некоторых культур представляет опасность в плане загрязнения урожая. Это, прежде всего, овощные культуры, у которых товарная часть продукции не защищена (огурцы, томаты, капуста). Большую опасность при выпадении из атмосферы представляет ^{137}Cs , который, кроме механического загрязнения урожая, может быстро проникать в ткань листа, и передвигаясь внутрь растения, в относительно больших количествах накапливаться в урожае. Довольно интенсивно передвигается по растению при попадании на его поверхность и ^{131}I . Несмотря на сравнительно короткий период полураспада (8 дней), этот нуклид может проникать через корм животных в молоко, а через молоко и овощи – в организм человека. Уровень загрязнения растений радиоактивными нуклидами при прямом попадании на поверхность листьев, стеблей и репродуктивных органов определяется количеством свежих радиоактивных выпадений. Поступление же радиоактивных веществ из почвы через корни в растения зависит от общего количества

кумулятивного осадка радионуклидов в почве. Поэтому по мере продолжения глобальных выпадений радиоактивных нуклидов их количество в почве повышается, и степень загрязнения урожая увеличивается из-за поглощения радионуклидов растениями через корни из почвы.

Радионуклиды могут поступать в растение в результате подъёма ветром или дождём с почвенного покрова самих радиоактивных частиц или загрязнённых частиц почвы. Это явление называется *радиоактивным вторичным загрязнением растений*. Такой путь поступления в растение радионуклида особенно значим для тех из них, которые прочно фиксируются почвой или мало накапливаются при корневом поглощении растениями. Первым этапом при вторичном загрязнении является подъём частиц с подстилающей почвы. Этот процесс оценивают с помощью коэффициента ветрового подъёма: отношение концентрации радионуклида в воздухе на высоте 1 м к плотности загрязнения поверхности почвы:

$$K = C \text{ (Бк/м}^3\text{)} / S \text{ (Бк/м}^2\text{)}.$$

На подъём почвенных частиц влияет много факторов: скорость движения воздуха над поверхностью почвы, турбулентность, температура, давление, влажность и вязкость воздуха, шероховатость, структура, плотность и влажность почвы, содержание в ней органического вещества и т. п. Во время проведения сельскохозяйственных работ изменяется интенсивность ветрового подъёма почвенных частиц (вспашка, посев, боронование, культивация и т. п.). Помимо ветрового воздействия, поверхностное некорневое загрязнение растений почвенными частицами происходит также при забрызгивании нижних частей растения в процессе выпадения дождя. В ряде случаев подъём почвенных частиц с брызгами дождя

даёт существенное радиоактивное загрязнение листьев. Ливневый дождь может поднять до 225 т/га почвы (до 2,5 мг почвы на 1 г сырой массы растений). При этом до 90 % частиц почвы, поднимаемых каплями дождя, имеют размер <125 мкм. В большинстве случаев максимальная высота, на которую поднимаются частицы за счёт разбрызгивания дождём, не превышает 40 см. Разбрызгивание радиоактивных частиц с каплями дождя как источник загрязнения опасно для низкорослых видов растений (овощные культуры, пастбищные травы), тогда как для высоких растений роль этого пути загрязнения незначительна.

Тестовые задания

1. Как называется отношение содержания радионуклида в единице массы растения и почвы соответственно:

- а) коэффициент биологического поглощения;
- б) коэффициент накопления;
- в) почвенный коэффициент пропорциональности.

2. Как называется отношение концентрации радионуклида в растении к плотности загрязнения почвы этим радионуклидом:

- а) коэффициент биологического поглощения;
- б) коэффициент накопления;
- в) почвенный коэффициент пропорциональности.

3. Как называется отношение концентрации радионуклида в золе растения и в почве:

- а) коэффициент биологического поглощения;
- б) коэффициент накопления;
- в) почвенный коэффициент пропорциональности.

4. В какой из перечисленных почв коэффициент накопления стронция-90 для сельскохозяйственных культур имеет наибольшее значение:

- а) лёгкий суглинок;
- б) средний суглинок;
- в) тяжёлый суглинок.

5. В каких органах злаковых растений концентрация стронция-90 наибольшая:

- а) листья;
- б) стебли;
- в) зерно.

6. В каких органах злаковых растений концентрация цезия-137 наименьшая:

- а) листья;
- б) стебли;
- в) зерно.

7. Как изменяется концентрация радионуклида на единицу массы сухого вещества растения во время созревания:

- а) повышается;
- б) снижается;
- в) не изменяется.

8. Как изменяется концентрация радионуклида на единицу массы сухого вещества растения во время его роста:

- а) повышается;
- б) снижается;
- в) не изменяется.

9. При каком pH водного раствора происходит максимальное поглощение радионуклидов растениями:

- а) pH 6,0;

- б) рН 7,0;
- в) рН 8,0.

10. Как влияет полив на накопление радионуклидов в растениях:

- а) увеличивает;
- б) уменьшает;
- в) не влияет.

11. Какие радионуклиды накапливаются в наземной массе растений при выпадении радиоактивных аэрозолей на их поверхность:

- а) все;
- б) отдельные;
- в) никакие.

12. Как влияет глубокая вспашка почвы на накопление радионуклидов в растениях:

- а) увеличивает;
- б) уменьшает;
- в) не влияет.

13. Какой из приведенных радионуклидов, попадающий на листья растений, быстрее проникает внутрь и накапливается в органах растения:

- а) кобальт-60;
- б) стронций-90;
- в) цезий-137.

14. Урожай каких растений окажется загрязнённым радионуклидом стронций-90 при попадании его на поверхность растений:

- а) горох;
- б) кукуруза;
- в) томаты.

10. СНИЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА

10.1. Агрохимические способы

Снижение концентрации радионуклидов в урожае при внесении удобрений может быть обусловлено рядом причин. Во-первых, улучшением условий питания растений, связанным с этим увеличением биомассы и тем самым – «разбавлением» радионуклидов. Во-вторых, повышением концентрации в почве обменных катионов, в первую очередь – К и Са. В-третьих, усилением антагонизма между ионами радионуклидов и ионами вносимых солей при корневом усвоении. В-четвёртых, изменением доступности для корневых систем радионуклидов вследствие перевода их в труднодоступные соединения и обменной фиксации в результате реакции с вносимыми удобрениями. Эффективность внесения минеральных удобрений и известкования кислых почв, с точки зрения уменьшения содержания радионуклидов в урожае, зависит от плодородия почв: на бедных питательными веществами почвах, почвах лёгкого гранулометрического состава, почвах с небольшим содержанием гумуса – кратность снижения концентрации нуклида в растении существенно выше, чем на плодородных почвах. Это нужно учитывать.

Стронций-90. Эффективность химической мелиорации в отношении стронция-90 в урожае зависит от типа почвы. Его аккумуляция растениями на дерново-подзолистых почвах лёгкого гранулометрического состава в 20–60 раз выше, чем на тяжёлых суглинистых черно-

зёмах. Меньше всего стронций-90 поступает в растения под влиянием известкования и внесения удобрений на малоплодородных бедных гумусом и элементами минерального питания подзолистых, дерново-подзолистых и торфяных почвах, особенно лёгкого гранулометрического состава (на овсе в 2–2,5 раза). Совместное внесение азотных, фосфорных и калийных удобрений уменьшает содержание стронция в урожае на дерново-подзолистой почве в больших размерах, чем раздельное внесение. Эффективным способом на кислых малоплодородных почвах является внесение известковых удобрений (антагонизм кальция и стронция при усвоении). Внесение извести в кислую дерново-подзолистую почву снижает концентрацию стронция в зерне пшеницы в 2–3 раза, а в зависимости от биологических особенностей растения в 3–20 раз. Так, у бобовых содержание стронция в урожае снижается больше, чем у злаков.

Применение органических удобрений также уменьшает степень накопления стронция-90 растениями, причём наибольший эффект отмечается на почвах лёгкого гранулометрического состава. На бедных гумусом почвах внесение навоза снижает поступление стронция в урожай пшеницы и ячменя на 80%. При добавлении органического вещества в дерново-подзолистую супесчаную почву накопление стронция-90 в урожае растений уменьшается в 11 раз, а в дерново-подзолистую суглинистую – только в 2,5–3 раза. Максимальное уменьшение поглощения стронция-90 растениями наблюдается при совместном внесении в почву извести и органического удобрения. При ведении агропромышленного производства на загрязнённой радиоактивными веществами территории местные органические удобрения (навоз, компост, торф и др.) могут содержать радионуклиды в до-

вольно больших концентрациях, поэтому такие удобрения могут быть причиной вторичного загрязнения сельскохозяйственных угодий и в первую очередь огородов. Следует избегать их внесения на чистых участках почвы. Концентрация нуклида в местном удобрении не должна быть выше чем в 10 раз в соотношении с почвой. Целесообразно их применять в кормовых севооборотах, под технические культуры и под семеноводческие посевы.

Фосфорные удобрения и различные соли фосфорной кислоты существенно снижают поглощение стронция из почвы растениями (в 2–3 раза). Более заметное уменьшение концентрации стронция-90 в урожае наблюдается при внесении увеличенных доз фосфорных удобрений (в 5–8 раз). Внесение больших доз фосфатов калия и однозамещённого фосфорно-кислого кальция уменьшает содержание стронция-90 в урожае сельскохозяйственных культур в 4–20 раз. Однако количество удобрений при этом достигает 4–10 т/га, так что применять такие дозы можно в исключительных случаях на ограниченных территориях, например, в овощеводстве.

Улучшение калийного питания растений приводит к существенному уменьшению поступления стронция-90 в растение. Действие калия особенно чётко проявляется на дерново-подзолистой почве лёгкого гранулометрического состава (в 2–3 раза). Эффект от применения калийных удобрений заметно проявляется на почвах с низкой концентрацией обменного калия. Положительное влияние добавления калийных удобрений объясняется антагонизмом между калием и кальцием, с одной стороны, и кальцием и стронцием – с другой. Внесение калия снижает поступление не только стронция, но и кальция, а это бывает плохо. На почвах, богатых питательными веществами, гумусом, с нейтральным рН (чернозёмы, лесные

темно-серые почвы и др.) и тяжёлым гранулометрическим составом применение минеральных удобрений для уменьшения перехода стронция-90 в урожай, как правило, менее эффективно. Азотные удобрения на этих почвах часто усиливают поступление стронция в растения.

Цезий-137. Основным агрохимическим приёмом, ограничивающим поступление цезия-137 и цезия-134 из почвы в растение, является применение калийных удобрений, что связано с антагонистическим характером отношения цезия и калия в почвенном растворе и эффектом «разбавления» в наземной части растения. Содержание цезия в урожае резко снижается при внесении одних калийных удобрений и в комбинации с другими (в 2–20 раз). В растения цезий-137 поступает из кислых почв в больших количествах, чем из слабокислых и нейтральных. Нейтрализация кислотности почвенного раствора известкованием уменьшает накопление цезия в урожае в 2–4 раза. При внесении азотных удобрений нитратные формы практически не влияют на повышение содержания цезия в урожае, а аммонийные формы увеличивают его содержание в зерне гороха. Внесение фосфорных удобрений снижает поступление цезия в растение, особенно на почвах, слабо обеспеченных питательными веществами. Добавление в почву органических удобрений уменьшает поступление цезия в урожай растений, причём наибольший эффект отмечается на почвах лёгкого гранулометрического состава (в 2–3 раза). В целом мероприятия, направленные на сохранение и повышение плодородия почвы, одновременно способствуют снижению накопления цезия в продукции растениеводства в 2–5 раз. На почвах, загрязнённых цезием, целесообразно применение минеральных удобрений со значительным преобладанием фосфора и калия над азотом.

10.2. Агротехнические приёмы

Радионуклиды, выпавшие на поверхность почвенно-растительного покрова, первоначально сосредотачиваются в самом верхнем слое почвы (0–2 см). Вспашка приводит к перераспределению радиоактивных веществ в корнеобитаемом слое почвы до 25 см. Для стронция-90, осевшего в составе глобальных выпадений, распределение на целинном участке составляет: слой до 5 см – 79 %; 5–15 и 15–30 см – 13 и 8 % соответственно. При регулярной перепашке распределение стронция-90 в пахотном слое следующее: в слое до 5 см – 31–57 %, а в слоях 5–15 и 15–30 см – 24–42 и 14–27 % соответственно. Вспашка уменьшает переход радионуклидов в растение. Следствием вспашки почв является снижение мощности дозы γ -излучения за счёт углубления радионуклидов. Обычная вспашка на глубину 18–20 см понижает мощность дозы γ -излучения в несколько раз. При обработке почвы на глубину 28 см поступление стронция-90 уменьшается (по сравнению с ротационной обработкой на 11 см) у люцерны на 40 %, пшеницы – на 25 %. Эффективность глубокой пахоты в снижении поступления радионуклидов в растения зависит от биологических особенностей растений.

10.3. Мелиорация почв

Одним из важнейших приёмов является механическое удаление верхнего слоя почвы, концентрирующего основное количество радионуклидов. Этот способ очень трудоёмкий и дорогостоящий, так как образуется большой объём радиоактивных отходов (снятие слоя почвы 0–5 см с 1 га даёт до 500 т). Кроме того, невозможно точно снять такой тонкий слой почвы, поэтому

объём удалённой земли возрастает до 1 500 т/га. Из-за этого данный приём можно использовать только на очень ограниченных площадях. К механической дезактивации почв может быть отнесён такой приём, как глубокая пахота с захоронением верхнего, наиболее загрязнённого, слоя почвы на глубину 40–60 см и глубже. При этом на поверхность выворачивается малоплодородный иллювиальный горизонт, требующий окультуривания. Глубокая запашка практически неприемлема на песчаных почвах, особенно дерново-подзолистого типа, так как это приводит не только к выходу на поверхность малоплодородных песчаных почвообразующих пород, но и создаёт угрозу ветровой и водной эрозии. При глубокой заделке загрязнённого слоя почвы поглощение радиоактивных веществ растениями значительно снижается. При заделке загрязнённого слоя на глубину 60–70 см с окультуриванием вывернутого наверх неплодородного слоя дерново-подзолистой почвы возможно уменьшение накопления радиоактивных продуктов в урожае в 5–10 раз по сравнению с заделкой на глубину 30 см. Положительное влияние глубокой вспашки на уменьшение перехода стронция-90 в урожай сохраняется в течение 15 лет после проведения этого мелиоративного мероприятия.

В качестве дезактивирующего приёма рассматривается и глубокая засыпка радиоактивного слоя чистой почвой или смесью почвы с соломой (или соломы с глиной). Очевидны трудности осуществления этих мероприятий на больших территориях. В дополнение к вспашке с перемещением слоя почвы, содержащего радионуклиды, на глубину, предлагается отделять формирующийся новый верхний горизонт почвы от нижележащего экраннующим барьером из токсичных химических соединений, препятствующих проникновению корней растений

в нижние объёмы почвы. Проведение таких работ связано с большими техническими и экономическими трудностями. Одним из способов, ограничивающих аккумуляцию в растениях радионуклидов, является их перевод в трудноусвояемые формы. Для этого можно вносить в почву различные химические реагенты.

Радионуклиды, выпавшие на поверхность лугов, более доступны растениям, чем на пахотных землях, вследствие чего содержание их в кормах на естественных пастбищах и сенокосах выше, чем в кормовых растениях на пашне. Это связано с длительным пребыванием осевших из воздуха радионуклидов в луговой дерновине, что обеспечивает нахождение радионуклидов в доступной для растений форме.

Первоочередной задачей агрономелиоративных мероприятий на загрязнённых лугах является разрушение этого дернинного слоя с перемешиванием радионуклидов в корнеобитаемом слое почвы, т. е. перевод естественных пастбищ в искусственные. Здесь применяются обычные агротехнические приёмы улучшения малопродуктивных естественных лугов: перепашка, известкование, подкормка минеральными удобрениями, пересев трав. Эти мероприятия позволяют повысить урожай и одновременно значительно уменьшить радиоактивное загрязнение кормов.

Для дезактивации луговых почв может быть использован такой приём, как удаление верхнего слоя почвы до 5 см бульдозером или скрепером. При срезке и удалении бульдозером слоя до 5 см степень дезактивации составляет 90–100%. Удаление верхнего слоя ухудшает плодородие почвы, в связи с чем снятие верхнего слоя возможно лишь до определённых пределов в зависимости от мощности горизонта почвы и рельефа местности.

При радиоактивном загрязнении целесообразно включение лугов в кормовые севообороты. В севообороте имеется возможность выбирать для посева такие культуры, которые мало накапливают радионуклиды. При этом можно снизить содержание стронция-90 от 2 до 50 раз. Опыт ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС показал, что коренная мелиорация загрязнённых лугов (глубокая пахота с известкованием и внесением минеральных удобрений) обеспечивает устойчивое 3–4-кратное снижение перехода цезия-137 в кормовые растения, в отдельных случаях снижение аккумуляции цезия-137 в кормовых растениях достигало 10 раз. Очень важным при этом является качество агрономелиоративных мероприятий на лугах. Некачественное выполнение этих приёмов сильно снижает их эффективность.

10.4. Подбор сельскохозяйственных растений и фитомелиорация почв

Способность сельскохозяйственных растений накапливать радионуклиды в разных концентрациях может быть использована для получения продукции с минимальным содержанием радиоактивных веществ. Так, концентрации стронция-90 в различных растениях различаются в несколько десятков раз. Разница в накоплении цезия-137 в урожае сельскохозяйственных культур достигает 10–20-кратных значений. В порядке убывания концентрации цезия-137 в продовольственной части урожая сельскохозяйственные культуры распределяются так: люпин > овёс > гречиха > горох > ячмень > пшеница > кукуруза > просо > соя > фасоль; среди овощей и картофеля: капуста > картофель > свёкла > морковь > огурцы > томаты; среди трав: овсяница > райграс > коостёр > клевер > тимфеевка.

По концентрации стронция-90 в хозяйственно-ценной части урожая овощные культуры составляют следующую градацию: свёкла > огурцы > морковь > капуста > томаты > картофель. Кормовые растения также значительно различаются по накоплению стронция-90 и цезия-137. Так, концентрация стронция-90 в семенах бобовых в 2–10 раз выше, чем в злаковых. Среди злаков плотнокустовые злаки (овсяница, мятлик полевой) аккумулируют стронция-90 в 1,5–3 раза больше, чем корневищные злаки (пырей ползучий и костёр безостый). При загрязнении сельскохозяйственных угодий стронцием-90 и цезием-137 следует учесть, что при подборе культур для севооборотов нужно принимать во внимание не только разницу в накоплении растениями абсолютных количеств этих радионуклидов, но и относительную их концентрацию к кальцию и калию как основным химическим макроаналогам стронция и цезия, т. е. оценивать в растениях количество стронциевых и цезиевых единиц. Это определяется тем, что переход стронция-90 и цезия-137 в трофических цепях от растения к сельскохозяйственным животным и далее к человеку определяется не только абсолютной концентрацией радионуклидов, но и количеством стронциевых и цезиевых единиц в растениях.

Как известно, растения способны аккумулировать химические элементы и радионуклиды из почвы, причём коэффициент накопления может быть больше 1. Были высказаны предположения, что можно очистить почву с помощью отчуждения растительной массы. Этот приём предложено называть *фитомелиорацией почв*. Накопление растениями радионуклидов зависит от их физико-химических свойств, особенностей почвы и биологической характеристики растений. Максимальное накопление отмечено на лёгких по гранулометрическо-

му составу (песчаных и супесчаных) подзолистых малоплодородных и дерново-подзолистых почвах. Однако максимальный вынос стронция-90 полевыми культурами на разных типах почвы колеблется в пределах 1–2 %, а цезия-137 – 0,1–0,5 % от их содержания в почве. Целесообразно учесть, что за счёт естественного распада радионуклидов почва ежегодно очищается от стронция-90 и цезия-137 соответственно на 2,5 и 2,2 %. Таким образом, естественный распад стронция и цезия более эффективен, чем вынос этих радионуклидов с фитомассой, что делает фитомелиорацию почв от радиоактивного загрязнения нерациональной. Кроме того, встаёт вопрос, куда деть эту загрязнённую фитомассу, которая превращается в радиоактивные отходы. Кроме всего прочего, очищение почвы от стронция и цезия с помощью растений является также «очищением» от химических аналогов этих радионуклидов – биогенно важных кальция, калия и других биофильных веществ. Таким образом, фитомелиорация почв не может рассматриваться в качестве эффективного приёма дезактивации почв.

При переработке различных видов растительного сырья в конечном продукте значительно уменьшается количество радионуклидов. К таким процессам относится получение растительного масла из подсолнечника и сои, крахмала и спирта из картофеля, сахара из сахарной свёклы. Чем меньше содержание химических элементов в конечном продукте, тем меньше будет в нём концентрация радионуклидов. Однако в процессе переработки могут появиться такие продукты, в которых концентрация радионуклидов будет больше, чем в исходном продукте (жмых и т. п.). Здесь нужно проявлять осторожность.

В условиях радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий с выраженным градиентом в плот-

ностях содержания радионуклидов в почвах в основу ведения производства должен быть положен принцип зонального размещения различных отраслей растениеводства, т. е. необходимо перепрофилирование растениеводческой отрасли с целью уменьшения дозы облучения населения. Это позволит максимально эффективно использовать угодья и получать пригодную продукцию. Например, в зоне сильного загрязнения почвы можно выращивать семенную продукцию, технические культуры, которые не используются в пищу. Допустимая концентрация радионуклидов в разных видах сельскохозяйственной продукции может варьировать в широких пределах, это можно использовать для размещения различных культур на разных по уровню загрязнения почвах.

Тестовые задания

1. Как изменяется содержание стронция-90 в урожае растений при совместном внесении в почву азотных, фосфорных и калийных удобрений:

- а) увеличивается;
- б) снижается;
- в) не изменяется.

2. Как изменяется содержание стронция-90 в урожае растений при известковании кислых почв:

- а) увеличивается;
- б) снижается;
- в) не изменяется.

3. Как изменяется содержание стронция-90 в урожае растений при внесении в почву органических удобрений:

- а) увеличивается;

- б) снижается;
- в) не изменяется.

4. Как изменяется содержание стронция-90 в урожае растений при внесении в почву фосфорных удобрений:

- а) увеличивается;
- б) снижается;
- в) не изменяется.

5. При каком содержании гумуса в почве агрохимические способы наиболее эффективны для снижения накопления стронция-90 в растениях:

- а) низком;
- б) среднем;
- в) высоком.

6. Как изменяется поступление стронция-90 в растение при внесении в почву калийных удобрений:

- а) увеличивается;
- б) снижается;
- в) не изменяется.

7. Как изменяется поступление стронция-90 в растение при внесении азотных удобрений в чернозёмы:

- а) увеличивается;
- б) снижается;
- в) не изменяется.

8. При внесении в почву каких минеральных удобрений наиболее существенно снижается поступление цезия-137 в растение:

- а) азотных;
- б) фосфорных;
- в) калийных.

9. Как изменяется поступление цезия-137 в растение при добавлении в почву органических удобрений:

- а) увеличивается;
- б) снижается;
- в) не изменяется.

10. На какой из перечисленных почв применение агрохимических методов для снижения поступления радионуклидов в растение будет наиболее эффективно:

- а) лёгкий суглинок;
- б) средний суглинок;
- в) тяжёлый суглинок.

11. К какому из перечисленных способов по снижению содержания радионуклидов в продукции растениеводства относится глубокая засыпка радиоактивного слоя чистой почвой:

- а) агротехнический способ;
- б) агрохимический способ;
- в) мелиорация почв.

12. Какое из перечисленных растений в большей степени накапливает цезий-137 в продовольственной части урожая:

- а) капуста;
- б) картофель;
- в) свёкла;
- г) томаты.

13. Какие из перечисленных растений меньше всего накапливают цезий-137 в продовольственной части урожая:

- а) капуста;
- б) картофель;

- в) свёкла;
- г) томаты.

14. Какое из перечисленных растений в большей степени накапливает стронций-90 в продовольственной части урожая:

- а) капуста;
- б) картофель;
- в) свёкла;
- г) томаты.

15. Какие из перечисленных растений меньше всего накапливают стронций-90 в продовольственной части урожая:

- а) капуста;
- б) картофель;
- в) свёкла;
- г) томаты.

16. Как оценивается приём фитомелиорации почв от загрязнения радионуклидами:

- а) эффективный;
- б) малоэффективный;
- в) нерациональный.

17. Какую продукцию рационально выращивать в зоне сильного загрязнения почвы радионуклидами:

- а) семенную;
- б) кормовую;
- в) пищевую.

11. РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ, ЗАГРЯЗНЁННОЙ РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

11.1. Регламентирование воздействия ионизирующих излучений на население

Радиационная безопасность населения, в основе которой лежит предупреждение отрицательного воздействия ионизирующих излучений, обеспечивается в нашей стране системой Государственного санитарного надзора. Для практической реализации этой задачи введены «Нормы радиационной безопасности – НРБ». Эти нормы устанавливают систему дозовых пределов и принципов их применения и предусматривают следующие основополагающие принципы радиационной безопасности: 1) непревышение установленного основного дозового предела; 2) исключение всякого необоснованного облучения; 3) снижение дозы облучения до возможно низкого уровня. По допустимым основным дозовым пределам выделены следующие категории облучаемых лиц: категория А – персонал; категория Б – ограниченная часть населения; категория В – население области, края, республики, страны. В ситуациях, связанных с выбросом радионуклидов в окружающую среду и включением их в сельскохозяйственные цепочки, доминирующий контингент лиц, для которых устанавливаются нормативы облучения, часто отождествляется с населением категории Б (иногда В). Для каждой категории облучаемых лиц устанавливаются три класса нормативов:

1. Основные дозовые пределы.

2. Допустимые уровни.
3. Контрольные уровни.

В качестве ведущего дозового предела для категории Б установлен *предел дозы за год (ПД)*. Для первой критической группы органов (всё тело, гонады и красный костный мозг) предел дозы равен 0,5 бэр. Среди вторичных нормативов для категории Б часто употребляют понятия: *предел годового поступления радионуклидов (ППП)* через органы дыхания и пищеварения; *допустимая мощность дозы (ДМД)* и *допустимая концентрация (ДК)* радионуклидов в атмосферном воздухе и воде. Считается, что при поддержании *ППП* радионуклидов в течение 70 лет ежегодная доза облучения в критическом органе не превысит *ПД*.

Применительно к ситуациям радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных территорий существуют понятия:

1. *Санитарно-защитная зона* – территория вокруг источника радиоактивных выбросов, на которой уровень облучения может превысить предел дозы (*ПД*); в санитарно-защитной зоне устанавливается режим ограничений и проводится радиационный контроль.

2. *Зона наблюдения* – территория, где возможно влияние радиоактивных сбросов и выбросов предприятия и где облучение населения может достигать установленного предела дозы (*ПД*); на территории зоны наблюдения проводится радиационный контроль.

3. *Критическая группа населения* – лица, которые в силу каких-либо факторов (принадлежность к возрастной группе, условиям жизни и т. д.) подвергаются наибольшему радиационному воздействию.

Помимо этого ещё используются: *временно-допустимые уровни (ВДУ)* и *контрольные уровни (КУ)*, регла-

ментирующие допустимое содержание радионуклидов в отдельных звеньях агропромышленного производства. Основное назначение этих нормативов заключается в установлении предельных величин содержания радионуклидов на самых ранних этапах включения радионуклидов в цепи миграции, ведущие к человеку. Так, к числу часто используемых нормативов при радиационном мониторинге сферы агропромышленного производства относятся контрольные уровни (*KY*) содержания радионуклидов в почвах и кормах сельскохозяйственных животных.

Можно выделить несколько типичных ситуаций радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной территории.

1. Разовое образование локальных очагов загрязнения местности в результате радиационной аварии.

2. Непрерывное, медленно убывающее во времени радиоактивное загрязнение сельскохозяйственной территории как следствие глобальных выпадений, обусловленных введением в атмосферу продуктов ядерных взрывов.

3. Локальное непрерывное загрязнение сельскохозяйственной территории вокруг объектов атомной промышленности и ядерно-энергетических установок, работающих в нормальном (штатном) режиме.

Значимость основных видов радиационного воздействия на население, например, внутреннего облучения при поступлении радионуклидов в организм с вдыхаемым воздухом, пищевыми продуктами и водой и внешнего облучения, можно оценить путём сопоставления данных радиационной обстановки и загрязнения продуктов питания с соответствующими нормативами. Такое сравнение для ситуации с непрерывным выбросом в атмосферу ряда радионуклидов показывает, что вклад в облучение человека за счёт ингаляционного поступления

составляет не более 1–2 % для ^{131}I и ^{95}Sr , 3 % для ^{144}Ce ; 7 % для ^{90}Sr и 0,1 % для ^{137}Cs . Ингаляционный путь поступления для указанных радионуклидов в организм человека несущественен по сравнению с пищевым.

11.2. Установление контрольных уровней содержания радионуклидов

Пренебрегая ингаляционным путём поступления радионуклидов, контрольный уровень загрязнения территории ($\sigma_{\text{кΣ}}$, Бк/м²) в случае однократного выброса можно определить из условия:

$$\sigma_{\text{кΣ}} = \left(\sum_i \frac{\delta_i \sum_j \text{КП}_{ij} m_j}{\text{ПГП}_i} + \sum_i \frac{\delta_i \text{КДП}_i}{\text{ПД}} \right) \leq 1,$$

где δ_i – доля активности i -го радионуклида в смеси (относительно единицы); КП_{ij} – коэффициент пропорциональности между концентрацией i -го радионуклида в j -м продукте рациона и плотностью загрязнения территории этим радионуклидом, м²/кг; m_j – потребляемая человеком масса j -го продукта за год, кг; ПГП_i – предел годового поступления i -го радионуклида в организм человека, Бк; КДП_i – коэффициент дозового преобразования для i -го радионуклида (отношение эквивалентной дозы при внешнем облучении от i -го радионуклида за год к плотности загрязнения этим радионуклидом), (Зв/год) / (Бк/ м²); ПД – предел дозы облучения, Зв/год. Первое слагаемое формулы относится к рациону питания, а второе – к внешнему облучению населения.

В первый аварийный год радионуклидный состав растениеводческой продукции можно считать таким же, как состав выпадений, поскольку превалирует поверх-

ностное загрязнение растений. Радионуклидный состав мяса и молока в результате различного всасывания радионуклидов из желудочно-кишечного тракта животных изменяется значительно. Величина $\sigma_{\kappa\Sigma}$ смеси радионуклидов в первый год аварии сильно зависит от сезона, когда произошёл выброс. Выпадения в ранний весенний период приводят к воздушному загрязнению пастбищных угодий и ранних овощей. Радиоактивное загрязнение зерновой продукции и картофеля в расчёт можно не брать, поскольку в пищу идут урожаи прошлых лет. В этом случае основным источником поступления радионуклидов в рацион населения будут мясо и молоко.

В следующий после аварии вегетационный период ведущий путь загрязнения сельскохозяйственной продукции – почвенный, это обусловлено корневым поступлением радионуклидов и вторичным пылевым загрязнением растений. Основными радионуклидами, определяющими загрязнение рациона, будут стронций-90 и цезий-137, поэтому уровень загрязнения территории лучше характеризовать плотностями выпадений долгоживущих изотопов стронция-90 и цезия-137.

Для определения контрольного уровня загрязнения территории (σ_{κ}) необходимо установить закономерности радиоактивного загрязнения продуктов. Задача состоит в установлении коэффициентов пропорциональности (КП), т. е. в нахождении связи между плотностью загрязнения сельскохозяйственных угодий (Бк/км²) и концентрацией радионуклидов в пищевых продуктах (Бк/кг). Коэффициент пропорциональности (КП) может существенно варьировать в зависимости от различных природных факторов, влияющих на доступность радионуклидов растениям, поэтому важно определение коэффициента пропорциональности (КП) для каждого конкретного

случая локального загрязнения почвы. Устанавливается этот коэффициент путём параллельного отбора и анализа проб почвы и образцов сельскохозяйственной продукции, сырья и пищевых продуктов. Зная годовое потребление местных пищевых продуктов и коэффициент пропорциональности (КП) для каждого из них в отдельности, можно рассчитать коэффициент пропорциональности (КП) и контрольный уровень загрязнения территории (σ_k) для рациона в целом (табл. 11.1).

Таблица 11.1

**Исходные данные для расчета контрольного уровня
загрязнения территории в случае попадания
в дерново-подзолистую песчаную почву легкодоступных форм
цезия-137**

Продукты	КП, м ² / кг · 10 ⁻³ (ис- ходный про- дукт)	Доля пере- хода в гото- вый пи- щевой продукт	КП, м ² / кг · 10 ⁻³ (гото- вый пи- щевой про- дукт)	По- требле- ние, кг/год	Вклад в ра- цион, м ² /год
Зерно (хлеб)	0,80	0,50	0,40	150	0,06
Молоко	2,00	1,00	2,00	200	0,40
Картофель	0,30	0,80	0,24	200	0,05
Мясо (говядина)	8,00	1,00	8,00	70,0	0,56
Овощи	0,30	0,60	0,18	80,0	0,02
Вода открытых водоёмов	0,05	1,00	0,05	550	0,03

Как видно из табл. 11.1, годовое поступление цезия-137 в рацион на территории с единичной плотностью загрязнения 1 Бк/м² ($\delta_i = 1$) составляет 1,12 Бк ($\Sigma \text{КП} \cdot m$). Поскольку предел годового поступления (ПГП) для цезия-137 равен $4,44 \cdot 10^5$ Бк (12 мкКи), то контрольный уровень загрязнения почвы (σ_k) составляет примерно $4 \cdot 10^5$ Бк/м², т. е. увеличивается в $4 \cdot 10^5$ раз:

$$\sigma_k = \frac{\delta \text{ КП} \cdot m}{\text{ПГП}} \leq 1; \text{ отсюда } \sigma_k \leq \frac{\text{ПГП}}{\delta \text{ КП} \cdot m} \text{ число раз.}$$

В этом примере критическими продуктами являются молоко и мясо, на долю которых приходится 85 % поступающего цезия-137 в организм. Отсюда следует, что критическими угодьями станут пастбища и сенокосы, и наиболее целесообразными будут мероприятия, направленные на уменьшение содержания цезия в молоке и мясе, даже если эти мероприятия малоэффективны. Например, уменьшение загрязнения молока и мяса в 2 раза увеличит σ_k в 1,7 раза, а замена на чистые продукты картофеля, овощей, хлеба и воды ведёт к возрастанию σ_k только на 15 %. Используя коэффициенты пропорциональности (КП) для основных продуктов питания, можно оценить σ_k для стронция-90 и цезия-137 в зависимости от типа почвы (табл. 11.2).

Таблица 11.2

Пределы загрязнения почв (σ_k), Бк/м² · 10⁴

Тип почвы	Цезий-137	Стронций-90
Дерново-подзолистая песчаная	37	0,74
Дерново-подзолистая суглинистая	110	2,22
Чернозём мощный суглинистый	740	15,00

Как видно из табл.11.2, только из-за типа почвы σ_k может колебаться в 20 раз и более. Контрольный уровень загрязнения почвы может быть увеличен либо за счёт изменения характера питания, либо за счёт проведения дезактивационных или агрономелиоративных мероприятий.

В табл. 11.1 и 11.2 не учтено внешнее облучение человека, однако при загрязнении территории цезием-137 опасность обусловлена как внутренним, так и внешним облучением. Относительная значимость двух видов ра-

диационного воздействия может быть оценена по соотношению контрольных уровней, рассчитанных только по внешнему облучению ($\sigma_{к1}$) и только по внутреннему ($\sigma_{к2}$). Внешнее облучение не зависит от типа почв, а внутреннее зависит (табл. 11.3). Поэтому на чернозёмах необходима защита от внешнего облучения, а на подзолистых почвах – от внутреннего и внешнего. Если почва загрязнена одновременно цезием-137 и стронцием-90, то опасность обусловлена внутренним облучением от стронция-90 и цезия-137 и внешним от цезия-137.

Таблица 11.3

**Значимость внешнего и внутреннего облучения цезием-137
для разных типов почв**

Тип почвы	$\sigma_{к1},$ Бк/м ² · 10 ⁵	$\sigma_{к2},$ Бк/м ² · 10 ⁵	$\sigma_{к1} / \sigma_{к2}$ (внешнее/ внутреннее)
Дерново-подзолистая песчаная	3,7	3,7	1 : 1
Дерново-подзолистая суглинистая	3,7	11	1 : 3
Чернозём мощный суглинистый	3,7	74	1 : 20

В этом случае σ_k равны (почва песчаная): для стронция-90 – $7,4 \cdot 10^3$ Бк/м², для цезия-137 (внутреннее облучение) – $3,7 \cdot 10^5$, для цезия-137 (внешнее облучение) – $3,7 \cdot 10^5$ Бк/м². При таком отношении плотности загрязнения почв все виды радиационного воздействия будут значимы одинаково, поэтому при установлении допустимого уровня загрязнения территории должно выполняться условие, при котором сумма отношений плотности загрязнения по каждому радионуклиду и типов радиационного воздействия (внешнего и внутреннего облучения) к соответствующему σ_k не превышает единицы.

Территория, уровни загрязнения которой превышают установленную σ_k , является непригодной для длительного и безопасного проживания сельского населения. В то же время эти площади в зависимости от уровня загрязнения могут быть ограниченно использованы в сельскохозяйственном производстве. Агропромышленное использование такой территории проводится по согласованию с санитарными органами на основе специальных рекомендаций.

Таким образом, по критериям (режиму ограничений и радиационному контролю) территория, подвергшаяся аварийному загрязнению долгоживущими радионуклидами с уровнем выше контрольного уровня загрязнения (σ_k), соответствует определению *санитарно-охранной зоны*. Специальным решением определяется охранный режим, а также режим проведения на этой территории сельскохозяйственных и других работ.

11.3. Контрольные уровни содержания радионуклидов в продуктах питания

Установление санитарно-охранной зоны (СОЗ) является основой предупредительного надзора, обеспечивающей безопасное проживание населения. Поскольку контрольный уровень загрязнения почвы (σ_k), по которому определяется граница СОЗ, является величиной максимальной, то превышение предела дозы (ПД) за пределами СОЗ теоретически невозможно. В целях предупреждения необоснованного внутреннего облучения населения, проживающего на окружающих СОЗ территориях, устанавливается контрольный уровень (КУ) содержания критических радионуклидов в сельскохозяйственной продукции и продуктах питания, который рассчитывают по формуле:

$$КУ_{ij} = КП_{ij} \cdot \sigma_{ki},$$

где $КУ_{ij}$ – контрольный уровень содержания i -го радионуклида в j -м продукте, Бк/кг или л; $КП_{ij}$ – коэффициент пропорциональности i -го радионуклида в j -м пищевом продукте, (Бк/кг) / (Бк/м²); σ_{ki} – предел загрязнения территории i -м радионуклидом, Бк/м².

Как следует из формулы, КУ – это такое содержание радионуклида в продуктах питания, которое соответствует уровню загрязнения, равному σ_k и которое обеспечивает непревышение предела годового поступления радионуклида в организм человека при неограниченном потреблении этих продуктов. Используя коэффициент пропорциональности, можно рассчитать контрольные уровни содержания стронция-90 и цезия-137 для основных продуктов питания при годовом потреблении (табл. 11.4).

Таблица 11.4

Контрольное содержание стронция-90 и цезия-137 в продуктах питания, Бк/кг

Пищевые продукты	Стронций-90	Цезий-137
Молоко	37,0	740,0
Мясо (говядина)	7,4	3 000
Хлеб	15,0	300,0
Картофель	11,0	110,0
Овощи	11,0	110,0

От типа почв контрольные уровни не зависят, но являются функцией от состава рациона и предела годового поступления радионуклидов в организм человека (ППП), поэтому они должны сравниваться и утверждаться с учётом конкретных условий.

Используемые в целях предупредительного надзора и текущего контроля контрольные уровни позволяют по анализу пробы пищевого продукта: 1) выявить случаи

нарушения установленного режима санитарно-охранной зоны; 2) определить уровень загрязнения используемых угодий; 3) оценивать эффективность проводимых защитных мероприятий; 4) контролировать качество агропромышленной продукции в случае использования угодий в санитарно-охранной зоне.

Тестовые задания

1. К какой категории по допустимым основным дозовым пределам облучения относится население области:

- а) А;
- б) Б;
- в) В.

2. Что является ведущим дозовым пределом при облучении населения:

- а) предел дозы (ПД) за год;
- б) предел годового поступления (ПГП) радионуклидов через органы дыхания и пищеварения;
- в) допустимая мощность дозы (ДМД).

3. Как называется территория вокруг источника радиоактивных выбросов, на которой уровень облучения населения может превышать предел дозы за год:

- а) запретная зона;
- б) санитарно-защитная зона;
- в) зона наблюдения.

4. Как называется территория вокруг источника радиоактивных выбросов, на которой возможно влияние радиоактивных выбросов и где облучение населения может достигать установленного предела дозы за год:

- а) запретная зона;

- б) санитарно-защитная зона;
- в) зона наблюдения.

5. Какой из нормативов наиболее часто используется при радиационном мониторинге сферы агропромышленного производства:

- а) допустимая концентрация (ДК) радионуклидов в воздухе;
- б) предел годового поступления радионуклидов (ПГП) через органы дыхания и пищеварения;
- в) контрольные уровни (КУ) содержания радионуклидов в почве и кормах.

6. К какому типу относится загрязнение сельскохозяйственной территории вокруг объектов атомной промышленности, работающих в нормальном режиме:

- а) разовое локальное;
- б) непрерывное локальное;
- в) непрерывное глобальное.

7. Как оценивается ингаляционный путь поступления радионуклидов йода- 131, стронция-90, цезия-137 в организм человека по сравнению с пищевым путём:

- а) равноценный;
- б) существенный;
- в) несущественный.

8. Какой из перечисленных продуктов будет наиболее опасным для употребления в пищу человеком в первый год после разового аварийного выброса в окружающую среду радионуклидов:

- а) хлеб;
- б) молоко;
- в) картофель.

9. На какой из перечисленных типов почвы предел её загрязнения цезием-137 будет наибольшим по величине:

- а) дерново-подзолистая песчаная;
- б) дерново-подзолистая суглинистая;
- в) чернозём мощный суглинистый.

10. На какой из перечисленных типов почвы предел её загрязнения стронцием-90 будет наименьшим по величине:

- а) дерново-подзолистая песчаная;
- б) дерново-подзолистая суглинистая;
- в) чернозём мощный суглинистый.

11. Как называется территория, подвергшаяся загрязнению долгоживущими радионуклидами выше допустимого контрольного уровня:

- а) санитарно-защитная зона;
- б) санитарно-охранная зона;
- в) зона наблюдения.

12. Как зависят контрольные уровни содержания радионуклидов в продуктах питания от типа почвы:

- а) не зависят;
- б) слабо зависят;
- в) сильно зависят.

12. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ И РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

12.1. Методы радиационной стимуляции

Стимулирующее действие ионизирующих излучений на растения впервые обнаружил в 1896 г. Шобер. Подвергнув рентгеновскому облучению в малых дозах сухие семена овса, он отметил повышение всхожести и энергии их прорастания. С открытием явления естественной радиоактивности, с 1910 г., начались эксперименты по намачиванию семян в радиоактивных растворах, внесению радиоактивных элементов в почву (радиоактивные удобрения), по стимуляции растений. Эти опыты основывались на внутреннем облучении растений и не получили широкого применения в сельском хозяйстве, хотя их использование казалось весьма перспективным для повышения урожая и его качества. Есть две причины неудач. Первая – стимулирующие эффекты не всегда воспроизводятся. Эффект стимуляции – это многофакторный, очень тонкий биологический эффект, весьма критический и чувствительный к многочисленным факторам внешней среды и физиологическому состоянию организма. Вторая причина – их нетехнологичность, т. е. трудности применения метода в условиях крупномасштабного производства.

Облучение семян. Среди методов радиационной стимуляции наиболее перспективным оказался метод предпосевного облучения семян. Усовершенствование методов дозиметрического контроля позволило с достаточной точностью определять дозы облучения и повысить воспроизводимость результатов. В качестве источника об-

лучения чаще используют кобальт-60 или цезий-137. Положительное влияние определённых доз облучения семян зависит от их устойчивости, физиологического состояния, биологических особенностей растений и ряда других условий. У намоченных и особенно прорастающих семян сильно повышается радиочувствительность. Стимулирующая доза облучения сухих семян может оказаться угнетающей при облучении намоченных семян. Известные стимулирующие дозы предпосевного облучения семян и посадочного материала некоторых культур представлены в табл. 12.1.

Таблица 12.1

**Стимулирующие дозы предпосевного облучения семян
и посадочного материала**

Культуры	Доза облучения, Р
Рожь	800
Ячмень	1 000
Лён-долгунец	1 000
Хлопчатник	1 000
Люцерна	1 000
Клевер	1 000
Турнепс	1 000
Свёкла	500
Морковь	2 500–4 000
Кукуруза	500–1 000
Огурцы	300
Сахарная свёкла	1 000
Капуста	2 000
Картофель	300–500
Салат	300
Томат	1 000
Земляника (рассада)	500
Мята перечная (корневища)	1 000

Для семян некоторых культур достаточно хорошо изучены стимулирующие дозы облучения, их мощность,

поэтому этот приём применяют на практике. Облучение семян древесных растений γ -квантами сильно повышает их грунтовую всхожесть, что имеет большое практическое значение. Например, облучение семян жимолости пиренейской повышало грунтовую всхожесть на 46%, облепихи – на 26, ясеня зелёного – на 60, липы крупнолистной – на 41 %.

Стимулирующие дозы зависят от срока хранения облучённых семян. Максимальный эффект стимуляции у большинства испытанных культур наблюдается при посеве семян сразу после облучения (посев из-под луча). При хранении облучённых семян эффект стимуляции снижается. О влиянии мощности дозы облучения на эффект стимуляции нет однозначных данных. Влияние этого фактора исследовано слабо. Установлено, что изменение мощности дозы в пределах одного порядка оказывает незначительное влияние, но изменение её на несколько порядков уже существенно влияет на эффективность стимуляции. Почвенно-климатические условия тоже влияют на стимулирующие дозы. Имеющиеся данные по испытанию метода предпосевного облучения семян показывают, что он обеспечивает получение прибавки урожая до 40–50 % – видимо, это предел. В большинстве случаев прибавка урожая достигает 10–15 %.

Облучение растений. Реакция растений на внешнее облучение различна в зависимости от фазы развития, общей дозы и её мощности. Растения более чувствительны в начальный период роста и в фазе закладки и дифференциации репродуктивных органов. Для стимуляции роста и развития сельскохозяйственных культур и повышения их урожайности внешнее облучение вегетирующих растений может быть перспективным приёмом в теплицах и парниках. Хорошие условия питания, освещения, во-

дного режима и другие факторы внешней среды, благоприятные для развития растений, могут усиливать положительное действие облучения.

12.2. Радиационная технология хранения сельскохозяйственной продукции

Проблема хранения продукции сельскохозяйственного производства не менее важна, чем проблема производства этой продукции. Её экономическое значение исключительно велико, а использование ионизирующих излучений в этой области – одно из наиболее перспективных направлений. Для облучённых пищевых продуктов необходимы медицинские испытания на их безвредность, токсические и канцерогенные свойства. Данные показывают, что появление наведённой радиоактивности практически исключается при облучении пищевых продуктов фотонами и ускоренными электронами с энергией ниже 10 МэВ в дозе до 5 Мрад, такую энергию и дозу следует принять за верхний предел допустимой энергии и дозы облучения. При облучении продуктов нейтронами любых энергий происходят различные ядерные реакции, поэтому нейтроны вообще нельзя использовать в радиационной технологии хранения продукции.

Потеря витаминов обнаружена лишь при облучении в стерилизующих дозах. Вопрос о токсичности облучённых пищевых продуктов ещё окончательно не решён. В зависимости от назначения можно указать следующие виды радиационной обработки сельскохозяйственной продукции: 1) *ингибирование* – торможение или подавление физиологических процессов в сельскохозяйственных продуктах; 2) *пастеризация* – подавление жизнедеятельности вредных микроорганизмов, загрязняющих про-

дукты; 3) *стерилизация* – полное уничтожение вредных микроорганизмов; 4) *дезинсекция* – уничтожение насекомых-вредителей.

По имеющимся данным, облучение пищевых продуктов даже в стерилизующих дозах существенного ухудшения питательной ценности белков, жиров и углеводов не вызывает (табл. 12.2).

Таблица 12.2

Перечень доз для обработки ионизирующими излучениями продуктов, разрешённых к употреблению в пищу

Продукты	Цель облучения	Доза, крад
Картофель	Подавление прорастания	10
Репчатый лук		6
Зерно	Дезинсекция	30
Сушёные фрукты		100
Сухие пищевые концентраты		70
Свежие плоды и овощи	Стерилизация	200–400
Сырые мясные полуфабрикаты из говядины, свинины, крольчатины (упакованные в плёнку)		600–800
Потрошенные битые куры (упакованные в плёнку)		600
Готовые к употреблению продукты (мясо жареное, антрекот), упакованные в плёнку		800

В радиационной технологии хранения продуктов используются облучательные установки с источниками излучения кобальтом-60 и цезием-137, а также генераторы ускоренных электронов. Гамма-облучение клубней картофеля в дозах порядка 5–20 крад подавляет прорастание картофеля, вследствие чего увеличиваются сроки его хранения (при 20 крад – до 18 месяцев). Оптимальные радиационные дозы зависят от сорта картофеля, его состояния, времени после уборки и условий хранения.

Важное значение имеет проблема сохранения товарных качеств плодов и овощей с помощью ионизирующих излучений. Пастеризующие и стерилизующие дозы излучения для них лежат в пределах 0,1–1 Мрад. Плесневые грибы менее радиоустойчивы, чем дрожжи, они погибают при облучении в дозах 0,1–0,6 Мрад, а дрожжи выживают даже при дозах выше 1 Мрад. Из мягких фруктов и ягод наиболее перспективна радиационная обработка земляники и винограда γ -излучением в дозах 0,1–0,5 Мрад. Имеются данные, что облучение фруктов ускоренными электронами (1МэВ) более благоприятно, чем γ -лучами, для сохранения их качества, так как облучению в этом случае подвергаются только поверхностные слои плодов и ягод. Установлено, что облучение яблок и груш в дозах 0,1 Мрад тормозит их созревание, а это увеличивает срок их хранения. Рационально использовать радиационную пастеризацию для стерилизации томатов: созревание их замедляется при облучении в дозе 0,5 Мрад, что очень важно для сохранения их товарных качеств.

12.3. Радиационные методы борьбы с насекомыми-вредителями

Борьба с насекомыми-вредителями — довольно сложная, но исключительно важная проблема сельскохозяйственного производства. Необходимость поиска новых, более совершенных методов борьбы с ними очевидна. Применение химических средств (инсектицидов, фумигантов, пестицидов) имеет большие недостатки: невозможность полного уничтожения насекомых; устойчивость некоторых насекомых к химическим препаратам, вследствие чего приходится синтезировать новые и новые препараты; обработка продукции химическими пре-

паратами опасна для человека вследствие их токсичности, а также приводит к поражению полезных насекомых и животных. В зависимости от окружающей среды насекомых-вредителей, наносящих экономический ущерб, делят на две категории:

1) вредители сельскохозяйственной продукции, обитающие в пищевых продуктах, техническом сырье, табаке, шкурах и т. п.;

2) сельскохозяйственные вредители, повреждающие растения в поле, а также вредители сельскохозяйственных животных.

Существует несколько методов борьбы с насекомыми-вредителями. Первый метод заключается в непосредственном облучении сельскохозяйственной продукции с целью прямого поражения и уничтожения насекомых. Для этого требуются дозы порядка 10–100 крэд, такой метод должен обеспечить самую быструю дезинсекцию продукции.

Второй метод заключается также в прямом облучении продукции, но с целью половой стерилизации насекомых. Для половой стерилизации необходимы значительно меньшие дозы (порядка 1–10 крэд), чем для летального уничтожения. Насекомые, испытавшие половую стерилизацию, не размножаются, и популяция гибнет. Такой косвенный метод борьбы с насекомыми применим не ко всем насекомым и по времени длительнее, чем первый метод, однако снижение доз облучения – важное преимущество радиационной половой стерилизации.

Третий метод также основан на половой стерилизации насекомых: на специальных биофабриках разводят насекомых, затем их облучают с целью половой стерилизации самцов. Стерильных самцов выпускают в агроценоз, они не дают потомства, и популяция погибает.

Например, у амбарного долгоносика при дозе 325 крад все насекомые гибнут через сутки. Для уничтожения других насекомых в течение 24 ч необходимы дозы более 300 крад, но они находятся уже в интервале доз, при которых наступает нежелательное ухудшение качества продукции. При более низких дозах (150–250 крад) насекомые гибнут в течение примерно недели. При облучении в дозах, вызывающих половую стерилизацию (менее 20 крад), они гибнут через 2–5 недель, и порча продукции продолжается, пока не погибнут все особи.

Неоспоримым преимуществом радиационной дезинсекции пищевых продуктов является то, что она приводит к полному уничтожению насекомых, не оставляя каких-либо токсических остатков в продуктах.

Одна из возможных областей применения радиационных методов обработки сельскохозяйственной продукции – облучение продукции, находящейся на карантине, что позволит значительно сократить время карантина. Имеется опыт радиационной стерилизации и дезинсекции почвы в тепличных и парниковых хозяйствах.

12.4. Методы радиационной селекции

Для получения мутаций можно использовать самые разнообразные способы облучения растительного материала. Внешнему и внутреннему облучению могут подвергаться семена, проростки, вегетирующие растения в различные фазы онтогенеза, различные органы растения, в частности генеративные органы и их составные части. При внутреннем облучении семена замачивают в радиоактивных растворах, этот способ не противопоказан с точки зрения радиационной безопасности, так как семена в небольшом количестве высевают в вегетационных

сосудах или на отдельных делянках. При этом используют радиоизотопы с относительно небольшими периодами полураспада. Мутации получают и при выращивании растений на радиоактивных растворах в вегетационных сосудах. С точки зрения длительности облучения различают острое и хроническое облучение. Наиболее распространённым, безопасным и удобным способом является способ внешнего облучения воздушно-сухих семян. В принципе, для селекционной работы можно использовать любые виды ионизирующих излучений. В настоящее время в радиационной селекции широко применяют рентгеновское, нейтронное и γ -излучения. На мутагенное действие ионизирующих излучений влияет вся совокупность физических, химических и физиологических факторов, при которых происходит облучение организма. С практической точки зрения, нужно подобрать такие условия облучения и выращивания растений, при которых бы число необходимых для отбора мутаций было наибольшим. Условия облучения могут сильно модифицировать радиомутагенные эффекты. Предлагаются способы дополнительной обработки семян, позволяющие снимать значительную долю повреждающего эффекта и тем самым увеличивать выживаемость растений. Один из таких способов заключается в том, что семена облучают на сухом льду при температуре -78°C . Сразу после облучения их помещают в дистиллированную воду при температуре $+60^{\circ}\text{C}$, а затем выдерживают в кипячёной дистиллированной воде. После подсушивания семена высевают. Имеются данные по оптимальным дозам рентгеновского и γ -излучения, дающим высокий выход хозяйственно полезных мутаций (табл. 12.3).

Таблица 12.3

Оптимальные дозы рентгеновского и γ -излучения

Культура	Доза облучения, крад
Пшеница яровая и озимая	3–5
Ячмень	5–10
Горох овощных сортов	5–10
Горох зерновой пищевых сортов	7–12
Вика яровая	7–15
Соя	5–10

При облучении семян нейтронами оптимальная доза для пшеницы и ячменя составляет 250–750 рад, для гороха и других зерновых – 300–500 рад. Оптимальные дозы для получения мутаций рентгеновского и γ -излучения при облучении семян сортов ржи и гречи составляют 5–15 крад, сахарной свёклы – 20–25, кукурузы – 5–15 крад. Для получения мутаций у картофеля облучают семена, клубни и ростки. Ориентировочные оптимальные дозы рентгеновского и γ -излучения для клубней и ростков находятся в интервале 0,6–3 крад, нейтронного излучения – 750 рад. При облучении семян картофеля используют более высокие дозы рентгеновского и γ -излучения – 10–15 крад.

Тестовые задания

1. Как зависят стимулирующие эффекты радиации на растения от факторов внешней среды и физиологического состояния организма:

- а) не зависят;
- б) слабо зависят;
- в) зависят существенно.

2. Как изменяется стимулирующая доза радиации для намоченных семян по сравнению с сухими:

- а) не изменяется;
- б) снижается;
- в) увеличивается.

3. Как зависит эффект стимуляции от периода хранения облучённых семян:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) не зависит.

4. Какие частицы нельзя использовать в радиационной технологии хранения сельскохозяйственной продукции:

- а) фотоны;
- б) электроны;
- в) нейтроны.

5. Как сказывается облучение пищевых продуктов в стерилизующих дозах радиации на питательную ценность белков, жиров и углеводов:

- а) повышает;
- б) снижает;
- в) не влияет.

6. Как называется процесс подавления физиологических процессов в сельскохозяйственных продуктах при их радиационной обработке:

- а) пастеризация;
- б) стерилизация;
- в) ингибирование.

7. Как называется процесс подавления жизнедеятельности вредных микроорганизмов при радиационной обработке сельскохозяйственной продукции:

- а) пастеризация;
- б) стерилизация;
- в) ингибирование.

8. Как называется процесс уничтожения вредных микроорганизмов при радиационной обработке сельскохозяйственной продукции:

- а) пастеризация;
- б) стерилизация;
- в) дезинсекция.

9. Как называется процесс уничтожения насекомых-вредителей при радиационной обработке сельскохозяйственной продукции:

- а) пастеризация;
- б) стерилизация;
- в) дезинсекция.

10. Какое излучение при меньшей дозе облучения семян даёт высокий выход хозяйственно полезных мутаций:

- а) рентгеновское;
- б) гамма-излучение;
- в) нейтронное.

13. РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ СФЕРЫ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

13.1. Радиационный мониторинг

Одним из видов мониторинга является радиационный мониторинг окружающей среды, предусматривающий измерение уровня радиоактивного загрязнения и доз облучения биологических объектов от всех существующих источников (естественный радиационный фон, радиоактивные выпадения и др.) и проводимый в целях контроля воздействия внешнего излучения и инкорпорированных радионуклидов на человека. В зависимости от конкретных задач он выполняется как мониторинг источника, предусматривающий измерение и оценку мощности поглощённых доз излучения в воздухе и количества радионуклидов, попавших в природную среду из данного источника, или как мониторинг окружающей среды. В первом случае наблюдения проводятся в пределах зоны расположения источника, во втором случае измерения мощности поглощённой дозы в воздухе и концентрации радионуклидов в объектах окружающей среды выполняются за пределами расположения источника излучения.

Распределение радионуклидов в биосфере, их способность мигрировать по экологическим цепочкам и концентрироваться в отдельных звеньях пищевых цепей привели к возникновению проблемы контроля радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий, почв, поливных вод, кормов, растительной и животноводческой продукции. Это вызывает необходимость проведения целенаправленного *радиационного мониторинга агропромышленного комплекса (РМАПК)*. Важность

осуществления этого вида мониторинга обусловлена не только тем обстоятельством, что поступление радионуклидов в организм человека с сельскохозяйственными продуктами часто является определяющим в дозообразовании, но и тем, что этот путь радиационного воздействия является наиболее управляемым и регулируемым. РМАПК – это система непрерывных наблюдений (измерений), оценки и прогноза радиоактивного загрязнения компонентов природы и элементов биоты, являющихся объектами или продуктами сельскохозяйственной деятельности человека, и реакции биотической составляющей на действие излучения.

Основными задачами РМАПК являются:

1. Наблюдения и оценка уровня радиоактивного загрязнения компонентов природы и элементов биоты, вовлекаемых в сферу сельскохозяйственной деятельности человека, в частности в целях предупреждения возможных негативных последствий для здоровья человека.

2. Выявление закономерностей пространственно-временной миграции радионуклидов в биологических цепочках и составление на этой основе прогноза будущих уровней радиационного загрязнения.

3. Оценка и прогноз дозовых нагрузок на сельскохозяйственных животных и растения.

Целью РМАПК является накопление информации, необходимой для принятия решений по управлению и регулированию радиоактивного загрязнения агропромышленной продукции путём разработки и внедрения системы агротехнических, агрохимических, зоотехнических или организационных мероприятий, а также сохранения продуктивности сельского хозяйства. С учётом конкретных задач и целевого назначения разрабатываются программы мониторинга, устанавливающие выбор объектов

наблюдения, вид, частоту и периодичность измерений, методы измерений, отбора образцов и т. д.

13.2. Принципы организации и структура радиационного мониторинга агропромышленного комплекса

Несмотря на большую трудоёмкость и значительные материальные затраты, единственным источником объективной информации о радиоактивной обстановке в сфере агропромышленного производства являются прямые наблюдения и измерения. РМАПК должен включать:

1. Периодические измерения мощности дозы γ - и β -излучения на местности.

2. Периодический сбор образцов в специально выбранных местах наблюдения и контрольных точках, определение концентрации радионуклидов в этих образцах, радионуклидного состава загрязнения и физико-химических форм радионуклидов.

3. Расчет дозовых нагрузок на биоту на основании первичных данных РМАПК.

4. Оценку текущего состояния радиационной обстановки.

5. Прогноз возможных изменений радиационной обстановки.

6. Подготовку информации, необходимой для осуществления контроля радиационной обстановки.

Структура системы РМАПК строится по иерархическому принципу: первичная сеть (пункты наблюдения) → центр сбора и обработки информации → региональный (республиканский) центр → главный центр данных. В качестве промежуточного звена, осуществляющего накопление и обработку информации, могут выступать научно-исследовательские учреждения по со-

ответствующему профилю исследований. Начальным звеном РМАПК является сеть пунктов наблюдения, где осуществляются измерения уровня радиации на местности. Производится отбор, подготовка и последующий лабораторный анализ образцов, выполняется первичная обработка информации. Основными задачами на этом этапе являются:

1. Обеспечение правильности выбора места и времени проведения измерений и отбора образцов.
2. Отбор репрезентативной пробы.
3. Соблюдение правильности режима подготовки образцов к анализу.
4. Обеспечение достоверности результатов измерения.

В рамках системы РМАПК наблюдения и измерения должны проводиться на основе единых методов сбора, хранения и выдачи данных полевых и лабораторных исследований. Интерпретация конечных результатов РМАПК и подготовка информации для выработки и принятия решений по контролю радиоактивного загрязнения осуществляются главным центром данных.

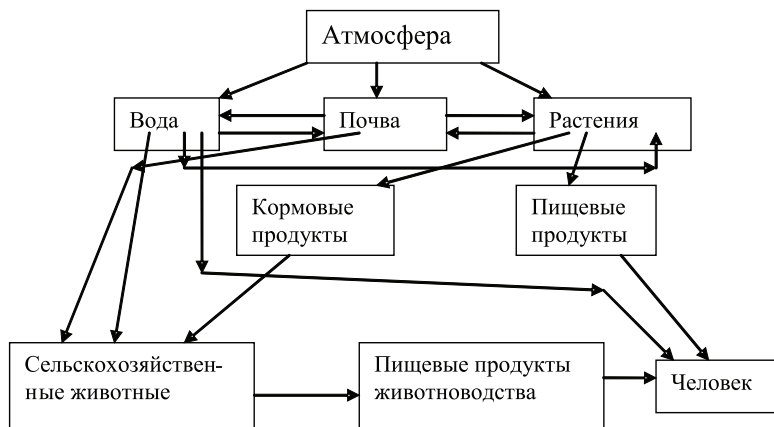


Рис. 13.1. Схема миграции радионуклидов

При РМАПК интерес представляют в первую очередь те звенья экологических цепочек, которые определяют уровни загрязнения продукции растениеводства и животноводства. Общая схема миграции радиоактивных веществ в сельскохозяйственной сфере представлена на рис. 13.1.

Основным источником поступления радионуклидов в наземные пищевые цепи является почва. В результате выпадений радионуклиды поступают на земную поверхность, аккумулируются в почве, включаются в биогеохимические циклы миграции и становятся новыми компонентами почвы. Почва является наиболее важным и инерционным звеном, и от скорости миграции радионуклидов в почве во многом зависят темпы их распространения по всей цепочке. В результате перемещения в почве и последующего корневого поглощения радиоактивные вещества поступают в части растения, представляющие пищевую или кормовую ценность. Накопление радионуклидов в растительной массе может происходить и за счёт удерживания части радиоактивных выпадений из атмосферы на поверхность растений – аэрозольный путь загрязнения. Такое загрязнение играет особенно большую роль в период интенсивных радиоактивных выпадений из атмосферы.

Основным источником поступления радионуклидов в организм животных является корм, в меньшей степени – вода (около 2% от общего содержания в рационе). Нельзя, однако, не учитывать и такие пути поступления, как заглатывание сельскохозяйственными животными частиц почвы и ингаляция радиоактивных частиц из воздуха при вторичном их подъёме с травостоя. Таким образом, поступление радионуклидов в организм сельскохозяйственных животных и получаемую от них продукцию

следует рассматривать во взаимосвязи с источником их питания – кормовыми растениями, а накопление радионуклидов в растениях – в зависимости от загрязнения почвы, атмосферы и воды. Поэтому объектами РМАПК должны быть: почва пахотных и кормовых угодий, вода, используемая для полива и орошения сельскохозяйственных угодий, пищевые и кормовые растения, играющие основную роль в рационе человека и животных; сельскохозяйственные животные; продукты животноводства.

Поскольку невозможно вести наблюдения за всеми культурными растениями, выращиваемыми и используемыми человеком, необходимо ограничиваться наиболее важными из них. Среди полевых культур различают растения, непосредственно потребляемые человеком или перерабатываемые для его нужд, и кормовые растения для животных. В первой группе наиболее важное значение имеют: зерновые культуры, картофель, листовые овощи, корне- и клубнеплоды. Среди кормовых культур должны учитываться растения на естественных и искусственных лугах и пастбищах, зерновые культуры, картофель, свёкла, кукуруза. Из продуктов животноводства, в первую очередь, необходимо контролировать молоко, мясо крупного рогатого скота, свинину. Учитывая возможность загрязнения растений и почвы в результате орошения сельскохозяйственных угодий, необходимо вести наблюдения за содержанием радионуклидов в воде открытых водоёмов.

Контролируемые параметры. Наиболее объективным источником информации о радиоактивной обстановке в агропромышленной сфере являются прямые измерения мощности дозы β - и γ -излучения (в воздухе у поверхности земли и на высоте 1 м) и содержания естественных и искусственных радионуклидов в природных объектах и агропромышленной продукции. Мощность

экспозиционной дозы (Р/ч) измеряется непосредственно на местности с помощью полевых приборов (дозиметров или радиометров) и служит исходной величиной для определения дозовых нагрузок на биоту. Для определения уровня радиоактивного загрязнения почвы, растительности и продуктов животноводства производят отбор образцов и последующий их анализ в лаборатории. Количественным выражением уровня радиоактивного загрязнения объектов природной среды служат: удельная активность (концентрация) C_m (Бк/кг) или объёмная активность C_v (Бк/л) нуклида в образце. Для оценки загрязнения территории часто используют понятие плотности радиоактивного загрязнения σ_s (Бк/м²).

Периодичность наблюдения. Обычно рассматривают 2 типа радиационной обстановки, требующие осуществления различных видов РМАПК – текущего и оперативного. Текущий РМАПК проводят в условиях, когда поступление радионуклидов носит постоянный, более или менее равномерный характер и существенного биологического действия не оказывает. Отмечаются колебания в размерах поступления радионуклидов во времени и в пространстве, но в целом они не выходят за рамки допустимого. Практически невозможно осуществлять текущий РМАПК в полном объёме на всей территории, где ведётся агропромышленное производство. В условиях нормальной радиационной обстановки в этом нет необходимости. Наблюдения проводятся на стационарных площадках, закладываемых как на пахотных, так и на естественных залежных землях. Объектами наблюдения являются почва, наиболее важные растения, имеющие основное значение в рационе сельскохозяйственных животных и человека, и продукты животноводства, в первую очередь, молоко. Определяется содержание наиболее опасных в биологическом отношении радионуклидов.

Программу оперативного РМАПК разрабатывают для ситуаций, связанных с разовым или растянутым на несколько дней поступлением в природную среду радиоактивных веществ в количествах, которые могут представить угрозу здоровью или жизни человека (крупные радиационные аварии). В этих условиях путём измерения мощности дозы γ -излучения на местности с помощью авиационной, автомобильной или пешей разведки определяют уровень и границы радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий. Для съёмки территории наиболее эффективно применение квадратной сетки исходя из требуемой точности оценки уровня радиоактивного загрязнения. Используется выражение:

$$\Delta = \frac{2(A_{\max} - A_{\text{ср}})}{A_{\text{ср}}(N - 2)} = \frac{2(K - 1)}{N - 2},$$

где Δ – ошибка, отражающая возможное отклонение измеряемой величины A (мощность дозы, плотность загрязнения и др.) от её среднего значения на расстоянии, равном расстоянию между узлами сетки; K – коэффициент неравномерности, равный отношению A_{\max} к её среднему значению $A_{\text{ср}}$; N – число измерений.

Можно по требуемому значению Δ и известной величине K определить минимально необходимое число измерений:

$N = \frac{2(K - 1)}{\Delta} + 2$ и размер сетки. Определение коэффициента неравномерности (K) радиоактивного загрязнения территории площадью S может быть произведено путём прямого измерения мощности дозы γ -излучения или определения поверхностной плотности загрязнения в 5–10 точках на местности. Если вероятное значение K лежит в пределах 3–10, а площадь обследуемой терри-

тории 100 км², то минимальное число измерений (N_{\min}) при оценке территории с ошибкой 20 % ($\Delta = 0,2$) составит:

$$N_{\min} = \frac{2(K-1)}{\Delta} + 2, \text{ при } K = 3 \quad N_{\min} = \frac{4}{0,2} + 2 = 22;$$

$$\text{при } K = 10 \quad N_{\min} = \frac{18}{0,2} + 2 = 92.$$

Площадь ячейки сетки отбора проб S_i будет равна:

$$\text{при } K = 3 \quad S_i = \frac{S}{N_{\min}} = \frac{100}{22} \approx 5 \text{ км}^2;$$

$$\text{при } K = 10 \quad S_i = \frac{S}{N_{\min}} = \frac{100}{92} \approx 1 \text{ км}^2.$$

При проведении наземной разведки одновременно с измерением мощности экспозиционной дозы γ -излучения над загрязнённой территорией проводится отбор образцов почвы, продукции растениеводства, кормов для сельскохозяйственных животных и молока. На основании результатов измерения и определения содержания радионуклидов в отобранных образцах устанавливаются эмпирические зависимости между мощностью дозы γ -излучения, плотностью радиоактивного загрязнения почвы и содержанием радионуклидов в продукции, производимой на загрязнённой территории. Эти зависимости, усреднённые по 15–20 точкам измерения, применяются в пределах района разведки для экспрессной оценки радиационной обстановки в первые несколько суток после аварии и выработки рекомендаций по режиму использования загрязнённой территории: укрытие или эвакуация населения, прекращение выпаса скота и перевод его на «чистые» корма, запрещение потребления населением молока и других пищевых продуктов и т. д.

После решения этих задач на территории, где уровни облучения населения не превышают аварийных нормативов, вводится сплошной радиационный контроль продукции агропромышленного производства. Решение о пригодности продуктов принимается не по содержанию в них критического радионуклида, а по суммарной β - или γ -активности. Введение бракеража на основе сплошного радиационного контроля является временным защитным мероприятием на период, когда основное загрязнение продукции происходит за счёт аэрального пути. После того как основным источником радиоактивного загрязнения становится почва, на первый план выдвигаются задачи обеспечения безопасного длительного проживания населения и ведения агропромышленного производства на территориях, уровень загрязнения которых безопасен для здоровья.

Тестовые задания

1. Как называется вид радиационного мониторинга, когда наблюдения проводятся за пределами расположения источника радиоактивного излучения:

- а) радиационный мониторинг источника излучения;
- б) радиационный мониторинг окружающей среды;
- в) радиационный мониторинг агропромышленного комплекса.

2. В каком звене радиационного мониторинга АПК выполняется первичная обработка информации:

- а) пункт наблюдения;
- б) главный центр данных;
- в) центр сбора и обработки информации.

3. В каком звене радиационного мониторинга АПК происходит выработка решений по контролю радиоактивного загрязнения местности:

- а) пункт наблюдения;
- б) главный центр данных;
- в) центр сбора и обработки информации.

4. Какой параметр служит исходной величиной для определения дозовых нагрузок на биоту:

- а) удельная активность радионуклида;
- б) мощность экспозиционной дозы;
- в) плотность радиоактивного загрязнения почвы.

5. Что является основным источником поступления радионуклидов в организм животного:

- а) корм;
- б) вода;
- в) воздух.

6. В каком случае проводится текущий радиационный мониторинг АПК:

- а) поступление радионуклидов постоянно и равномерно;
- б) разовое поступление радионуклидов в случае радиационной аварии;
- в) поступление радионуклидов непродолжительное время.

7. В каком случае проводится оперативный радиационный мониторинг АПК:

- а) поступление радионуклидов постоянно и равномерно;
- б) разовое поступление радионуклидов в случае радиационной аварии;

- в) поступление радионуклидов за счёт глобальных выпадений.

8. Какой критерий используется для определения пригодности пищевого продукта к употреблению при сплошном радиологическом контроле продукции агро-промышленного производства:

- а) содержание критического радионуклида;
- б) суммарная бета- или гамма-активность;
- в) удельная радиоактивность.

14. РАДИАЦИОННЫЕ АВАРИИ И АГРОПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

14.1. Общие положения

Существующий мировой опыт ядерной энергетики свидетельствует о том, что при работе АЭС и других предприятий ядерного теплового цикла (ЯТЦ) в технологически нормальном режиме радиационное воздействие на природную среду существенно ниже естественного радиационного фона и уровня глобального загрязнения стронцием-90 и цезием-137. Выбросы искусственных долгоживущих радионуклидов АЭС и другими предприятиями ЯТЦ при нормальной работе очень незначительны и не идентифицируются в почвах, а также в продукции растениеводства и животноводства (на фоне глобального загрязнения стронцием-90 и цезием-137 после ядерных испытаний). Принципиально другая ситуация может сложиться в случае крупной радиационной аварии на АЭС с частичным повреждением активной зоны и выходом газообразных, летучих, а в некоторых ситуациях и тугоплавких радионуклидов за пределы территории АЭС. При такой аварии происходит выброс в окружающую среду большого количества радиоактивных веществ и интенсивное загрязнение природной среды и в том числе сельскохозяйственных угодий на значительной территории. Степень радиоактивного загрязнения агропромышленной продукции и дозовые нагрузки на сельскохозяйственные растения и животных при радиационных авариях с выбросом радионуклидов в окружающую среду, а также валовой объём работ по ликвидации последствий аварий в АПК зависит от ряда факторов. Наиболее важными из них являются:

1. Общее количество выброшенных в окружающую среду радионуклидов.

2. Характер рассеяния этих радионуклидов на местности (т.е. формирующиеся плотности радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий и соответствующие им площади).

3. Радионуклидный состав инжесктированных в природную среду радионуклидов.

4. Биогеохимическая характеристика загрязнённой среды (тип почв, особенности растительного покрова, геоморфологические особенности территории и т. д.).

5. Метеорологические и геофизические факторы (количество атмосферных осадков, динамика их выпадения и др.).

6. Особенности ведения агропромышленного производства (интенсивность использования земельного фонда, направление сельскохозяйственного производства и др.).

7. Сезон, когда произошёл выброс радиоактивных веществ в окружающую среду.

В случае гипотетической аварии на реакторе типа ВВЭР-1000 (базовый в нашей энергетике) выброс биологически значимых радионуклидов может составить более $5,6 \cdot 10^{16}$ Бк, включая $1,4 \cdot 10^{15}$ Бк ^{131}I , и $1,1 \cdot 10^{14}$ Бк ^{137}Cs . В результате радиоактивному загрязнению могут подвергнуться сельскохозяйственные угодья и природные экосистемы на значительной территории.

14.2. Периодизация радиационной обстановки после аварии

При радиационной аварии с выбросом веществ в окружающую среду и загрязнением сельскохозяйствен-

ных угодий принято выделять несколько периодов в развитии радиационной ситуации.

Первый период. При выбросе смеси свежих продуктов ядерного деления при радиационной аварии первый период обычно называют периодом йодной опасности. Основным радиационным фактором, определяющим характер защитных мероприятий, связан с наличием в выпадениях короткоживущих радионуклидов йода, в первую очередь, йода-131 с периодом полураспада 8,04 суток. Если радиоактивные выпадения происходят в пастбищный сезон, то радионуклиды йода быстро включаются в трофические цепи миграции, в частности интенсивно переходят в молоко при потреблении коровами пастбищной растительности, загрязнённой аэральным путём. Период йодной опасности продолжается несколько месяцев. Особенно острыми в радиационном отношении являются первые недели. Через два месяца после разового выброса йода-131 его количество уменьшается в 250 раз. Главным защитным мероприятием в этот период является перевод животных на стойловое содержание, а для населения – исключение из рациона молока, а также некоторых других продуктов, содержащих йод-131.

Второй период. Второй период в развитии радиационной обстановки после выброса радионуклидов можно охарактеризовать как период преимущественно внекорневого загрязнения растений и последующего включения задержанных на надземной фитомассе радионуклидов в сельскохозяйственные цепочки миграции. Интенсивность переноса радионуклидов в цепи «выпадение → растения → животные» достаточно велика, так как надземные части растений могут обеспечить захват сравнительно большого количества радионуклидов из воздуха. Продолжительность этого периода – первый вегетационный период после радиоактивных выпадений.

Третий период. Третий период в развитии ситуации в АПК начинается со второго вегетационного периода после радиоактивных выпадений. Основным механизмом вовлечения радионуклидов в сельскохозяйственные цепи миграции становится корневое усвоение радионуклидов из почвы растениями. Продолжительность этого периода может охватывать десятки лет, если в составе смеси радиоактивных веществ содержатся долгоживущие радионуклиды: ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu и др. В течение этого периода снижение накопления долгоживущих радионуклидов в сельскохозяйственной продукции является следствием распада радионуклидов, постепенного уменьшения подвижности радионуклидов в трофических цепочках под воздействием естественных биогеохимических процессов, например, вследствие усиления фиксации радионуклидов со временем твёрдой фазой почвы и миграции их за пределы корнеобитаемого слоя почвы и других аналогичных процессов. Снижение вовлечения радионуклидов в сельскохозяйственные цепочки в этот период может явиться результатом выполнения как обычных, так и специальных мелиоративных работ в сфере агропромышленного производства.

14.3. Радиоактивное загрязнение после крупных радиационных аварий

Авария на Южном Урале в 1957 г. Эта авария относится к числу одной из наиболее тяжёлых. В результате аварии образовался радиоактивный след, получивший название Восточно-Уральского. Радионуклидный состав выброса характеризовался преимущественно присутствием ($^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$) в количестве 66 % и ($^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$) – 24,9 % (табл. 14.1).

Таблица 14.1

Радионуклидный состав выброса

Радионуклид	Период полураспада	Вид излучения	Вклад в содержание, %
^{89}Sr	5,05 суток	β, γ	Следы
^{90}Sr ($+^{90}\text{Y}$)	64,05 года	β	5,400
^{95}Zr ($+^{95}\text{Nb}$)	65,00 суток	β, γ	24,900
^{106}Ru ($+^{106}\text{Rh}$)	368,20 суток	β, γ	3,700
^{137}Cs	30,11 года	β, γ	0,036
^{144}Ce ($+^{144}\text{Pr}$)	284,3 суток	β, γ	66,000
^{147}Pm	2,60 года	β, γ	Следы
^{155}Eu	5,00 лет	β, γ	Следы
$^{239}\text{Pu}, ^{240}\text{Pu}$	-	α	Следы

Максимальная плотность радиоактивного загрязнения по оси следа вблизи источника выброса достигала $1,5 \cdot 10^5$ Ки/км² ($5,6 \cdot 10^9$ Бк/м²) по сумме радионуклидов, или $4 \cdot 10^3$ Ки/км² ($1,5 \cdot 10^7$ Бк/м²) по стронцию-90. Начальная мощность экспозиционной дозы, нормированная по плотности радиоактивного загрязнения территории, достигала 150 мкР/ч на 1 Ки/км² по стронцию-90 ($3,7 \cdot 10^4$ Бк/м²). На участках с максимальным загрязнением мощность экспозиционной дозы достигала 0,6 Р/ч. Концентрация суммы радионуклидов, отнесённая к единичной плотности загрязнения, составляла в среднем в траве $1,4 \cdot 10^{-5}$, зерне $2,2 \cdot 10^{-7}$ и молоке $6,2 \cdot 10^{-7}$ Ки/кг (л) или соответственно $5,2 \cdot 10^5$; $8,4 \cdot 10^3$ и $2,3 \cdot 10^2$ Бк/кг (л) в расчёте на плотность загрязнения стронцием-90 1 Ки/км² ($3,7 \cdot 10^4$ Бк/м²). В качестве критерия безопасного проживания населения была установлена плотность загрязнения 2 Ки/км² по стронцию-90 ($7,4 \cdot 10^4$ Бк/м²) или 300 мкР/ч по начальной мощности экспозиционной дозы γ -излучения. В течение первого года после аварии предел поступления стронция-90 в организм человека был равен $1,4 \cdot 10^{-6}$ Ки/год ($5,2 \cdot 10^4$ Бк/год). Авария произошла

в конце сентября 1957 г., когда выпас скота практически закончился и были убраны все культуры. Однако концентрации радионуклидов в пастбищной растительности, а также в различных сельскохозяйственных культурах, пищевых продуктах, фураже и питьевой воде были весьма высокими. Так, на удалении 12–18 км от места аварии концентрация смеси радионуклидов в травянистой растительности через несколько суток после выброса достигала 9,3–9,7 Ки/кг ($3,4\text{--}3,6 \cdot 10^{11}$ Бк/кг). С первого по восьмой месяц после аварии в продукции растениеводства (и в воде) преобладали редкоземельные радионуклиды, а в молоке – стронций-90 (табл. 14.2).

Таблица 14.2

**Радионуклидный состав в период с 1-го по 8-й месяцы
после аварии, %**

Объекты исследований	$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	^{137}Cs	Сумма редкоземельных радионуклидов
Зерно	16,4	5,1	64
Сено	16,5	5,1	63
Молоко	70,0	—	—
Овощи, картофель	16,0	6,0	64
Вода	28,0	—	72

В ряде близлежащих к месту выброса населённых пунктов в первые сутки в организм коров могло поступить 1–5 Ки ($3,7 \cdot 10^{10}$ – $1,9 \cdot 10^{11}$ Бк) радионуклидов, а концентрация β -излучающих нуклидов в разных органах и тканях сельскохозяйственных животных достигала $3 \cdot 10^{-5}$ Ки/кг ($1,1 \cdot 10^6$ Бк/кг). При этом содержании радионуклидов через 9–12 суток после формирования следа началась гибель сельскохозяйственных животных от острой лучевой болезни. Лучевое поражение сельскохозяйственных животных развивалось при плотности загрязнения территории $2\text{--}3 \cdot 10^4$ Ки/км² ($7,4 \cdot 10^8$ – $1,1 \cdot 10^9$ Бк/м²),

мощностях дозы γ -излучения 170–400 мкР/с и поглощённой дозе γ -излучения за 12 суток 1,35–2,9 Гр, т. е. 135–290 рад. Поглощённые дозы в различных отделах желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) достигали примерно 20–50 Гр (2 000–5 000 рад), причём максимальные величины отмечались в толстом отделе кишечника, где они были в 15–25 раз выше, чем в скелете. При плотности загрязнения менее $4,5 \cdot 10^3$ Ки/км² ($1,67 \cdot 10^8$ Бк/м²), когда концентрация β -излучающих нуклидов в траве составляла $7,6 \cdot 10^{-4}$ Ки/кг ($2,8 \cdot 10^7$ Бк/кг), мощность дозы γ -излучения 25 мкР/с, поглощённая доза γ -излучения – 0,13 Гр, поглощённая доза в прямой кишке менее 4,15, а в скелете – 0,15 Гр, гибели сельскохозяйственных животных не отмечалось в течение 6 месяцев. После вывода их из загрязнённой зоны все показатели жизнедеятельности нормализовались.

С течением времени после аварии росла значимость потребления загрязнённых сельскохозяйственных продуктов как источника облучения населения. Если в первые 180 суток после аварии доза внешнего γ -излучения в 2 раза превышала дозы на желудочно-кишечном тракте от внутреннего облучения, то к 270-м суткам эти величины сравнялись. Постепенно увеличивалась и становилась более значимой доза облучения костной ткани стронцием-90, поступившим с пищевыми продуктами. К 12-му году после аварии дозы облучения желудочно-кишечного тракта и костного мозга практически сравнялись. Основным источником поступления радионуклидов в организм человека в первый период после аварии являлся хлеб, выпеченный из зерна, находившегося в личном хозяйстве (табл. 14.3).

Таблица 14.3

**Относительный вклад отдельных продуктов в суммарное
содержание в рационе стронция-90**

Продукты	Масса, кг/сут	Содержание стронция-90 в продукте по отношению ко всему рациону, %
Хлеб	0,65	70
Молоко	0,45	20
Картофель	0,50	3
Вода	1,50	7
Весь рацион	3,10	100

Основными продуктами, с которыми поступал стронций-90, были хлеб и молоко. В более поздние сроки после аварии, когда главной трофической цепочкой стала система «почва – растение», основными источниками стронция-90 были для человека молоко, хлеб и вода (табл. 14.4).

Таблица 14.4

**Содержание стронция-90 в продуктах при плотности
загрязнения почвы 1 Ки/км² ($3,7 \cdot 10^4$ Бк/м²)**

Продукты	КП (Бк/кг) / (Бк/м ²) · 10 ⁻⁵	Масса про- дукта, кг/сут	Суточный вклад с про- дуктом, Ки (Бк)	Содержание стронция-90 в продукте по отноше- нию ко всему рациону, %
Хлеб	75	0,65	$4,9 \cdot 10^{-11}$ (1,81)	22
Молоко	180	0,45	$8,1 \cdot 10^{-11}$ (3,00)	36
Мясо	45	0,08	$4,0 \cdot 10^{-12}$ (0,15)	2
Картофель	26	0,35	$9,0 \cdot 10^{-12}$ (0,33)	4
Огурцы	130	0,05	$6,0 \cdot 10^{-12}$ (0,22)	3
Капуста	240	0,05	$1,2 \cdot 10^{-11}$ (0,44)	5
Лук	400	0,01	$4,0 \cdot 10^{-12}$ (0,15)	2
Вода	40	1,50	$6,0 \cdot 10^{-11}$ (2,22)	26
Весь рацион	-	3,14	$2,25 \cdot 10^{-10}$ (8,32)	100

Через 8 лет после аварии в организм человека с молоком переходило 50% стронция-90 от его содержания в рационе. На долю овощей приходилось 15%, картофеля – 12, яиц – 8, мяса – 7 и хлеба – 4%. Через 30 лет после аварии суточное поступление стронция-90 в организм населения с пищевыми продуктами снизилось в 1 300 раз по сравнению с начальным периодом после выброса и в 200 раз относительно 1958 г. Это вызвано более быстрым по сравнению со скоростью радиоактивного распада уменьшением концентрации стронция-90 в молоке и в других сельскохозяйственных продуктах (до 110 раз за 30 лет) под действием физико-химических процессов трансформации этого радионуклида в почвах и других природных процессов. Предел годового поступления стронция-90 ($3,2 \cdot 10^{-7}$ Ки/год; $1,2 \cdot 10^4$ Бк/год) превышался при проживании на территории с плотностью загрязнения стронцием-90 1 Ки/км² ($3,7 \cdot 10^4$ Бк/м²) на протяжении первых четырёх лет после аварии. В 1989–1990 гг. годовое поступление стронция-90 в организм населения, проживающего на территории с плотностью загрязнения стронцием-90 1 Ки/км², составляло 3% от предела допустимого поступления. За 30 лет проживания на территории с плотностью загрязнения стронцием-90 1 Ки/км² эффективная эквивалентная доза составила 0,012 Зв (1,2 бэр). Эффективные эквивалентные дозы на красный костный мозг и кости равнялись соответственно примерно 0,025 и 0,08 Зв, т. е. 2,5 и 8 бэр. В 1957–1959 гг. из употребления было изъято около 10 тыс. т различной сельскохозяйственной продукции. Площадь 6 200 га подвергалась дезактивации, которая в основном проводилась с помощью глубокой вспашки. Верхний, содержащий радионуклиды слой заглублялся на 0,5 м. В 1958–1959 гг. в головной части следа была проведена обычная вспашка

на площади 20 тыс. га. В 1958 г. из сельскохозяйственного использования было выведено 59 тыс. га в Челябинской и 47 тыс. га в Свердловской области. В 1961 г. все земли в Свердловской области уже использовались, а в Челябинской области к 1990 г. площадь возвращённых к использованию земель составила 40 тыс. га. В результате проведения комплекса мелиоративных мероприятий в продукции специализированных хозяйств концентрации стронция-90 в мясе и молоке были соответственно ниже в 2–7 и 3–4 раза по сравнению с «неупорядоченным» сельским хозяйством. В личных подсобных хозяйствах, где основу кормового рациона скота составляют естественные травы (сено), содержание в корме стронция-90 было более высоким, чем в кормах, получаемых на пахотных почвах.

При аварии на Чернобыльской АЭС интенсивный выброс радионуклидов шёл 10 суток в форме газов и аэрозолей. Суммарный выброс продуктов деления составил около 50 млн Ки ($1,85 \cdot 10^{18}$ Бк).

Тестовые задания

1. Какое радиационное воздействие на природную среду оказывают АЭС при работе в технологически нормальном режиме:

- а) существенно выше естественного радиационного фона;
- б) существенно ниже естественного радиационного фона;
- в) на уровне глобального загрязнения.

2. Какого порядка активность имеют радионуклиды, выброшенные в окружающую среду при аварии ядерного реактора:

- а) 10^6 Бк;

- б) 10^{10} Бк;
- в) 10^{16} Бк.

3. Какой из периодов радиационной ситуации при аварии ядерного реактора с выбросом радионуклидов в окружающую среду называют периодом йодной опасности:

- а) первые несколько недель после аварии;
- б) первый вегетационный период;
- в) второй вегетационный период.

4. Какой из перечисленных продуктов следует в первую очередь исключить из рациона питания населения в период йодной опасности после радиационной аварии:

- а) хлеб;
- б) молоко;
- в) картофель.

5. Какой из периодов радиационной ситуации при аварии ядерного реактора с выбросом радионуклидов в окружающую среду называют периодом внекорневого загрязнения растений:

- а) первые несколько недель после аварии;
- б) первый вегетационный период;
- в) второй вегетационный период.

6. Какой из периодов радиационной ситуации при аварии ядерного реактора с выбросом радионуклидов в окружающую среду называют периодом корневого усвоения радионуклидов:

- а) первые несколько недель после аварии;
- б) первый вегетационный период;
- в) второй вегетационный период.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Авария радиационная – потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью оборудования, неправильными действиями персонала, стихийными бедствиями или иными причинами, которые могут привести или привели к незапланированному облучению людей или радиоактивному загрязнению окружающей среды, превышающему величины, регламентированные для контролируемых условий.

Аккумуляция радиоактивных изотопов в организме – накопление радиоактивных изотопов в живых организмах, подчиняющееся общим биологическим закономерностям.

Активность (лат. *activus* – деятельный) – мера радиоактивности. Для определенного количества радионуклида в определенном энергетическом состоянии в заданный момент времени активность задается в виде $A = dN/dt$, где dN – ожидаемое число спонтанных ядерных превращений начиная от данного энергетического уровня за интервал времени dt . В системе СИ единицей измерения активности является **беккерель** (Бк).

Альфа-излучение (α -излучение) (гр. *alpha* – первая буква алфавита) – поток положительно заряженных частиц ядер атомов гелия (**α -частицы**).

Альфа-распад (α -распад) – испускание альфа-частиц атомными ядрами в процессе самопроизвольного радиоактивного распада. В результате альфа-распада «материнское» ядро с зарядом Z и массовым числом A превращается в новое «дочернее» ядро с зарядом $Z-2$ и массовым числом $A-4$.

Альфа-частица (α -частица) – ядро атома гелия (${}^2\text{He}$), испускаемое некоторыми радиоактивными эле-

ментами, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, прочно связанных между собой ядерными силами.

Аномалии радиоактивные (лат. *radiare* – излучать, *activus* – деятельный) – превышение естественного (природного) радиационного фона на каком-либо участке земной поверхности или в отдельной точке. Они могут быть обусловлены повышенным содержанием радиоактивных изотопов элементов в горных породах, воде и воздухе.

Атомная электростанция (АЭС) – электростанция, на которой атомная (ядерная) энергия преобразуется в электрическую.

Атомы меченые – атомы, отличающиеся от большинства атомов данного элемента либо радиоактивностью, либо атомной массой. Использование меченых атомов дает возможность проследить за движением атомов изучаемого элемента или его соединения при различных процессах.

Безопасность радиационная – мероприятия, направленные на предохранение производственного персонала и населения от ионизирующего излучения. В России установлены нормы годового облучения (годовой радиационной нагрузки): для профессионалов, работающих с радиоактивными веществами, – 5 бэр, для населения, проживающего вблизи АЭС и другого подобного производства, – 0,5 бэр.

Беккерель (Бк) – единица активности нуклида (изотопа) в радиоактивном источнике. 1 Бк равен активности нуклида, при которой за 1 с происходит 1 акт радиоактивного распада.

Бета-излучение (β -излучение) (гр. *beta* – вторая буква алфавита) – поток электронов или позитронов, испускаемых атомными ядрами радиоактивных изотопов в процессах бета-распада.

Бета-распад – самопроизвольное превращение ядер, сопровождающееся испусканием (или поглощением) электрона и антинейтрино или позитрона и нейтрино. Известны 3 типа бета-распада: электронный (превращение нейтрона в протон), позитронный (протона в нейтрон) и электронный захват. При электронном бета-распаде заряд ядра увеличивается на 1, при позитронном – уменьшается на 1; массовое число не меняется.

Бета-частицы (β -частицы) – электроны и позитроны, испускаемые атомными ядрами при их бета-распаде.

Болезнь лучевая – острое лучевое поражение, заболевание, вызванное большой (свыше 1 Гр) дозой ионизирующего излучения.

Болезнь лучевая острая – типичный вариант радиационного поражения организма, возникающего в результате однократного общего внешнего относительно равномерного воздействия ионизирующего излучения в дозах, превышающих 1 Гр.

Вещества радиоактивные (лат. *radiare* – излучать, *activus* – деятельный) – вещества, содержащие в своем составе радионуклиды. Их делят на природные (естественные) и искусственные, получаемые с помощью ядерных реакций.

Вода тяжелая (D_2O) – изотопная разновидность воды, в молекулах которой атомы водорода заменены атомами дейтерия. Соотношение в природных водах H : D в среднем 6900 : 1.

Воздействие радиационное (лучевое) – действие ионизирующего излучения, в том числе при радиоактивных загрязнениях.

Восстановление пострadiационное – способность организма, пораженного ионизирующим излучением, к выздоровлению, восстановлению структуры и функций.

Выпадения глобальные (лат. *globus* – шар) – выпадения на обширных территориях радиоактивных продуктов ядерных взрывов, формирующихся из мельчайших частиц и газов, выброшенных в стратосферу, оседающие, начиная через несколько недель после взрыва, в течение многих месяцев и лет в основном с атмосферными осадками.

Выпадения локальные (лат. *localis* – местный) – выпадения радиоактивных осадков на территории, прилегающей к месту взрыва ядерного боеприпаса или других ядерных устройств (атомных электростанций, обогатительных фабрик и т. п.), в течение первых 2–3 суток.

Газы радиоактивные (лат. *radiare* – излучать, *activus* – деятельный) – радионуклиды, находящиеся в газообразном состоянии.

Гамма-квант (γ -квант) (лат. *quantum* – сколько) – фотон большой энергии. Возникает при квантовых переходах в атомных ядрах, превращениях элементарных частиц, радиоактивных распадах и т. д.

Гамма-лучи (γ -лучи), гамма-излучение (γ -излучение) – коротковолновое электромагнитное излучение, испускаемое возбужденными атомными ядрами.

Гамма-установка – установка, предназначенная для использования гамма-излучающего радиоактивного препарата с целью получения пучка гамма-излучения.

Гамма-эквивалент (лат. *aequus* – равный, *valens* – имеющий силу) – количество радия (в миллиграммах), которое при идентичных условиях измерения создает такую же мощность экспозиционной дозы гамма-излучения, как и данный радиоактивный препарат.

Грей (Гр) – единица поглощенной дозы ионизирующего излучения в системе СИ, равная 1 Дж энергии излучения, поглощенной 1 кг вещества, подвергающегося облучению. $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$.

Действие ионизирующей радиации генетическое (гр. *genesis* – происхождение) – повреждение генетического (наследственного) материала клетки, передающееся следующему поколению.

Действие ионизирующих излучений биологическое – биохимические, физиологические, генетические и другие изменения, возникающие в живых клетках и организмах в результате действия ионизирующих излучений.

Детекторы бета-излучений (лат. *detector* – обнаруживающий) – приборы для обнаружения бета-частиц и измерения их потоков.

Детекторы гамма-излучений – приборы для обнаружения гамма-лучей и измерения их потоков.

Доза излучения – энергия ионизирующего излучения, поглощаемая веществом, рассчитанная на единицу его массы.

Доза излучения поглощенная (D , D_n) (radiation absorbed dose) – фундаментальная дозиметрическая величина, характеризующая воздействие всех видов ионизирующих излучений на все виды облучаемых объектов. Энергия излучения, поглощенного единицей массы облученного вещества. Определяется как $D = de/dm$, где D –поглощенная доза; de – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме; dm – масса вещества в этом элементарном объеме. В единицах СИ поглощённая доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм (Дж/кг), и имеет специальное название – грей (Гр). $1\text{ Гр} = 100\text{ рад}$.

Доза излучения эквивалентная (H , $D_{\text{экв}}$) – поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на взвешивающий коэффициент для данного излучения, учитывает эффект того, что при одинаковой поглощённой дозе различные виды радиации производят неодинаковое био-

логическое действие. При одной и той же поглощённой дозе радиобиологический разрушительный эффект тем выше, чем плотнее ионизация, создаваемая излучением. Характеризует воздействие радиации, равной произведению поглощенной дозы в органе или ткани на коэффициент пропорциональности ($K_{обз}$) – коэффициент относительной биологической эффективности, различный для различных видов ионизирующих излучений. Единица измерения в системе СИ – зиверт (Зв). $1\text{Зв} = 100\text{бэр}$.

Доза излучения экспозиционная ($D_{\text{эксп}}$) – характеризует количество падающей на объект энергии излучения (дозы поглощения) по эффекту ионизации, вызываемому в воздухе. Единица измерения экспозиционной дозы кулон на килограмм равна дозе, при которой за счет ионизации молекул воздуха массой 1 кг возникают ионы, несущие электрический заряд 1 Кл каждого знака. 1 рентген (Р) – такая доза фотонного излучения, при которой в 1 см^3 воздуха в процессе ионизации образуется $2,079 \cdot 10^9$ пар ионов каждого знака. Единица измерения в системе СИ – зиверт (Зв). $1\text{Зв} = 100\text{Р}$.

Доза эффективная – величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности. Единица измерения – $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ (Дж/кг), которая имеет специальное наименование – зиверт (Зв).

Доза летальная (абсолютная), ЛД – минимальное количество вредного агента, попадание которого в организм неминуемо приводит к его смерти.

Доза облучения – величина излучения, измеряемая по ионизации воздуха. Единица измерения – рентген.

Доза полуметальная ($LD_{50/30}$) (лат. *letalis* – смертельный) – доза, вызывающая гибель 50 % подвергнутых

облучению организмов в течение 30 суток после воздействия радиации.

Доза сублетальная (лат. *sub* – под, *letal* – смертельный) – доза облучения, вызывающая лучевую болезнь легкой степени, без смертельных исходов.

Дозиметр (гр. *dosis* – порция, прием, *metron* – мера) – прибор, предназначенный для измерения уровней ионизирующих излучений и загрязненности объектов радионуклидами.

Допустимые пределы доз (ДПД) – основные гигиенические нормативы допустимого облучения в результате использования источников ионизирующего излучения, установленные федеральным законом «О радиационной безопасности населения».

Загрязнение радиоактивное (лат. *radiare* – излучать, *activus* – деятельный) – присутствие радиоактивных веществ техногенного (производственного) происхождения на поверхности или внутри материала или тела человека, в воздухе и т. д., которое может привести к облучению организма более 10 мкЗв в год.

Загрязнение радионуклидное (лат. *radiare* – излучать, *nucleus* – ядро) – привнесение в экосистему радионуклидов техногенного (производственного) происхождения.

Загрязнение растений радиоактивное аэральное вторичное (гр. *aer* – воздух) – поступление в растения радионуклидов и загрязненных радионуклидами частиц почвы в результате подъема их ветром или дождем с почвенного покрова и попадания на поверхность растения.

Загрязнение растений радиоактивное аэральное первичное – загрязнение растений радионуклидами из воздуха. Его степень зависит от фазы развития растений, количества фитомассы, физического состояния, растворимости радионуклидов и др.

Закон радиоактивного распада – со временем число атомных ядер радиоактивного элемента убывает по экспоненте: $N = N_0 e^{-\lambda t}$, где N – число атомов радиоактивного элемента, не распавшихся через интервал времени t ; N_0 – число атомов данного элемента в любой, произвольно принятый за нулевой момент времени; λ – постоянная распада (статистическая вероятность распада атома за единицу времени, связанная с периодом полураспада $T_{1/2}$ соотношением $\lambda = 0,693/T_{1/2}$) данного радиоактивного элемента; e – основание натуральных логарифмов.

Захоронение радиоактивных отходов – удаление радиоактивных отходов, не предусматривающее их извлечение.

Защита от ионизирующих излучений – комплекс мер с применением специальных устройств и оборудования, снижающих уровень излучения на месте нахождения персонала до предельно допустимой дозы (ПДД).

Защита противолучевая – комплекс методов и средств, направленных на обеспечение безопасных условий труда персонала и жизни населения в условиях возможного воздействия ионизирующего излучения.

Защита радиологическая (лат. *radiare* – излучать, гр. *logos* – слово, учение) – система мер по защите человека и животных от действия ионизирующей радиации.

Зиверт (Зв) – единица эквивалентной дозы любого вида излучения, поглощенной биологической тканью. $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ бэр}$.

Зона возможного опасного радиоактивного загрязнения – территория, в пределах которой на случай общей радиационной аварии на атомной станции прогнозируются нагрузки, превышающие $0,1 \text{ Зв}$ (10 бэр) в год.

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

Зона радиационной аварии – территория, на которой суммарное внешнее и внутреннее облучение населения может превысить регламентированную нормативными документами дозу за первый год после радиационной аварии.

Зона радиоактивного загрязнения – территория с находящимися на ней населенными пунктами и отдельными объектами, на которой техногенный фон излучения превышает уровни, установленные компетентными органами.

Излучение – испускание быстро движущихся заряженных частиц или электромагнитных волн.

Излучение ионизирующее – электромагнитное (рентгеновские лучи, гамма-лучи) и корпускулярное (альфа-частицы, бета-частицы, поток протонов и нейтронов), в той или иной степени проникающее в живые ткани и производящее в них изменения, связанные с «выбиванием» электронов из атомов и молекул или прямым и опосредованным возникновением ионов.

Излучение радиоактивное – испускание альфа-, бета- и гамма-лучей.

Излучение ядерное – элементарные частицы и гамма-кванты, испускаемые при радиоактивном распаде ядер.

Излучения ионизирующие, радиация ионизирующая (гр. *ion* – идущий, лат. *radiare* – излучать) – любые излучения, взаимодействие которых с веществом приводит к образованию в нем ионов разного знака. Ионизирующие излучения состоят из заряженных и незаряженных частиц, включая фотоны.

Изотоп радиоактивный, радиоизотоп (гр. *isos* – одинаковый, *topos* – место, лат. *radiare* – излучать, *activus* – деятельный) – радионуклид химического элемента.

Изотопы – разновидности одного химического элемента, занимающие одно и то же место в периодической системе элементов, т. е. имеющие одинаковый заряд ядра, но различающиеся массами атомов.

Индикация ионизирующих излучений биологическими методами – оценка величины дозы излучения по биологическим реакциям живых организмов (смертности, степени лейкопении, изменению окраски и пигментации кожи, выпадению волос и др.). Применяют для определения относительной биологической эффективности тяжелых частиц с большой энергией, а также при учете индивидуальных различий радиочувствительности.

Ионизация – превращение атомов и молекул в положительно и отрицательно заряженные ионы. Степень ионизации определяется отношением числа ионов к числу нейтральных частиц.

Категория А облучаемых лиц – профессиональные работники (персонал), которые постоянно или временно работают непосредственно с источниками ионизирующего излучения.

Категория Б облучаемых лиц – ограниченная часть населения, лица, которые не работают непосредственно с источниками ионизирующего излучения, но по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться воздействию радиоактивных веществ и других источников ионизирующего излучения, применяемых в учреждении и/или удаляемых во внешнюю среду.

Категория В облучаемых лиц – население страны, республики, края или области, испытывающее естественное радиационное воздействие.

Квант – 1) количество (порция) электромагнитного излучения, которое в единичном акте способен излучить или поглотить атом; 2) элементарная частица (фотон).

Коэффициент радиационного риска – коэффициент, учитывающий разную радиочувствительность органов и тканей человека или животных при облучении. Коэффициент радиационного риска применяется для расчета эффективной и эквивалентной дозы.

Кривая дозовая – линия, отражающая зависимость радиобиологического эффекта от дозы излучения, служащая основой количественной характеристики этого эффекта.

Кюри (Ки) – внесистемная единица активности радиоактивных изотопов. Кюри – количество любого радиоактивного вещества, в котором число радиоактивных распадов в секунду равно $3,7 \cdot 10^{10}$. $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$. 1 Ки соответствует распаду 1 г радия. Это очень большая величина, поэтому употребляют дробные единицы: милликюри (мКи) = 10^{-3} Ки ; микрокюри (мкКи) = 10^{-6} Ки ; нанокюри (нКи) = 10^{-9} Ки ; пикокюри (пКи) = 10^{-12} Ки .

Масса атомная – масса атома химического элемента, выраженная в атомных единицах массы. 1 атомная единица массы равна $1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Могильник радиоактивных отходов – сооружение, предназначенное для захоронения твердых и отверждённых радиоактивных отходов.

Мощность дозы – отношение приращения дозы (поглощенной, эквивалентной, эффективной) dD , dH , dE за интервал времени dt к этому интервалу времени: $D = dD/dt$ ($\text{Гр} \cdot \text{с}^{-1}$); $H = dH/dt$ ($\text{Зв} \cdot \text{с}^{-1}$); $E = dE/dt$ ($\text{Зв} \cdot \text{с}^{-1}$). На практике за единицу времени могут приниматься час, сутки, год.

Мутации радиационные – мутации, возникающие в клетке под влиянием ионизирующего излучения.

Нейтрино (ν) – стабильная незаряженная элементарная частица со спином $\frac{1}{2}$ и, по-видимому, нулевым

магнитным моментом. Нейтрино участвуют только в слабых и гравитационных взаимодействиях и поэтому чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом.

Нейтрон (n) – нейтральная элементарная частица с массой, равной 1,00866 атомных единиц массы. В свободном состоянии нейтрон нестабилен и имеет время жизни около 16 мин. Вместе с протонами нейтроны образуют атомные ядра; в ядрах нейтрон стабилен.

Номер атомный – порядковый номер (зарядовое число) химического элемента в периодической системе элементов, равный числу протонов в ядре и определяющий многие свойства атома.

Нуклид – обозначение любого из атомов, независимо от его принадлежности к химическому элементу.

Облучение – воздействие на объект любыми видами излучения, в т.ч. ионизирующим.

Обстановка радиационная (радиологическая) – состояние местности после заражения радиоактивными веществами. Радиационная обстановка оценивается по мощности дозы гамма-излучения на местности и плотности загрязнения объектов окружающей среды отдельными радионуклидами.

Осадки радиоактивные – осаждающиеся из атмосферы на поверхность земли (твердые или жидкие) частицы, содержащие радионуклиды. Источником радиоактивных осадков являются ядерные взрывы и аварийные выбросы.

Отходы радиоактивные (РАО) – изделия, материалы, вещества и биологические объекты, загрязненные радионуклидами в количествах, превышающих значения, установленные действующими нормами и правилами, и не подлежащие дальнейшему использованию. В ядерной энергетике выделяют низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные отходы.

Переработка радиоактивных отходов – комплекс технологических процессов, направленных на уменьшение объемов радиоактивных отходов и перевод их в формы, прочно фиксирующие радионуклиды.

Период «йодной опасности» – первый период в динамике радиационной обстановки при ядерном взрыве или аварии на АЭС, когда наиболее опасными для человека и животных являются радионуклиды йода (в первую очередь йод-131), которые могут вызвать радиационное поражение. Продолжительность периода «йодной опасности» – 40–60 суток.

Период корневого поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию – третий период в динамике радиационной обстановки после радиационной аварии, начинающийся со второго года после аварии. Основную опасность представляют изотопы цезия-137 и стронция-90.

Период полураспада радиоактивных изотопов – промежуток времени, в течение которого в результате радиоактивного распада количество ядер данного радионуклида уменьшается в 2 раза. Соответственно вдвое уменьшается интенсивность (доза) ионизирующего излучения, испускаемого этим веществом.

Позитрон (e^+) – античастица электрона. Позитрон стабилен, но в веществе из-за аннигиляции с электронами (e^-) существует очень короткое время.

Поступление радионуклидов – численное значение активности радионуклидов, проникающих внутрь организма при вдыхании, заглатывании и через кожу.

Потери линейные – потеря энергии ионизирующей частицы на единицу пробега. На образование одной пары ионов в воздухе затрачивается примерно 34 эВ.

Правило Бергонье и Трибондо – закономерность, согласно которой радиочувствительность клеток тем

выше, чем больше у них способность к размножению и чем они менее дифференцированы, т.е. радиочувствительность ткани прямо пропорциональна пролиферативной активности (скорости роста) и обратно пропорциональна степени дифференцированности ее клеток.

Предел дозы (ПД) – основной дозовый предел для категории Б облучаемых лиц. Предел дозы представляет собой такое наибольшее среднее значение индивидуальной эквивалентной дозы за календарный год у критической группы лиц, при котором равномерное облучение в течение 70 лет не может вызвать в состоянии здоровья неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами.

Предельно допустимая доза (ПДД) – основной дозовый предел для категории А облучаемых лиц. Предельно допустимая доза – такое наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за календарный год, при котором равномерное облучение в течение 50 лет не может вызвать в состоянии здоровья неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами.

Пробег частицы – длина пути элементарной частицы (электрона, альфа-частицы и т.д.) в поглощающей среде (воздухе, биологической ткани и т.п.).

Продукт распада – нуклид или радионуклид, образующийся в процессе распада. Он может быть получен непосредственно из радионуклида или в результате серии последовательных распадов через несколько радионуклидов.

Протон (p) – устойчивая элементарная частица с положительным зарядом, равным 1, и массой 1,00728 атомных единиц. Протоны образуют вместе с нейтронами ядра всех химических элементов. Число протонов в атомном ядре определяет заряд ядра и место химиче-

ского элемента в периодической системе Менделеева. Протоны входят в состав космических лучей, являясь основной компонентой космического излучения.

Пыль радиоактивная – пыль, содержащая радионуклиды техногенного (производственного) происхождения.

Работа ионизации – величина энергии, затрачиваемая на образование одной пары ионов.

Рад (рад) – внесистемная единица поглощенной дозы ионизирующих излучений, соответствующая энергии излучения 100 эрг, поглощенной веществом массой 1 г. $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 2,388 \cdot 10^{-6} \text{ кал/г}$.

Радикация проникающая – поток гамма-лучей и нейтронов, обладающих большой проникающей и поражающей организмы способностью.

Радикалы свободные – атомы или химические соединения с не спаренным (не скомпенсированным) электроном на внешней оболочке, являющиеся промежуточными во многих химических реакциях. Они образуются в организме при действии ионизирующего излучения.

Радиоактивность – свойство радионуклидов спонтанно испускать ионизирующее излучение или самопроизвольное превращение неустойчивого изотопа одного химического элемента в основном или возбужденном (метастабильном) состоянии в изотоп другого элемента, сопровождающееся испусканием элементарных частиц или ядер.

Радиоактивность наведенная – радиоактивность атомов вещества, возникающая в результате воздействия на него ядерными частицами – потоком нейтронов, протонов и др.

Радикационная экология (радиозэкология) – раздел экологии, изучающий влияние радиоактивных веществ (нуклидов) на организмы, распределение, мигра-

цию и круговорот нуклидов в экосистемах (популяциях, биоценотической среде, особенно в почве, биоценозах), воздействие ионизирующего излучения на экологические системы (популяции организмов и биогеоценозы).

Радиобиология – наука о действии всех видов ионизирующего излучения на живые организмы, их сообщества и биосферу в целом.

Радиация – поток корпускулярной и/или электромагнитной энергии.

Радиация ионизирующая (радиационный фон) – естественные излучения (например, космические лучи), которые приводят к ионизации (образованию ионов и свободных электронов) электрически нейтральных атомов и молекул.

Радиация проникающая – поток гамма-лучей и нейтронов, обладающих большой проникающей и поражающей организмы способностью.

Радиография – метод исследования динамики перераспределения радиоизотопов в организме с применением самопишущего прибора.

Радиоиндикация – способ изучения функции и строения органов и систем живого организма путем наблюдения за изменениями введенных в него радиоактивных изотопов или меченных ими соединений.

Радиология – комплексная наука об ионизирующих излучениях. Изучает свойства ионизирующих излучений, способы и средства их обнаружения и регистрации, действие на биологические системы, принципы защиты от них и т.д.

Радиометрия – совокупность методов измерения активности (числа распадов в единицу времени) радиоизотопов в источниках ионизирующих излучений.

Радиометр – прибор, предназначенный для определения активности объектов радиометрического контроля.

Радионуклид – нуклид (атом), ядро которого способно к радиоактивному распаду.

Радионуклид долгоживущий – природные и естественные радионуклиды с периодом полураспада от нескольких до миллиардов лет.

Радионуклиды искусственные – радионуклиды, получаемые посредством ядерных реакций. Образуются в основном в ядерных реакторах и при ядерных взрывах. Насчитывают свыше 1000 радионуклидов.

Радионуклиды естественные (природные) – радионуклиды, которые образовались и постоянно образуются без участия человека, всего насчитывают около 300 радионуклидов.

Радиопротекторы – химические соединения, повышающие устойчивость организма к действию ионизирующего излучения.

Радиорезистентность – устойчивость биологических объектов к действию ионизирующих излучений.

Радиотоксины – низкомолекулярные биологически активные вещества различной природы, образующиеся в организме растений, животных и человека при воздействии ионизирующего излучения и участвующие в формировании лучевых поражений. Радиотоксины играют существенную роль в развитии лучевой болезни, могут останавливать рост тканей, в высоких концентрациях – вызывать лейкопению, задерживать развитие организма, стать причиной появления уродств в потомстве.

Радиочувствительность – чувствительность биологических объектов к действию ионизирующего излучения. Мера радиочувствительности – доза облучения, вызывающая гибель 50 % клеток или организмов (LD_{50}). Радиочувствительность различных биологических объектов может отличаться в сотни и тысячи раз.

Распад – процесс спонтанного превращения радионуклида, уменьшения активности радиоактивного вещества.

Распад позитронный – бета-распад, происходящий при избытке протонов в атоме искусственных радиоактивных элементов с испусканием позитрона и нейтрино и вылетом из ядра гамма-кванта.

Рассеяние комптоновское – один из видов взаимодействия ионизирующего излучения с атомами вещества, сопровождающийся потерей фотоном части энергии и вылетом из атома электрона (электрона отдачи).

Рентген (Р) – внесистемная единица экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучения, определяемая по ионизирующему действию их на воздух. Дозе в 1 Р соответствует образование $2,083 \cdot 10^9$ пар ионов в 1 см^3 воздуха, или $1,61 \cdot 10^{12}$ пар в 1 г воздуха. $1 \text{ Р} = 2,57976 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

Руды радиоактивные – руды, содержащие минералы радиоактивных химических элементов (например, долгоживущие радионуклиды – уран-238, уран-235, технеций-232 и др.).

След радиоактивный – территория, загрязненная радиоактивными веществами по пути движения радиоактивного облака, образованного ядерным взрывом или выбросом радиоактивных веществ предприятий атомной промышленности и ядерной энергетики.

Счетчики заряженных частиц – приборы для регистрации заряженных частиц. К ним относят счетчики Гейгера-Мюллера, пропорциональный, сцинтилляционный и др.

Счетчик Гейгера-Мюллера – газоразрядный прибор для обнаружения и исследования различного рода ядерного и другого ионизирующего излучения (альфа-, бета-частиц, гамма-квантов).

Теория мишени – теория, объясняющая зависимость радиобиологического эффекта от дозы и вида ионизирующего излучения. В ее основу положены принципы попадания (действие ионизирующего излучения есть совокупность столкновения заряженных частиц с атомами и молекулами поглощающего объекта) в «мишени» (причиной радиобиологического эффекта могут быть лишь попадания в определенный чувствительный объем – «мишень»).

Фон излучения техногенный – естественный (природный) фон излучения, измененный в результате производственной деятельности людей.

Фон радиационный естественный – излучение, создаваемое космическим излучением и излучением природных радионуклидов, естественно распределенных в земле, воде, воздухе, других элементах биосферы, пищевых продуктах и организме.

Фотон – квант электромагнитного поля, нейтральная элементарная частица с нулевой массой.

Фотоэлектрон – электрон, вылетающий из оболочки атома при фотоэффекте.

Фотоэффект – один из видов взаимодействия ионизирующих излучений с атомами вещества, сопровождающийся поглощением фотона и вылетом электрона (фотоэлектрона).

Хранилище радиоактивных отходов – сооружение или устройство, предназначенное для хранения радиоактивных отходов.

Частицы элементарные – мельчайшие известные частицы физической материи (например, протон, электрон, квант и др.), характеризующиеся определенными значениями массы, заряда, спина и других физических величин.

Электрон (e , e^-) – стабильная отрицательно заряженная элементарная частица массой $9 \cdot 10^{-28}$ г, составная часть атома. Число электронов в нейтральном атоме равно атомному номеру, т.е. числу протонов в ядре. Электронные оболочки атомов определяют оптические, электрические, магнитные и химические свойства атомов и молекул, а также большинство свойств твердых тел.

Электрон-вольт (эВ) – единица энергии в ядерно-физической шкале, используемая для измерения энергии ионизирующих излучений. 1 эВ соответствует энергии, которую приобретает электрон в поле напряжением 1 В.

Элементы радиоактивные – химические элементы, все изотопы которых радиоактивны (технеций, прометий, полоний и все следующие за ним элементы в периодической системе).

Энергетика ядерная – отрасль энергетики, использующая ядерную энергию для электрификации и теплофикации; область науки и техники, разрабатывающая методы и средства преобразования атомной энергии в электрическую и тепловую.

Энергия атомная (ядерная) – энергия, выделяющаяся в процессе превращения ядер атомов. Использование атомной энергии основано на ценных реакциях деления тяжелых ядер и синтеза легких ядер.

Эффект кислородный – изменение биологического действия ионизирующих излучений в зависимости от присутствия и количества кислорода.

Эффект радиобиологический – функциональные и морфологические изменения, развивающиеся в организме в результате воздействия на него ионизирующего излучения.

Эффекты изотопные – различия в свойствах и поведении изотопов одного и того же химического эле-

мента. Изотопные эффекты связаны с вариациями числа нейтронов и различиями вследствие этого в спинах (моментах количества движения) атомных ядер.

Ядро атомное – положительно заряженная центральная часть атома, в которой практически сосредоточена вся масса атома. Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов (нуклонов). Плотность ядра – 10^{14} г/см³.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алексахин Р.М.* Радиоактивное загрязнение почвы и растений / Р.М. Алексахин. – М.: Из-во Акад. наук СССР, 1963. – 132 с.

2. *Аненков Б.Н.* Основы сельскохозяйственной радиологии / Б.Н. Аненков, Е.В. Юдинцева. – М.: Агропромиздат, 1991. – 270 с.

3. *Виленчик М.М.* Радиобиологические эффекты и окружающая среда / М.М. Виленчик. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 158 с.

4. *Гродзенский Д.Э.* Радиобиология (биологическое действие ионизирующего излучения) / Д.Э. Гродзенский. – М.: Знание, 1958. – 32 с.

5. *Гродзинский Д.М.* Естественная радиоактивность растений и почв / Д.М. Гродзинский. – Киев: Наукова думка, 1965. – 216 с.

6. *Гулякин И.В.* Сельскохозяйственная радиобиология / И.В. Гулякин, Е.В. Юдинцева. – М.: Колос, 1973. – 272 с.

7. *Действие* ионизирующей радиации на биогеоценоз / Д.А. Криволуцкий, Ф.А. Тихомиров, Е.А. Федоров и др. – М.: Наука, 1988. – 240 с.

8. *Корнеев Н.А.* Снижение радиоактивности в растениях и продуктах животноводства / Н.А. Корнеев, А.Н. Сироткин, Н.В. Корнеева. – М.: Колос, 1977. – 208 с.

9. *Кузин А.М.* Прикладная радиобиология / А.М. Кузин, Д.А. Каушанский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 222 с.

10. *Павлоцкая Ф.И.* Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах / Ф.И. Павлоцкая. – М.: Атомиздат, 1974. – 215 с.

11. *Пивоваров Ю.П.* Радиационная экология / Ю.П. Пивоваров, В.П. Михалёв. – М.: Академия, 2004. – 239 с.

12. *Поляков Ю.А.* Радиоэкология и дезактивация почв / Ю.А. Поляков. – М.: Атомиздат, 1970. – 303 с.

13. *Преображенская Е.И.* Радиоустойчивость семян растений / Е.И. Преображенская. – М.: Атомиздат, 1971. – 232 с.

14. *Прохоров В.М.* Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. Физико-химические механизмы и моделирование / под ред. Р.М. Алексахина. – М.: Энергоиздат, 1981. – 99 с.

15. *Радияция.* Дозы, эффекты, риск; перевод с англ. – М.: Мир, 1988. – 77 с.

16. *Радикационная* обработка отходов для сельскохозяйственного использования / В.С. Ветров, Н.А. Высоцкая, А.М. Дмитриев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с.

17. *Рачинский В.В.* Курс основ атомной техники в сельском хозяйстве / В.В. Рачинский. – М.: Атомиздат, 1978. – 384 с.

18. *Результаты* исследований и внедрение приёма предпосевного гамма-облучения семян сельскохозяйственных культур в СССР и НРБ / Н.М. Березина, И.К. Бобырь, Х.С. Даскалов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 97 с.

19. *Савин В.Н.* Действие ионизирующего излучения на целостный растительный организм / В.Н. Савин. – М.: Энергоиздат, 1981. – 120 с.

20. *Селегей В.В.* Радиоактивное загрязнение г. Новосибирска – прошлое и настоящее / В.В. Селегей. – Новосибирск, 1997. – 146 с.

21. *Сельскохозяйственная* радиоэкология / под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. – М.: Экология, 1991. – 397 с.

22. *Формирование* радиобиологической реакции растений / под общ. ред. Д.М. Гродзинского. – Киев: Наукова думка, 1984. – 216 с.

23. *Юдинцева Е. В.* Агрохимия радиоактивных изотопов стронция и цезия / Е. В. Юдинцева, И. В. Гулякин. – М.: Атомиздат, 1968. – 472 с.

Содержание

Введение	3
1. Введение в сельскохозяйственную радиологию	6
1.1. Общие задачи и содержание дисциплины	6
1.2. Естественный радиационный фон	9
1.3. Основные источники радиоактивного загрязнения природной среды	11
Тестовые задания	17
2. Физика ядерных излучений	19
2.1. Строение атома и атомного ядра	19
2.2. Изотопы	22
2.3. Взаимодействие радиоактивных излучений с веществом	24
2.4. Альфа-распад	26
2.5. Бета-распад	28
2.6. Гамма-лучи	31
2.7. Единицы измерения радиоактивности	34
2.8. Закон радиоактивного распада	36
Тестовые задания	38
3. Естественные и искусственные радиоактивные элементы	47
3.1. Естественные радиоактивные элементы	47
3.2. Миграция естественных радиоактивных элементов в почве и растениях	53
3.3. Искусственные радиоактивные изотопы	56
Тестовые задания	59
4. Дозиметрия и радиометрия	62
4.1. Дозы излучения и дозиметрические единицы	62
4.2. Методы регистрации ионизирующих излучений ...	66
4.2.1. Ионизационные методы	67
4.2.2. Сцинтилляционный метод	69
4.2.3. Фотографический метод	70
Тестовые задания	71

5. Химия изотопов и радиационная химия	75
5.1. Основы химии изотопов	75
5.2. Метод изотопных индикаторов	77
5.3. Основы радиационной химии	82
5.3.1. Радиолиз воды	83
5.3.2. Действие излучения на органическое вещество ...	84
Тестовые задания	85
6. Действие ионизирующих излучений	87
6.1. Характеристика облучения	87
6.2. Действие ионизирующих излучений на биологические объекты	88
6.3. Физиологическое (соматическое) действие радиации	93
6.4. Генетическое действие излучений	97
Тестовые задания	98
7. Действие ионизирующих излучений на растение ...	102
7.1. Общие закономерности	102
7.2. Радиочувствительность растений	105
7.3. Радиационная стимуляция	108
7.4. Продуктивность и качество урожая облучённых растений	110
Тестовые задания	113
8. Вовлечение радиоактивных продуктов деления в земледелие	115
8.1. Отложение радионуклидов на поверхность земли	115
8.3. Миграция радионуклидов в почве	122
Тестовые задания	124
9. Пути поступления радионуклидов в растение	127
9.1. Количественные показатели накопления радионуклидов растениями из почвы	127
9.2. Поступление радионуклидов в растения через корни	130

9.3. Поступление радионуклидов в растение	
через листья	133
Тестовые задания	137
10. Снижение содержания радионуклидов	
в продукции растениеводства	140
10.1. Агрохимические способы	140
10.2. Агротехнические приёмы.....	144
10.3. Мелиорация почв	144
10.4. Подбор сельскохозяйственных растений	
и фитомелиорация почв.....	147
Тестовые задания	150
11. Радиационно-гигиенические аспекты	
сельскохозяйственного использования территории,	
загрязнённой радиоактивными веществами	154
11.1. Регламентирование воздействия ионизирующих	
излучений на население	154
11.2. Установление контрольных уровней содержания	
радионуклидов	157
11.3. Контрольные уровни содержания радионуклидов	
в продуктах питания	162
Тестовые задания	164
12. Применение излучений и радиоактивных изотопов	
в сельском хозяйстве.....	167
12.1. Методы радиационной стимуляции	167
12.2. Радиационная технология хранения	
сельскохозяйственной продукции	170
12.3. Радиационные методы борьбы	
с насекомыми-вредителями.....	172
12.4. Методы радиационной селекции.....	174
Тестовые задания	176
13. Радиационный мониторинг сферы	
агропромышленного производства	179
13.1. Радиационный мониторинг	179

13.2. Принципы организации и структура радиационного мониторинга агропромышленного комплекса	181
Тестовые задания	188
14. Радиационные аварии и агропромышленное производство.....	191
14.1. Общие положения	191
14.2. Периодизация радиационной обстановки после аварии.....	192
14.3. Радиоактивное загрязнение после крупных радиационных аварий.....	194
Тестовые задания	200
Словарь терминов	202
Библиографический список	223

Составитель
Борис Иванович Тепляков

**СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ
РАДИОЛОГИЯ**

Учебное пособие

Редактор Т. К. Коробкова
Компьютерная вёрстка Т. А. Измайлова

Подписано в печать 8 августа 2013 г. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Объем 11,0 уч. изд. л., 14,4 усл. печ. л.
Тираж 100 экз. Изд. № 71. Заказ № 898

Отпечатано в Издательстве
Новосибирского государственного аграрного университета
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, каб. 106.
Тел./факс (383) 267–09–10. E-mail: 2134539@mail.ru